

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
Высшего профессионального образования

Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И.Ленина

УДК 621.1: 620.92.004.14 (0472)

№ госрегистрации

Инв. №

УТВЕРЖДАЮ
Проректор университета
по научной работе
_____Тютиков В.В.
“ ___ ” _____ 2009 г.

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Разработка систем, обеспечивающих устранение тепловой и гидравлической разбалансированности трубопроводных сетей тепло- и водоснабжения

Этап 1

Разработка методик для идентификации и определения степени тепловой и гидравлической разрегулированности и математических моделей

(промежуточный)

Начальник НИСа

подпись, дата

Таланов С.Б.

Руководитель темы

подпись, дата

Созинов В.П.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, д.т.н., профессор

В. П. Созинов

Исполнители темы:

Ведущий науч. сотр., канд. техн. наук, доцент

А. А. Генварев

Канд. техн. наук, доцент

В. В. Сенников

Инженер

А. Е. Костров

Инженер

М. Г. Козлов

Соисполнители:

Канд. техн. наук., доцент

Ю. В. Яворовский

Канд. техн. наук., доцент

РЕФЕРАТ

УДК 621.1:620.92.004.14 (047.2)

Стр. 203

табл. 16

рис. 44

библ. 35

ТЕПЛОВЫЕ СЕТИ, ВОДОПРОВОДНЫЕ СЕТИ, РАЗБАЛАНСИРОВАННОСТЬ, ИДЕНТИФИКАЦИЯ, ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЕ.

В промежуточном отчёте представлен обзор современного состояния проблемы разбалансированности теплогидравлических и водопроводных сетей. Рассмотрены методики оценки величин отклонений количества сетевой воды и тепла от расчётных при отсутствии приборов учёта у абонентов с использованием измеряемых параметров: температуры и давления и расчётных способов.

Приведены методики диагностирования теплогидравлических режимов тепловых сетей и абонентов.

Выполнен анализ методики идентификации сетей с помощью дисперсионного анализа.

Для выполнения наладочных и эксплуатационных гидравлических расчетов потокораспределения разработаны методики эквивалентирования последовательно-параллельных и кольцевых сетей.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	6
1.1. Анализ современного состояния вопроса тепловой и гидравлической разбалансированности систем тепло- и водоснабжения	10
1.1.1. Устойчивость системы теплоснабжения как критерий разбалансированности и качество теплоснабжения.....	10
1.1.2. Влияние гидравлических сопротивлений трубопроводов и систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения на разбалансированность систем теплоснабжения.....	15
1.1.3. Разбалансированность в многоконтурных и кольцевых сетях.....	19
1.1.3.1. Расчёт потокораспределения в гидравлической сети методом продолжения (приведения системы уравнений к дифференциальной и её интегрирование).....	21
1.1.3.2. Основы альтернионного анализа нелинейных сетей гидравлического типа.....	27
1.1.3.3. Альтернионный анализ на примере расчёта трёхконтурной сети.....	32
1.1.4. Свободные напоры и их влияние на разбалансированность в системах водоснабжения.....	36
1.1.5. Периоды начала и окончания отопительного периода и их влияние на разбалансированность систем теплоснабжения.....	36
1.1.6. Влияние качества транспортируемой воды на гидравлическое сопротивление трубопроводов и его влияние на разбалансированность систем водоснабжения.....	37
1.1.7. Влияние тепловых потерь и снижения температуры сетевой воды у удалённых потребителей на разбалансированность систем теплоснабжения.....	38
1.1.8. Применение компьютерных программ для выполнения требований «Правил технической эксплуатации тепловых электростанций» по расчётам режимов работы тепловых сетей.....	39
1.2. Разработка методики проведения идентификации систем тепло- и водоснабжения.....	41
1.2.1. Математическая модель неизотермического потокораспределения в тепловых водяных сетях.....	42
1.2.2. Оценка погрешности определения коэффициента гидравлического сопротивления.....	46

1.2.3. Оценка погрешности параметров тепловой сети.....	50
1.3. Разработка методик для определения степени тепловой и гидравлической регулированности систем тепло- и водоснабжения.....	74
1.3.1. Оценка параметров, влияющих на степень тепловой и гидравлической разбалансированности систем тепло- и водоснабжения.....	74
1.3.2. Методика определения степени тепловой разбалансированности.....	83
1.3.3. Диагностирование разбалансированности теплогидравлических режимов.....	107
1.4. Разработка математических моделей, моделирование режимов работы систем тепло- и водоснабжения.....	119
1.4.1. Математическая модель гидравлического распределителя	119
1.4.2. Математические модели эквивалентирования гидравлических сетей.....	137
1.4.2.1. Эквивалентирование участков гидравлической сети.....	138
1.4.2.2. Эквивалентирование и расчёт последовательно-паралельных и разветвлённых схем.....	144
1.4.2.3. Математическая модель гидравлического расчёта сетей с несколькими источниками питания методом расщепления на последовательно-параллельные подсети.....	166
1.4.2.4. Математическая модель эквивалентного преобразования двухкольцевой схемы от двух источников питания в однокольцевую.....	171
1.4.2.5. Математическая модель эквивалентного преобразования произвольной двухкольцевой сети с участком без фиксированных расходов в однокольцевую.....	188

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение потребителей холодной и горячей водой и теплом в соответствии с действующими санитарными нормами по системам трубопроводов водоснабжения и теплоснабжения (водопроводным и тепловым сетям) требует организации гидравлических и тепловых режимов функционирования сетей. На практике за период эксплуатации по разным причинам (подключение новых потребителей, замена оборудования источников и перекачивающих станций, изменение характеристик трубопроводов с течением времени, изменение характеристик подключённых потребителей) происходит отклонение режимов сетей от расчётных – происходит гидравлическая и тепловая разбалансированность.

При современном состоянии вопроса о разбалансированности водопроводных и тепловых сетей отсутствуют единые критерии, а действуют ряд технических параметров гидравлических и тепловых: величины свободных напоров, располагаемых напоров, температура сетевой воды в подающей линии, в обратной линии теплосети, температура воздуха внутри отапливаемых помещений и другие конкретные параметры.

Если в системах холодного водоснабжения разбалансированность можно оценивать гидравлическими параметрами, то в системах горячего водоснабжения и отопления необходимо учитывать совместно гидравлические и тепловые параметры.

Например, тепловая сеть может быть гидравлически сбалансирована – проведением наладочных работ, но ввиду больших тепловых потерь в трубопроводах потребители получают расчётный расход сетевой воды с недостаточным температурным потенциалом и недополучают расчётное количество тепла – то есть сеть будет иметь тепловую разбалансированность.

Требования Правил эксплуатации по ежегодной наладке гидравлических и тепловых режимов часто не выполняются по ряду причин: при известном способе решения проблемы отсутствуют финансовые средства, отсутствует схема взаимодействия собственников систем водо- и теплоснабжения, так зачастую источники тепла находятся у одних собственников, тепловые сети у других и абонентские вводы у третьих, бывают и более сложные объединения собственников, слабая профессиональная подготовка обслуживающего персонала при условии современного сложного технического оборудования также не только не позволяет своевременно устранять разбалансированность, но и часто в силу своей некомпетентности создаёт критические ситуации.

В качестве финансового рычага воздействия на собственников систем тепло- и водоснабжения и в защиту прав потребителей Правительство Российской Федерации

выпустило Постановления № 306 и № 307, в которых указаны отклонения от нормативов подачи потребителям энергии и воды и размеры снижения оплаты за эти услуги.

Ниже приведены данные по услугам холодного и горячего водоснабжения и отопления.

Постановление Правительства Российской Федерации

от 23 мая 2006 г. № 307 г. Москва

«О порядке предоставления коммунальных услуг гражданам»

1. Условия изменения размера платы за коммунальные услуги при предоставлении коммунальных услуг ненадлежащего качества и (или) с перерывами, превышающими установленную продолжительность

Таблица - 1.1.1

Требования к качеству коммунальных услуг	Допустимая продолжительность перерывов или предоставления коммунальных услуг ненадлежащего качества	Порядок изменения размера платы за коммунальные услуги ненадлежащего качества
I. Холодное водоснабжение		
1. Бесперебойное круглосуточное водоснабжение в течение года	Допустимая продолжительность перерыва подачи холодной воды: 8 часов (суммарно) в течение 1 месяца; 4 часа одновременно, а при аварии на тупиковой магистрали - 24 часа	За каждый час превышения (суммарно за расчетный период) допустимой продолжительности перерыва подачи воды размер ежемесячной платы снижается на 0,15 процента размера платы, определенной исходя из показаний приборов учета или приборов учета или исходя из нормативов потребления коммунальных услуг, - с учетом положений пункта 61 Правил предоставления коммунальных услуг гражданам
3. Давление в системе холодного водоснабжения в точке разбора: в многоквартирных домах и жилых домах от 0,03 МПа (0,3 кгс/кв. см) до 0,6 МПа (6 кгс/кв. см)- у водоразборных колонок - не менее 0,1 МПа (1 кгс/кв. см)	Отклонение давления не допускается	За каждый час (суммарно за расчетный период) периода подачи воды: при давлении, отличающемся от установленного до 25 процентов, размер ежемесячной платы снижается на 0,1 процента; при давлении, отличающемся от установленного более чем на 25 процентов, плата не вносится за каждый день предоставления коммунальной услуги ненадлежащего качества (независимо от показаний приборов учета)

Продолжение таблицы 1.1.1.

II. Горячее водоснабжение		
4. Бесперебойное круглосуточное горячее водоснабжение в течение года	Допустимая продолжительность перерыва подачи горячей воды: 8 часов (суммарно) в течение одного месяца; 4 часа одновременно, а при аварии на тупиковой магистрали -24 часа; для проведения 1 раз в год профилактических работ в соответствии с пунктом 10 Правил предоставления коммунальных услуг гражданам	За каждый час, превышающий (суммарно за расчетный период) допустимый период перерыва подачи воды, размер ежемесячной платы снижается на 0,15 процента размера платы, определенной исходя из показаний приборов учета или исходя из нормативов потребления коммунальных услуг, - с учетом положений пункта 61 Правил предоставления коммунальных услуг гражданам
5. Обеспечение температуры горячей воды в точке разбора: не менее 60°C - для открытых систем централизованного теплоснабжения; не менее 50°C - для закрытых систем централизованного теплоснабжения; не более 75°C - для любых систем теплоснабжения	Допустимое отклонение температуры горячей воды в точке разбора: в ночное время (с 23.00 до 6.00 часов) не более чем на 5°C; в дневное время (с 6.00 до 23.00 часов) не более чем на 3°C	За каждые 3°C снижения температуры свыше допустимых отклонений размер платы снижается на 0,1 процента за каждый час превышения (суммарно за расчетный период) допустимой продолжительности нарушения; при снижении температуры горячей воды ниже 40°C оплата потребленной воды производится по тарифу за холодную воду
6. Постоянное соответствие состава и свойств горячей воды санитарным нормам и правилам	Отклонение состава и свойств горячей воды от санитарных норм и правил не допускается	При несоответствии состава и свойств воды санитарным нормам и правилам плата не вносится за каждый день предоставления коммунальной услуги ненадлежащего качества (независимо от показаний приборов учета)
7. Давление в системе горячего водоснабжения в точке разбора от 0,03 МПа (0,3 кгс/кв. см) до 0,45 МПа(4,5 кгс/кв. см)	Отклонение давления не допускается	За каждый час (суммарно за расчетный период) периода подачи воды: при давлении, отличающемся от установленного до 25 процентов, размер ежемесячной платы снижается на 0,1 процента; при давлении, отличающемся от установленного более чем на 25 процентов, плата не вносится за каждый день предоставления коммунальной услуги ненадлежащего качества (независимо от показаний приборов учета) (суммарно за расчетный период), размер платы снижается на 0,15 процента размера платы, определенной исходя из показаний приборов учета или исходя из нормативов потребления коммунальных услуг, - с учетом положений пункта 61 Правил предоставления коммунальных услуг гражданам

Продолжение таблицы 1.1.1.

VI. Отопление		
14. Бесперебойное круглосуточное отопление в течение отопительного периода	Допустимая продолжительность перерыва отопления: не более 24 часов (суммарно) в течение одного месяца; не более 16 часов одновременно - при температуре воздуха в жилых помещениях от 12°C до нормативной; не более 8 часов одновременно - при температуре воздуха в жилых помещениях от 10°C до 12°C; не более 4 часов одновременно - при температуре воздуха жилых помещений от 8°C до 10°C	За каждый час, превышающий (суммарно за расчетный период) допустимую продолжительность перерыва отопления, размер ежемесячной платы снижается на 0,15 процента размера платы, определенной исходя из показаний приборов учета или исходя из нормативов потребления коммунальных услуг, - с учетом положений пункта 61 Правил предоставления коммунальных услуг гражданам
15. Обеспечение температуры воздуха ² : в жилых помещениях - не ниже +18°C (в угловых комнатах - +20°C), а в районах с температурой наиболее холодной пятидневки (обеспеченностью 0,92) - 31°C и ниже - +20 (+22)°C; в других помещениях - в соответствии с ГОСТом Р 51617-2000. Допустимое снижение нормативной температуры в ночное время суток (от 0.00 до 5.00 часов) - не более 3°C. Допустимое превышение нормативной температуры - не более 4°C	Отклонение температуры воздуха в жилом помещении не допускается	За каждый час отклонения температуры воздуха в жилом помещении (суммарно за расчетный период) размер ежемесячной платы снижается: на 0,15 процента размера платы, определенной исходя из показаний приборов учета за каждый градус отклонения температуры; на 0,15 процента размера платы, определенной исходя из нормативов потребления коммунальных услуг (при отсутствии приборов учета), за каждый градус отклонения температуры
16. Давление во внутридомовой системе отопления: с чугунными радиаторами - не более 0,6 МПа (6 кгс/кв. см); с системами конвекторного и панельного отопления, калориферами, а также прочими отопительными приборами - не более 1 МПа (10 кгс/кв. см); с любыми отопительными приборами - не менее чем на 0,05 МПа (0,5 кгс/кв. см) превышающее статическое давление, требуемое для постоянного заполнения системы отопления теплоносителем	Отклонение давления более установленных значений не допускается	За каждый час (суммарно за расчетный период) периода отклонения установленного давления во внутридомовой системе отопления при давлении, отличающемся от установленного более чем на 25 процентов, плата не вносится за каждый день предоставления коммунальной услуги ненадлежащего качества (независимо от показаний приборов учета)

1.1 Анализ современного состояния вопроса тепловой и гидравлической разбалансированности систем тепло- и водоснабжения

1.1.1 Устойчивость системы теплоснабжения как критерий разбалансированности и качество теплоснабжения

Обеспечение потребителей теплом, получаемым от централизованных источников в виде горячей воды, осуществляется транспортом воды по трубопроводам тепловых сетей.

Функции подачи тепла потребителям тепловыми сетями, подключёнными к источникам тепла, могут быть выполнены лишь при получении потребителями горячей воды при заданном гидравлическом перепаде напоров (3÷5 метров водяного столба в сети с непосредственным присоединением и 15÷45 метров водяного столба при элеваторном присоединении) и температуре в подающей линии в соответствии с температурным графиком.

Как правило, на стадии начального проектирования выполняются лишь требования по обеспеченности заданных перепадов напоров у потребителей на одном расчётном режиме.

При значительном количестве подключённых потребителей к тепловой сети большое значение имеет строгое соблюдение установки дроссельных устройств. При отклонениях параметров дроссельных устройств от расчётных часть потребителей получит располагаемые напоры большие расчётных, а остальные меньшие расчётных.

Отклонение заданного количества тепла, транспортируемого по тепловым сетям, можно характеризовать коэффициентом гидравлической устойчивости.

При отсутствии авторегулирования на абонентском вводе он равен [2]:

$$Y = \frac{V_p}{V_{\max}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\Delta H_c}{\Delta H_a}}}, \quad (1.1.1)$$

где:

V_p - расчётный расход сетевой воды, подаваемый по тепловой сети к потребителю, м³/час;

V_{\max} - максимально возможный расход, который может быть у потребителя при отключении всех остальных потребителей от тепловой сети, м³/час;

ΔH_c - потеря напора в тепловой сети при расчётном расходе воды, м.в.ст.;

ΔH_a - располагаемый напор на абонентском вводе при расчётном расходе воды, м.в.ст.

Уравнение (1.1.1) показывает, что гидравлическая устойчивость тем больше, чем больше потеря напора на абонентском вводе и чем меньше потеря напора в тепловой сети.

Соответственно, чем ближе расположен потребитель к источнику тепла, тем больше его гидравлическая устойчивость.

При подключении новых потребителей к данной тепловой сети устойчивость каждого потребителя изменяется, так как изменяются потери напора в тепловой сети.

Повышение гидравлической устойчивости потребителей за счёт уменьшения потерь напора в тепловой сети возможно лишь в небольших пределах, так как это требует увеличения диаметров трубопроводов и соответственно увеличения капитальных затрат на строительство тепловых сетей и увеличения тепловых потерь за счёт увеличения поверхности теплообмена.

Таким образом, коэффициент устойчивости не может служить критерием разбалансированности.

В практике проведения наладочных работ в тепловых сетях используется параметр

$$y = \frac{G_\phi}{G_p}, \quad (1.1.2)$$

который также характеризует гидравлическую разбалансированность.

где:

G_ϕ - фактический расход сетевой воды, поступающей в отопительную систему;

G_p - расчётный расход сетевой воды на отопительную систему.

Коэффициент y может быть определён по замеренным температурам воды на тепловом вводе [3]:

для систем теплоснабжения, подключённым к сетям через элеваторы или подмешивающие насосы, по формуле:

$$y = \frac{(t_1 - t_2) \cdot (t_3' + t_2' - 2 \cdot t_6')}{(t_1' - t_2') \cdot (t_3 + t_2 - 2 \cdot t_6)}, \quad (1.1.3)$$

где:

t_1', t_3' и t_2' - замеренные на тепловом вводе температуры воды соответственно в подающем трубопроводе, смешанной и обратной, °С;

t_1, t_3 и t_2 - температуры воды соответственно в подающем трубопроводе, смешанной и обратной по температурному графику при фактической температуре наружного воздуха, °С;

t_6' и t_6 - фактическая и расчётная температуры воздуха внутри помещений, °С;

для систем теплоснабжения жилых и административных зданий, подключённых к тепловой сети без подмешивающих устройств, а также для отопительно-рециркуляционных калориферных установок по формуле:

$$y = \frac{(t_1 - t_2) \cdot (t_1' + t_2' - 2 \cdot t_6')}{(t_1' - t_2') \cdot (t_1 + t_2 - 2 \cdot t_6)}, \quad (1.1.4)$$

для отопительно-вентиляционных калориферных установок, забирающих наружный воздух, а также для систем теплоснабжения производственных зданий, ограждающие конструкции которых не обладают значительной теплоаккумулирующей способностью, подключённых к тепловой сети без подмешивающих устройств, по формуле:

$$y = \frac{(t_1 - t_2) \cdot (t_1' + t_2' - 2 \cdot \tau_n)}{(t_1' - t_2') \cdot (t_1 + t_2 - 2 \cdot \tau_n)}. \quad (1.1.5)$$

Обеспечение подключённых к тепловой сети потребителей теплом должно соответствовать санитарным нормам и договорным условиям. Это определяет качество тепловой энергии, то есть соответствие термодинамических параметров теплоносителя – температуры сетевой воды в подающем трубопроводе и величина перепада давлений между подающим и обратным трубопроводами и допустимые значения их отклонений от договорных условий [2].

Кроме того, важным является и режим потребления тепловой энергии, определяемый соответствием реальных расходов теплоносителя и температуры обратной сетевой воды, возвращаемой потребителем на тепловой источник [2].

В [2] приведён математический аппарат оценки качества теплоснабжения и режима потребления тепловой энергии отопительными установками.

Изменение абсолютного расхода теплоты (перетоп или недотоп).

$$\Delta Q_o = d\bar{Q}_o \cdot Q_o', \quad (1.1.6)$$

Изменение расхода сетевой воды

$$\Delta W_o = (W_o - 1) \cdot W_o^p, \quad (1.1.7)$$

где:

относительная отопительная нагрузка:

$$\bar{Q}_o = \frac{0,5 \cdot \tau_{o1} + \frac{0,5 + u}{1 + u} \cdot \tau_{o2} - t_n}{\Delta t'_p + \frac{\Delta t'_o}{Q_o^{0,2}}} \quad (1.1.8)$$

расчётная разность внутренней и наружной температур воздуха, °С:

$$\Delta t'_p = t_{e,p} - t_{n,o} \quad (1.1.9)$$

расчётный температурный напор в отопительном приборе, °С:

$$\Delta t'_o = \left(\frac{\tau'_3 + \tau'_{o2}}{2} \right) - t_{e,p} \quad (1.1.10)$$

τ'_3 - расчётная температура сетевой воды после смесительного устройства, °С;

τ'_{o1} - расчётная температура сетевой воды в подающем трубопроводе, °С;

τ'_{o2} - расчётная температура сетевой воды на выходе из отопительной установки, °С;

u - коэффициент смешения элеватора или другого смесительного устройства;

τ_{o1}, τ_{o2} - фактические температуры воды перед отопительной установкой и после неё, °С;

t_n - фактическая наружная температура, °С;

Полный дифференциал отклонения относительной отопительной нагрузки $d\bar{Q}_o^P$ от её расчётного значения \bar{Q}_o^P для данной наружной температуры t_n :

$$d\bar{Q}_o = \bar{q}_1 \cdot d\tau_{o1} + \bar{q}_2 \cdot d\tau_{o2} \quad (1.1.11)$$

\bar{q}_1 - удельное отклонение относительной отопительной нагрузки \bar{Q}_o на 1°С отклонения температуры воды перед отопительной установкой

τ_{o1} от расчётного значения для данной наружной температуры t_n ;

\bar{q}_2 - удельное отклонение относительной отопительной нагрузки \bar{Q}_o на 1°С отклонения температуры воды после отопительной установки τ_{o2} от расчётного значения для данной наружной температуры t_n ;

$$\bar{q}_1 = \frac{d\bar{Q}_o}{d\tau_{o1}} = \frac{0,5}{(1+u) \cdot \left(\Delta t'_p + 0,8 \cdot \frac{\Delta t'_o}{\bar{Q}_o^{0,2}} \right)}, \quad (1.1.12)$$

$$\bar{q}_2 = \frac{d\bar{Q}_o}{d\tau_{o2}} = \frac{0,5+u}{(1+u) \cdot \left(\Delta t'_p + 0,8 \cdot \frac{\Delta t'_o}{\bar{Q}_o^{0,2}} \right)}, \quad (1.1.13)$$

Q'_o - расчётный расход теплоты на отопление при расчётной наружной температуре $t_{n,o}$;

фактический относительный эквивалент расхода сетевой воды:

$$W_o = \frac{(Q_o^P + \Delta Q_o) \cdot \delta \tau'_o}{Q'_o \cdot (\tau_{o1} - \tau_{o2})}, \quad (1.1.14)$$

Q_o^P - расчётный расход теплоты при данной наружной температуре t_n ;
расчётный температурный перепад:

$$\delta \tau'_o = \tau'_{o1} - \tau'_{o2}, \quad (1.1.15)$$

W_o^P - расчётный расход сетевой воды на отопительную установку, кг/ч.

1.1.2 Влияние гидравлических сопротивлений трубопроводов и систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения на разбалансированность систем теплоснабжения

Опыт эксплуатации и наладки тепловых сетей показывает, что на современном этапе в системах централизованного теплоснабжения наблюдается быстропротекающее повышение гидравлического сопротивления отопительных систем зданий, что в итоге приводит к невозможности нормального обеспечения теплом и созданию расчётного гидравлического режима [31], [4], [5].

При выполнении наладочных работ отмечено, что гидравлическое сопротивление отопительных систем зданий, построенных 20-30 лет назад, оказывается меньше, чем у зданий, построенных 5-10 лет назад. Одной из причин, объясняющих эту ситуацию, является то, что ранее минимальными в системах отопления принимались трубы с условным диаметром 25 мм, а в последние годы стали использовать трубы с условным диаметром 15 мм.

Применение стальных труб в системах отопления, как правило, вызывает интенсивную кислородную коррозию (в летний период, как правило, системы опорожнены, а в отопительный период при напоре в обратной линии теплосети ниже высоты здания происходит проникновение воздуха в отопительную систему через неплотности арматуры, так называемое «завоздушивание»).

Кислородная коррозия приводит к отложениям на внутренней поверхности стояков систем отопления окислов двух и трёхвалентного железа. Интересно отметить, что если разрезать по образующей часть стояка системы отопления условным диаметром 15 мм или условным диаметром 20 мм, то можно увидеть, что отложения имеют волнообразный характер, с шагом 80-120 мм. Чем больше диаметр трубы, тем больше шаг.

Анализ вырезов стояков зданий, отработавших более 30 лет, показывает, что проходное сечение почти отсутствует. Измерения потерь напора в таких отопительных системах показывают, как правило, более 5-10 метров водяного столба.

С точки зрения надёжности и обеспеченности теплоснабжения необходимо определить величину гидравлического сопротивления отопительной системы здания. В случае элеваторного присоединения максимальная величина потери напора в отопительной системе 3 метра водяного столба. Это напор, который может создать элеватор.

То есть, если сопротивление системы велико, то элеватор сможет создать лишь меньший необходимого напор, а это приводит к уменьшению расхода воды через отопительную систему и к ухудшению теплоснабжения.

При разработке гидравлического режима необходимо знание действительных гидравлических сопротивлений отопительных систем, так как для зданий с завышенным сопротивлением с помощью элеваторов невозможно обеспечить расчётный коэффициент смешения и на практике приходится либо применять дополнительные мероприятия, либо идти на уменьшение коэффициента смешения, рассчитывая сопла на большие диаметры. Иначе на практике любыми способами сопла будут рассверлены, что приводит к отклонениям фактических располагаемых напоров от расчётных или «разрегуливке» остальных потребителей.

Для зданий с повышенным гидравлическим сопротивлением наилучший вариант – замена системы отопления. В качестве временной меры хорошие результаты даёт установка на обратной линии отопительной системы насоса (см. рисунок 1.1.1).

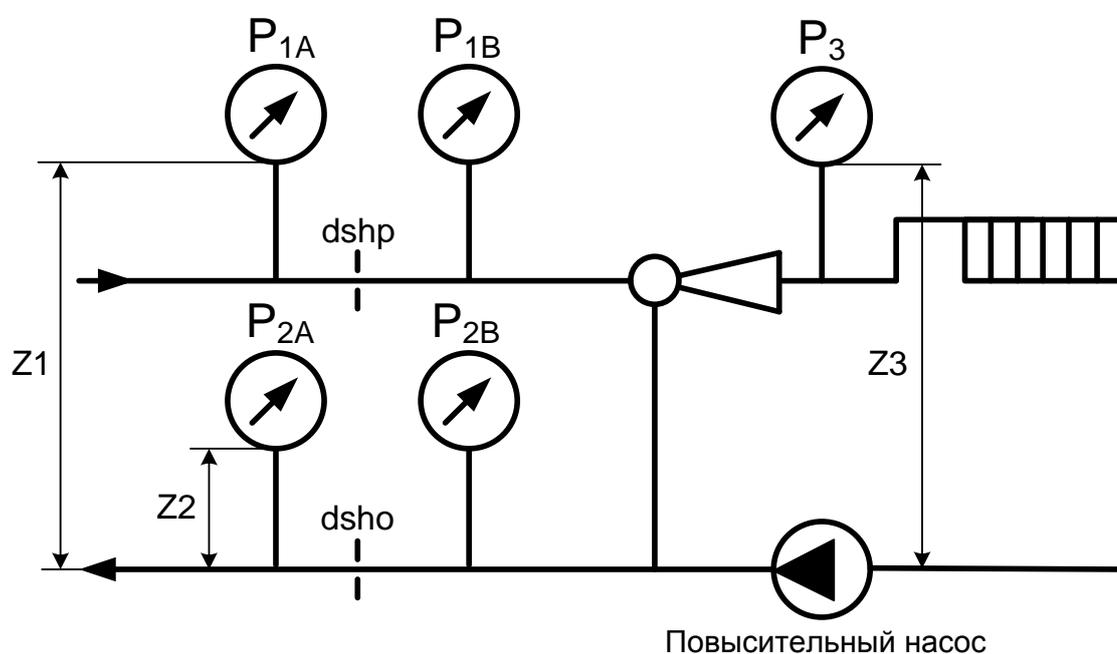


Рисунок 1.1.1

В этом случае насос как бы компенсирует завышенное сопротивление отопительной системы, и элеватор начинает работать нормально, как показывает опыт даже при располагаемом напоре на вводе менее 10 метров водяного столба.

Имеющиеся измерительные приборы: три термометра и три манометра позволяют при использовании расчётных формул выполнить анализ величины сопротивления отопительной системы и фактического теплопотребления.

Коэффициент смешения элеватора

$$u = \frac{t_1^p - t_3^p}{t_3^p - t_2^p} \quad (1.1.16)$$

где:

t_1^p – расчётная температура сетевой воды в подающей линии, °С;

t_2^p – расчётная температура сетевой воды в обратной линии, °С;

t_3^p – расчётная температура в местной системе отопления, °С.

Расход сетевой воды через сопло элеватора

$$G_p = \varphi_1 \cdot f_1 \cdot \rho_p \cdot \sqrt{\Delta H \cdot 2 \cdot g} \quad (1.1.17)$$

где:

φ_1 – коэффициент скорости сопла;

f_1 – выходное сечение сопла, м²;

ρ_p – плотность рабочей воды, кг/м³;

ΔH – потеря напора в рабочем сопле элеватора, м;

$g=9,81$ м/с² – ускорение свободного падения.

Сопротивление отопительной системы отопительной системы

$$S = \frac{4.88997555 \cdot 10^{-11} \cdot [d_1^2 \cdot (88 \cdot n \cdot u^2 - 285 \cdot C \cdot u^2 - 570 \cdot C \cdot u - 285 \cdot C) + 250 \cdot d_3^2]}{d_3^4 \cdot d_1^2 \cdot (1 + 2 \cdot u + u^2)} \quad (1.1.18)$$

где:

$S = \Delta H_{cp} / V_c^2$, м*ч²/м⁶;

ΔH_{cp} – потеря напора в местной системе, м;

V_c – объёмный расход смешанной воды, м³/ч;

d_1 – диаметр сопла, м;

$n = f_3 / (f_3 - f_1)$;

f_3 – сечение цилиндрической камеры смешения, м²;

$C = \varphi_1 / \varphi_3 - 0.5$;

φ_3 – коэффициент скорости диффузора;

d_3 – диаметр цилиндрической камеры смешения, м².

Плотность воды

$$\begin{aligned} \frac{10^3}{\rho} = & 114.332 \cdot \tau - 431.6382 + \frac{706.5474}{\tau} - \frac{641.9127}{\tau^2} + \frac{349.4417}{\tau^3} - \frac{113.8191}{\tau^4} + \frac{20.5199}{\tau^5} - \\ & - \frac{1.578507}{\tau^6} + \pi \cdot \left(-3.117072 + \frac{6.589303}{\tau} - \frac{5.210142}{\tau^2} + \frac{1.819096}{\tau^3} - \frac{0.2365448}{\tau^4} \right) + \\ & + \pi^2 \cdot \left(-6.417443 \cdot \tau + 19.84842 - \frac{24.00174}{\tau} + \frac{14.21655}{\tau^2} - \frac{4.13194}{\tau^3} + \frac{0.4721637}{\tau^4} \right) \end{aligned} \quad (1.1.19)$$

где:

ρ – плотность воды, кг/м³;

$\tau = (t + 273.15) / 647.14$ – приведённая температура воды;

t – температура воды, °С;

$\pi = P / 22.064$ – приведённое абсолютное давление;

P – абсолютное давление, Мпа.

Расход тепла

$$Q = G \cdot c \cdot (t_1 - t_2) \quad (1.1.20)$$

где:

Q – расход тепла, ккал/ч;

G – расход сетевой воды, кг/ч;

$c = 1$ – теплоёмкость воды, ккал/кг/°С;

t_1 – температура сетевой воды перед элеватором, °С;

t_2 – температура сетевой воды на выходе из системы отопления, °С.

1.1.3 Разбалансированность в многоконтурных и кольцевых сетях

Водопроводные и тепловые сети на практике выполняются тупиковыми – от одного источника и без колец, многоконтурными, когда например к одной насосной станции подключено несколько тупиковых сетей, и кольцевыми, когда в сети может быть несколько источников, связанных с потребителями трубопроводами, обеспечивающих подачу воды по нескольким путям.

Наибольшая разбалансированность наблюдается в многоконтурных водопроводных и тепловых сетях, подключенных к одной насосной станции. При этом обычно имеются контуры с большим и меньшим гидравлическим сопротивлением, что приводит к увеличению расходов воды и теплоносителя в контуры с меньшим сопротивлением и к уменьшению расходов в контуры с большим сопротивлением.

В кольцевых водопроводных и тепловых сетях, которые зачастую подключены к нескольким источникам, разбалансированность определяется как практически, так и с использованием методов математического моделирования [13].

Математическая модель состоит из уравнений сплошности и закона сохранения энергии, то есть аналогов 1 и 2 законов Кирхгофа.

Число независимых контуров или колец определяется по известной формуле Эйлера:

$$k = p - q + 1 \quad (1.1.21)$$

где:

k - число независимых контуров;

p - число участков трубопроводов в сети;

q - число узлов в сети.

Уравнение (1.1.21) справедливо лишь для так называемых «плоских» схем сетей, то есть которые могут быть изображены на плоскости без пересечения линий участков трубопроводов. В противном случае схема неплоская и для неё:

$$v \leq k \quad (1.1.22)$$

где:

ν - цикломатическое число.

Расчёт неплоских схем значительно сложнее.

Уравнения аналога второго закона Кирхгофа для гидравлических сетей (водопроводных и тепловых) имеют вид:

$$\sum S_i \cdot V_i \cdot |V_i| - \sum H_i = 0 \quad (1.1.23)$$

где:

S_i - сопротивление участка трубопровода, м·ч²/м⁶;

V_i - расход на участке трубопровода, м³/ч;

$\sum H_i$ - алгебраическая сумма напоров насосных групп на всех участках контура i , м.вод.ст.

Уравнения аналога первого закона Кирхгофа имеют вид:

$$\sum V_j = 0 \quad (1.1.24)$$

где:

V_j - расходы в узле j .

Число уравнений (1.1.23) равно числу независимых контуров в схеме, а число уравнений (1.1.24) на единицу меньше числа узлов.

Система уравнений (1.1.23) и (1.1.24) является трансцендентной и решается каким-либо численным методом. Чаще всего применяется метод Ньютона или его модификации.

По методу Ньютона для каждого контура определяется поправочный расход по формуле:

$$\Delta V_i = \frac{\Delta H_i}{\sum |S_i \cdot V_i|} \quad (1.1.25)$$

где:

ΔH_i - невязка по контуру.

Вычисления проводят итеративно до тех пор, пока невязки по всем контурам не станут меньше заданной точности вычислений, обычно достаточно 0,01-0,001 м.в.ст.

Применение метода Ньютона и его модификаций не всегда обеспечивает сходящийся вычислительный процесс. В таких случаях приходится изменять чаще всего основ-

ной источник, чтобы программа по новому построила расчётное дерево и обеспечила сходящийся вычислительный процесс.

Более надёжным математическим методом является так называемый «метод продолжения». Рассмотрим его применение на примере конкретной схемы водопроводной сети.

1.1.3.1 Расчёт потокораспределения в гидравлической сети методом продолжения (приведения системы уравнений к дифференциальной и её интегрирование)

Наиболее совершенным методом решения систем трансцендентных уравнений является метод «продолжения», в котором исходная система уравнений введением параметра λ приводится к системе дифференциальных уравнений с последующим интегрированием от $\lambda=0$ до $\lambda=1$. В [28] на примере схемы, рисунок 1.1.2, приведена методика расчёта потокораспределения в кольцевой сети, использующая метод «продолжения».

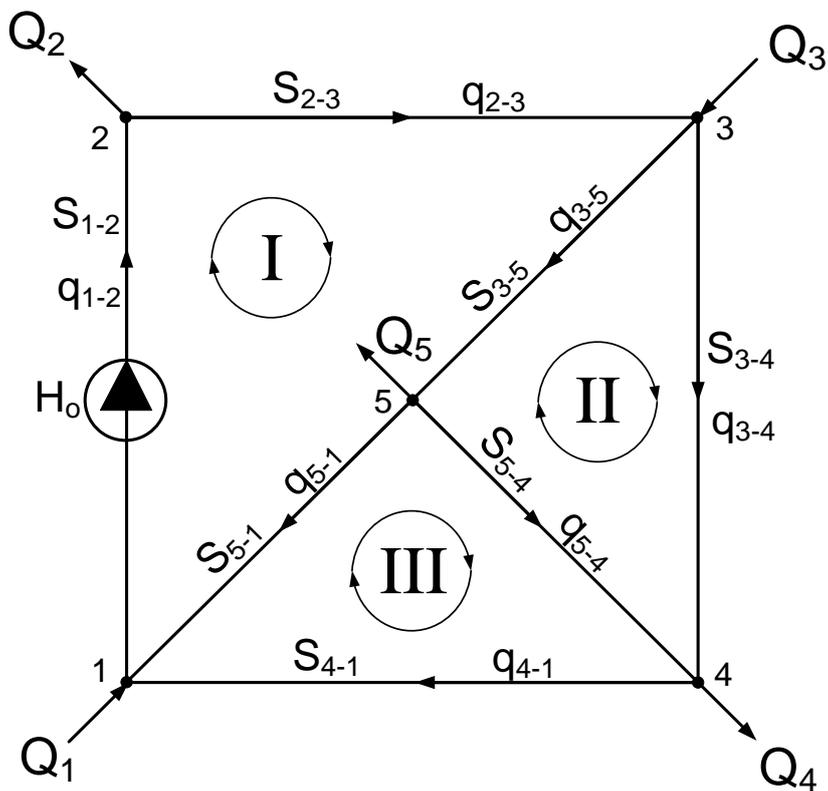


Рисунок 1.1.2

Система уравнений

$$\left. \begin{aligned}
 & S_{1-2} \cdot q_{1-2} \cdot |q_{1-2}| + S_{2-3} \cdot q_{2-3} \cdot |q_{2-3}| + S_{3-5} \cdot q_{3-5} \cdot |q_{3-5}| + \\
 & + S_{5-1} \cdot q_{5-1} \cdot |q_{5-1}| - H_0 = 0 = \Delta h_I \\
 & S_{3-4} \cdot q_{3-4} \cdot |q_{3-4}| + S_{5-4} \cdot q_{5-4} \cdot |q_{5-4}| + S_{3-5} \cdot q_{3-5} \cdot |q_{3-5}| = 0 = \Delta h_{II} \\
 & S_{5-4} \cdot q_{5-4} \cdot |q_{5-4}| + S_{4-1} \cdot q_{4-1} \cdot |q_{4-1}| + S_{5-1} \cdot q_{5-1} \cdot |q_{5-1}| = 0 = \Delta h_{III} \\
 & q_{1-2} - Q_2 - q_{2-3} = 0 \\
 & q_{2-3} - q_{3-5} + Q_3 - q_{3-4} = 0 \\
 & q_{3-4} - q_{5-4} - Q_4 - q_{4-1} = 0 \\
 & q_{3-5} - Q_5 - q_{5-1} - q_{5-4} = 0
 \end{aligned} \right\} \quad (1.1.26)$$

Дифференцирование неявных функций

$$\sum_{j=1}^m \frac{\partial F_i}{\partial y_j} \cdot \frac{dy_j}{dx_k} + \frac{\partial F_i}{\partial x_k} = 0 \quad (1.1.27)$$

где:

- m – число уравнений,
- i – номер уравнения,
- j – номер зависимой переменной,

Перейдём к контурным расходам, т.е. выразим все расходы ветвей через расходы

$$q_{1-2}, q_{3-4}, q_{4-1}. \quad (1.1.28)$$

$$q_{2-3} = q_{1-2} - Q_2 \quad (1.1.29)$$

$$q_{3-5} = q_{2-3} + Q_3 - q_{3-4} = q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4} \quad (1.1.30)$$

$$q_{5-4} = Q_4 + q_{4-1} - q_{3-4} \quad (1.1.31)$$

$$\begin{aligned} q_{5-1} &= -Q_5 - q_{5-4} + q_{3-5} = -Q_5 - q_{5-4} + q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4} = \\ &= -Q_5 - Q_4 - q_{4-1} + q_{3-4} + q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4} = \\ &= q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5 \end{aligned} \quad (1.1.32)$$

Тогда система уравнений примет вид:

$$\begin{aligned} &S_{1-2} \cdot q_{1-2} \cdot |q_{1-2}| + S_{2-3} \cdot (q_{1-2} - Q_2) \cdot |q_{1-2} - Q_2| + \\ &+ S_{3-5} \cdot (q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}) \cdot |q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}| + \\ &+ S_{5-1} \cdot (q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5) \cdot |q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + \\ &+ Q_3 - Q_4 - Q_5| - H_0 = 0 \end{aligned} \quad (1.1.33)$$

$$\begin{aligned} &S_{3-4} \cdot q_{3-4} \cdot |q_{3-4}| - S_{5-4} \cdot (Q_4 + q_{4-1} - q_{3-4}) \cdot |Q_4 + q_{4-1} - q_{3-4}| - \\ &- S_{3-5} \cdot (q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}) \cdot |q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}| = 0 \end{aligned} \quad (1.1.34)$$

$$\begin{aligned} &S_{5-4} \cdot (Q_4 + q_{4-1} - q_{3-4}) \cdot |Q_4 + q_{4-1} - q_{3-4}| + S_{4-1} \cdot q_{4-1} \cdot |q_{4-1}| - \\ &- S_{5-1} \cdot (q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5) \cdot |q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5| = 0 \end{aligned} \quad (1.1.35)$$

Введем параметр λ , таким образом, чтобы при $\lambda=0$ система легко решалась.

Очевидно, что в контуре с действующим напором удобно поставить λ в качестве множителя перед всеми слагаемыми, кроме одного, а для контуров без действующих напоров удобно умножить λ на все слагаемые кроме двух. При этом необходимо расставить λ таким образом, чтобы при $\lambda=0$ система определила все неизвестные расходы, т. е. была бы невырожденной. В остальном расстановка параметров λ произвольна.

С учетом указанных замечаний можно записать:

$$\left. \begin{aligned}
& S_{1-2} \cdot q_{1-2} \cdot |q_{1-2}| + \lambda \cdot S_{2-3} \cdot (q_{1-2} - Q_2) \cdot |q_{1-2} - Q_2| + \\
& + \lambda \cdot S_{3-5} \cdot (q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}) \cdot |q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}| + \\
& + \lambda \cdot S_{5-1} \cdot (q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5) \cdot |q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5| - H_0 = 0 \\
& S_{3-4} \cdot q_{3-4} \cdot |q_{3-4}| - S_{5-4} \cdot (Q_4 + q_{4-1} - q_{3-4}) \cdot |Q_4 + q_{4-1} - q_{3-4}| - \\
& - \lambda \cdot S_{3-5} \cdot (q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}) \cdot |q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}| = 0 \\
& S_{5-4} \cdot (Q_4 + q_{4-1} - q_{3-4}) \cdot |Q_4 + q_{4-1} - q_{3-4}| + S_{4-1} \cdot q_{4-1} \cdot |q_{4-1}| - \\
& - \lambda \cdot S_{5-1} \cdot (q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5) \cdot |q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5| = 0
\end{aligned} \right\} \quad (1.1.36)$$

При $\lambda = 0$ получаем систему:

$$\left. \begin{aligned}
& S_{1-2} \cdot q_{1-2}^* \cdot |q_{1-2}^*| - H_0 = 0 \\
& S_{3-4} \cdot q_{3-4}^* \cdot |q_{3-4}^*| - S_{5-4} \cdot (Q_4 + q_{4-1}^* - q_{3-4}^*) \cdot |Q_4 + q_{4-1}^* - q_{3-4}^*| = 0 \\
& S_{5-4} \cdot (Q_4 + q_{4-1}^* - q_{3-4}^*) \cdot |Q_4 + q_{4-1}^* - q_{3-4}^*| + S_{4-1} \cdot q_{4-1}^* \cdot |q_{4-1}^*| = 0
\end{aligned} \right\} \quad (1.1.37)$$

Здесь $q_{1-2}^*, q_{3-4}^*, q_{4-1}^*$ неизвестные начальные контурные расходы.

Или

$$\left. \begin{aligned}
& S_{1-2} \cdot q_{1-2}^* \cdot |q_{1-2}^*| = H_0 \\
& S_{3-4} \cdot q_{3-4}^* \cdot |q_{3-4}^*| = S_{5-4} \cdot (Q_4 + q_{4-1}^* - q_{3-4}^*) \cdot |Q_4 + q_{4-1}^* - q_{3-4}^*| \\
& S_{5-4} \cdot (Q_4 + q_{4-1}^* - q_{3-4}^*) \cdot |Q_4 + q_{4-1}^* - q_{3-4}^*| = -S_{4-1} \cdot q_{4-1}^* \cdot |q_{4-1}^*|
\end{aligned} \right\} \quad (1.1.38)$$

Очевидно, что эта система может быть легко сводима к линейной, путем извлечения квадратного корня.

$$\left. \begin{aligned}
& \sqrt{S_{1-2}} \cdot q_{1-2}^* = \sqrt{H_0} \\
& \sqrt{S_{3-4}} \cdot q_{3-4}^* = \sqrt{S_{5-4}} \cdot (Q_4 + q_{4-1}^* - q_{3-4}^*) \\
& \sqrt{S_{5-4}} \cdot (Q_4 + q_{4-1}^* - q_{3-4}^*) = -\sqrt{S_{4-1}} \cdot q_{4-1}^*
\end{aligned} \right\} \quad (1.1.39)$$

Общее правило извлечения квадратного корня таково: если в системе (1.1.38) выражение потери напора на каком либо участке или действующий напор со знаком «плюс», то и после извлечения корня будет «плюс», если знак «минус», то и после извлечения квадратного корня будет «минус».

Таким образом система (1.1.39) может быть легко решена.

$$\begin{aligned}
& 2 \cdot S_{1-2} \cdot |q_{1-2}| \frac{dq_{1-2}}{d\lambda} + 2 \cdot \lambda \cdot S_{2-3} \cdot |q_{1-2} - Q_2| \cdot \frac{dq_{1-2}}{d\lambda} + 2 \cdot \lambda \cdot S_{3-5} \times \\
& \times |q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}| \cdot \frac{dq_{1-2}}{d\lambda} + 2 \cdot \lambda \cdot S_{5-1} \cdot |q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5| \times \\
& \times \frac{dq_{1-2}}{d\lambda} + 2 \cdot \lambda \cdot S_{3-5} \cdot (-1) \cdot |q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}| \cdot \frac{dq_{3-4}}{d\lambda} + \\
& + 2 \cdot \lambda \cdot S_{5-1} \cdot (-1) \cdot |q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5| \cdot \frac{dq_{4-1}}{d\lambda} + S_{2-3} \cdot (q_{1-2} - Q_2) \times \\
& \times |q_{1-2} - Q_2| + S_{3-5} \cdot (q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}) \cdot |q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}| + \\
& + S_{5-1} \cdot (q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5) \cdot |q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5| = 0
\end{aligned} \tag{1.1.40}$$

$$\begin{aligned}
& (-1) \cdot 2 \cdot \lambda \cdot S_{3-5} \cdot |q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}| \cdot \frac{dq_{1-2}}{d\lambda} + 2 \cdot S_{3-4} \cdot |q_{3-4}| \cdot \frac{dq_{3-4}}{d\lambda} + \\
& + 2 \cdot S_{5-4} \cdot |Q_4 + q_{4-1} - q_{3-4}| \cdot \frac{dq_{3-4}}{d\lambda} + 2 \cdot \lambda \cdot S_{3-5} \cdot |q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}| \cdot \frac{dq_{3-4}}{d\lambda} + \\
& + (-1) \cdot 2 \cdot S_{5-4} \cdot (Q_4 + q_{4-1} - q_{3-4}) \cdot \frac{dq_{4-1}}{d\lambda} + \\
& + (-1) \cdot S_{3-5} \cdot (q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}) \cdot |q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}| = 0
\end{aligned} \tag{1.1.41}$$

$$\begin{aligned}
& (-1) \cdot 2 \cdot \lambda \cdot S_{5-1} \cdot |q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5| \cdot \frac{dq_{1-2}}{d\lambda} + \\
& + (-1) \cdot 2 \cdot S_{5-4} \cdot |Q_4 + q_{4-1} - q_{3-4}| \cdot \frac{dq_{3-4}}{d\lambda} + \\
& + 2 \cdot S_{5-4} \cdot |Q_4 + q_{4-1} - q_{3-4}| \cdot \frac{dq_{4-1}}{d\lambda} + 2 \cdot S_{4-1} \cdot |q_{4-1}| \cdot \frac{dq_{4-1}}{d\lambda} + \\
& + 2 \cdot \lambda \cdot S_{5-1} \cdot (q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5) \cdot \frac{dq_{4-1}}{d\lambda} + (-1) \cdot S_{5-1} \times \\
& \times (q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5) \cdot |q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5| = 0
\end{aligned} \tag{1.1.42}$$

После преобразований система примет вид:

$$\left. \begin{aligned} a_{11} \frac{dq_{1-2}}{d\lambda} + a_{12} \frac{dq_{3-4}}{d\lambda} + a_{13} \frac{dq_{4-1}}{d\lambda} &= b_1 \\ a_{21} \frac{dq_{1-2}}{d\lambda} + a_{22} \frac{dq_{3-4}}{d\lambda} + a_{23} \frac{dq_{4-1}}{d\lambda} &= b_2 \\ a_{31} \frac{dq_{1-2}}{d\lambda} + a_{32} \frac{dq_{3-4}}{d\lambda} + a_{33} \frac{dq_{4-1}}{d\lambda} &= b_3 \end{aligned} \right\} \quad (1.1.43)$$

где:

$$a_{11} = 2 \cdot S_{1-2} \cdot |q_{1-2}| + 2 \cdot \lambda \cdot S_{2-3} \cdot |q_{1-2} - Q_2| + 2 \cdot \lambda \cdot S_{3-5} \cdot |q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}| + 2 \cdot \lambda \cdot S_{5-1} \cdot |q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5| \quad (1.1.44)$$

$$a_{12} = 2 \cdot \lambda \cdot S_{3-5} \cdot (-1) \cdot |q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}| \quad (1.1.45)$$

$$a_{13} = 2 \cdot \lambda \cdot S_{5-1} \cdot (-1) \cdot |q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5| \quad (1.1.46)$$

$$b_1 = (-1) \cdot S_{3-5} \cdot (q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}) \cdot |q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}| + (-1) \cdot S_{5-1} \cdot (q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5) \cdot |q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5| + (-1) \cdot S_{2-3} \cdot (q_{1-2} - Q_2) \cdot |q_{1-2} - Q_2| \quad (1.1.47)$$

$$a_{21} = (-1) \cdot 2 \cdot \lambda \cdot S_{3-5} \cdot |q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}| \quad (1.1.48)$$

$$a_{22} = 2 \cdot S_{3-4} \cdot |q_{3-4}| + 2 \cdot S_{5-4} \cdot |Q_4 + q_{4-1} - q_{3-4}| + 2 \cdot \lambda \cdot S_{3-5} \cdot |q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}| \quad (1.1.49)$$

$$a_{23} = (-1) \cdot 2 \cdot \lambda \cdot S_{5-4} \cdot |Q_4 + q_{4-1} - q_{3-4}| \quad (1.1.50)$$

$$b_2 = S_{3-5} \cdot (q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}) \cdot |q_{1-2} - Q_2 + Q_3 - q_{3-4}| \quad (1.1.51)$$

$$a_{31} = (-1) \cdot 2 \cdot \lambda \cdot S_{5-1} \cdot |q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5| \quad (1.1.52)$$

$$a_{32} = (-1) \cdot 2 \cdot S_{5-4} \cdot |Q_4 + q_{4-1} - q_{3-4}| \quad (1.1.53)$$

$$a_{33} = 2 \cdot S_{5-4} \cdot |Q_4 + q_{4-1} - q_{3-4}| + 2 \cdot S_{4-1} \cdot |q_{4-1}| + 2 \cdot \lambda \cdot S_{5-1} \cdot |q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5| \quad (1.1.54)$$

$$b_3 = S_{5-1} \cdot (q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5) \cdot |q_{1-2} - q_{4-1} - Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5| \quad (1.1.55)$$

Полученная система дифференциальных уравнений интегрируется каким-либо численным методом, например методом Рунге-Кутты, от начальных значений при $\lambda = 0$ до $\lambda = 1$, при которой получаем решение заданной системы уравнений.

Для теплового расчёта (потерь тепла изолированными и неизолированными трубопроводами) используется методика, приведённая в [2] и [15], для расчёта температур сетевой воды после систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения используется методика характеристик теплообменных аппаратов, приведённая в [2].

1.1.3.2 Основы альтернионного анализа нелинейных сетей гидравлического типа

Задачи анализа, расчета и эквивалентирования для гидравлических сетей возникают во многих технических системах и имеют широкое распространение.

В настоящее время для расчета кольцевых гидравлических сетей используются в основном методы, разработанные В. Я. Хасилевым [32]. При этом утверждается, что вычислительные машины, реализующие эти методы, позволяют проводить расчеты сетей с числом контуров, ограничиваемых лишь объемом памяти ЭВМ. Однако опыт расчетных работ показывает, что не во всех случаях и не для всех схем можно получить решение. Здесь большую роль играют тип исследуемой схемы: плоская или неплоская, а также величины сопротивлений ветвей. При большом разбросе величин сопротивлений, как правило, получается расходящийся вычислительный процесс. Кроме того, использование итерационных методов для решения большой системы уравнений приводит к существенным затратам машинного времени, а зачастую к невозможности расчета схемы. Следует также заметить, что существующие методы расчета для нелинейных систем не позволяют рассчитывать сложные сети по частям и эквивалентировать их.

Гидравлические сети при развитом турбулентном движении жидкости состоят из однотипных с точки зрения нелинейного соотношения между напором и расходом участ-

ков. Такая особенность дала возможность В. Я. Хасилеву найти метод линеаризации, позволяющий определить направления потоков по участкам сети и грубые значения их величин.

Однако возможно точное восстановление линейности по расходу. Здесь изложим основы такой линеаризации, используя аппарат ассоциативных алгебр.

Пусть единичная ветвь описывается уравнением

$$h - sv^2 = 0, \quad (1.1.56)$$

где:

h – напор насоса;

s – сопротивление;

v – расход.

Вся сеть описывается системой уравнений, составленных по законам Кирхгофа,

$$\left. \begin{aligned} \sum_p H_{pi} - \sum_r h_{ri} &= 0 \\ \sum_k v_{kj} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1.1.57)$$

где:

$\sum_p H_{pi}$ - алгебраическая сумма падений напора в i -м замкнутом контуре;

$\sum_r h_{ri}$ - алгебраическая сумма напоров вдоль того же контура;

$\sum_k v_{kj}$ - алгебраическая сумма расходов, втекающих в j -й узел.

Из-за вида нелинейности (1.1.56) уравнения в системе (1.1.57) различаются степенью относительности v_p . Между тем с помощью некоторого алгебраического приема степень v_p в (1.1.57) можно сделать одинаковой.

Перепишем систему (1.1.57) в виде

$$\left. \begin{aligned} B_i \hat{O} &\equiv \left(\sum_p \lambda_{pi} \sqrt{H_{pi}} + \sum_r \lambda_{ri} \sqrt{h_{ri}} \right) \cdot \hat{O} = 0 \\ \sum_k v_{kj} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1.1.58)$$

где:

$$\lambda_i \cdot \lambda_j + \lambda_j \cdot \lambda_i = 2\varepsilon_i \cdot \delta_{ij} \cdot e; \quad (1.1.59)$$

$$\varepsilon_i = \begin{cases} 1, & \text{àñëè } H_i > 0, h_i > 0; \\ -1, & \text{àñëè } H_i < 0, h_i < 0; \end{cases}$$

δ_{ij} - символ Кронекера; e – единица алгебры (1.1.59)

Соотношение (1.1.59) определяет алгебру альтернионов и позволяет после умножения (1.1.58) слева на B_i (квадрирования) получить исходное уравнение (1.1.57), т. е. переход от (1.1.57) к (1.1.58) соответствует «извлечению» некоторого алгебраического квадратного корня из уравнения типа (1.1.57).

Уравнение (1.1.59) имеет решение в виде матриц R_α [33]

$$R_\alpha \cdot R_\beta + R_\beta \cdot R_\alpha = 2\varepsilon_\alpha \cdot \delta_{\alpha\beta} \cdot E, \quad (1.1.60)$$

где E – единичная матрица.

Существует специальное представление, когда $S_0 = R_1, \dots, S_k = R_{k+1}$ симметричны, а $A_1 = R_{k+2}, A_{k-1} = R_{2k}, A_k = (-1)^k \cdot R_1, R_2, \dots, R_k$ антисимметричны, и компоненты этих матриц равны 0, 1, —1. Вместо матриц R_α за образующие кольца $\{R\}$ можно взять 2^k линейно независимых матриц S_i, A_i порядка 2^k . Таким образом, если положить [33]

$$\begin{aligned} S_k^+ &= \begin{pmatrix} S_i & 0 \\ 0 & S_i \end{pmatrix}; \quad A_k^+ = \begin{pmatrix} A_i & 0 \\ 0 & A_i \end{pmatrix}; \quad S_{k+1}^+ = \begin{pmatrix} 0 & S_0 \\ S_0 & 0 \end{pmatrix}; \\ A_{k+1}^+ &= \begin{pmatrix} 0 & -S_0 \\ S_0 & 0 \end{pmatrix}; \end{aligned} \quad (1.1.61)$$

то матрицы со знаком «плюс» будут подчиняться соотношениям типа (1.1.60). Полагая для $k=1$

$$S_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}; A_1 = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}; S_0 = S_1 \cdot A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix};$$

Можно с помощью (1.1.61) найти для произвольного k простейшее представление кольца $\{R\}$.

В качестве примера покажем преобразование матриц для некоторых k .

При $k=2$

$$\begin{aligned} A_1^+ &= \begin{pmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_1 \end{pmatrix}; A_2^+ = \begin{pmatrix} 0 & -S_0 \\ S_0 & 0 \end{pmatrix}; \\ S_1^+ &= \begin{pmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & S_1 \end{pmatrix}; S_2^+ = \begin{pmatrix} 0 & S_0 \\ S_0 & 0 \end{pmatrix}; \end{aligned} \quad (1.1.62)$$

$$S_0^+ = S_1^+ \cdot S_2^+ \cdot A_1^+ \cdot A_2^+. \quad (1.1.63)$$

При $k=3$

$$\begin{aligned} A_1^{++} &= \begin{pmatrix} A_1^+ & 0 \\ 0 & A_1^+ \end{pmatrix}; A_2^{++} = \begin{pmatrix} A_2^+ & 0 \\ 0 & A_2^+ \end{pmatrix}; A_3^{++} = \begin{pmatrix} 0 & -S_0^+ \\ S_0^+ & 0 \end{pmatrix} \\ S_1^{++} &= \begin{pmatrix} S_1^+ & 0 \\ 0 & S_1^+ \end{pmatrix}; S_2^{++} = \begin{pmatrix} S_2^+ & 0 \\ 0 & S_2^+ \end{pmatrix}; S_3^{++} = \begin{pmatrix} 0 & S_0^+ \\ S_0^+ & 0 \end{pmatrix}; \end{aligned} \quad (1.1.64)$$

$$S_0^{++} = S_1^{++} \cdot S_2^{++} \cdot S_3^{++} \cdot A_1^{++} \cdot A_2^{++} \cdot A_3^{++}. \quad (1.1.65)$$

Для $k=4$ и других образование матриц аналогично. Добавим, что получить матрицу с квадратом, равным по $-E$ можно из матрицы с квадратом, равным E , с помощью использования $i = \sqrt{-1}$, т. е. $S_j = i \cdot S_j$.

Так как система (1.1.57) числовая, появление столбца Φ , имеющего порядок 2^k , объясняется тем, что в противном случае первое уравнение системы (1.1.58) означало бы, что λ_i ; линейно зависимы, но это противоречило бы (1.1.59). Однако в нашем случае из-за того, что квадратичных уравнений в (1.1.57) несколько, возникает вопрос о существовании столбца Φ для этой системы.

Достаточным условием существования (т. е. Φ можно определить с точностью до множителя) является требование на B_i [33]

$$B_i^2 = 0; B_i \cdot B_j + B_j \cdot B_i = 0, (i \neq j), \quad (1.1.66)$$

В качестве примера покажем методику составления альтернионной системы уравнений для двухконтурной сети, состоящей из трех ветвей, две из которых активные.

Система уравнений для этой сети, составленная по законам Кирхгофа, имеет вид

$$\left. \begin{aligned} -s_1 \cdot v_1^2 + s_2 \cdot v_2^2 - h_1 &= 0; \\ s_2 \cdot v_2^2 + s_3 \cdot v_3^2 - h_3 &= 0; \\ -v_1 - v_2 + v_3 &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (1.1.67)$$

Соответствующая системе (1.1.67) линеаризованная система уравнений –

$$\left. \begin{aligned} B_1 \hat{O} &\equiv (\beta_1 \cdot \sqrt{s_1 \cdot v_1} + \alpha_1 \cdot \sqrt{s_2 \cdot v_2} + \beta_2 \cdot \sqrt{h_1}) \cdot \hat{O} = 0; \\ B_2 \hat{O} &\equiv (\alpha_2 \cdot \sqrt{s_2 \cdot v_2} + \alpha_3 \cdot \sqrt{s_3 \cdot v_3} + \beta_3 \cdot \sqrt{h_3}) \cdot \hat{O} = 0; \\ -v_1 - v_2 + v_3 &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (1.1.68)$$

Система (1.1.68) совместна, поскольку B_1 и B_2 обладают свойством (1.1.66). Альтернионы α_i и β_i алгебры (1.1.59) имеют представление матрицами типа S_i и A_i соответственно. Расставлять матрицы в системе типа (1.1.58) следует по следующему правилу: если у слагаемого в первом уравнении (1.1.57) знак «минус», то в качестве коэффициента у соответствующего слагаемого в (1.1.58) нужно поставить альтернион типа β , и α когда знак «плюс». Для того чтобы выполнялось условие совместности (1.1.66), индексы у альтернионов должны быть разными.

Система (1.1.68) или в общем случае (1.1.58) может быть решена методом последовательного исключения неизвестных. После получения уравнения относительно одного неизвестного решаем его как уравнение задачи на собственные значения. Аналогично находим и все остальные неизвестные.

Интересно отметить, что предлагаемый альтернионный метод приводит к такому же алгебраическому уравнению с одним неизвестным, как и в случае исключения неизвестных с помощью результатов Эйлера-Сильвестра [34].

Направления потоков в сети можно находить по методу В.А.Хасилева. Однако в общем случае решение для сети следует находить из уравнений типа (1.1.68), пользуясь при этом ограничениями на решения: действительностью, неотрицательностью корней и принципом минимальности потерь энергии в гидравлической системе.

1.1.3.3 Альтернионный анализ на примере расчёта трёхконтурной сети

В [24] предложен метод решения систем квадратичных уравнений, которыми описываются сети с квадратичной нелинейностью, например гидравлические. Этот метод является обобщением метода исключения Гаусса и основывается на использовании альтернионов (гиперкомплексных чисел). Здесь альтернионный метод исключения будет проиллюстрирован на примере сети, изображенной на рисунке 1.1.3.

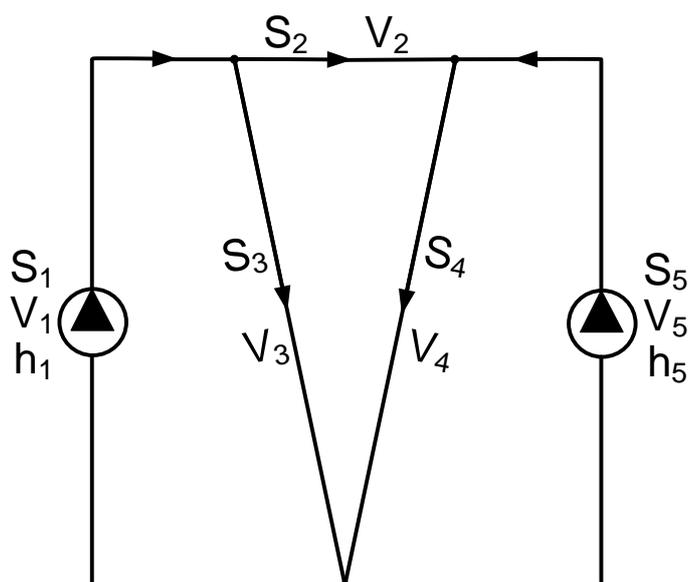


Рисунок 1.1.3 - Схема трехконтурной сети.

С помощью закона Кирхгофа составляем систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} -s_1 \cdot v_1^2 + s_3 \cdot v_3^2 - h_1 &= 0; \\ s_2 \cdot v_2^2 + s_4 \cdot v_4^2 - s_3 \cdot v_3^2 &= 0; \\ -s_5 \cdot v_5^2 - s_4 \cdot v_4^2 + h_5 &= 0; \\ v_1 - v_2 - v_3 = 0; \quad v_2 + v_5 - v_4 &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (1.1.69)$$

По формулам (1.1.71) [24] системе (1.1.69) соответствует альтернионная система уравнений

$$\left. \begin{aligned} B_1 \hat{O} &\equiv \left(\alpha_1 \cdot \sqrt{s_1 \cdot v_1} + \alpha_2 \cdot \sqrt{s_3 \cdot v_3} + \beta_1 \cdot \sqrt{h_1} \right) \cdot \hat{O} = 0; \\ B_2 \hat{O} &\equiv \left(\alpha_3 \cdot \sqrt{s_2 \cdot v_2} + \alpha_4 \cdot \sqrt{s_4 \cdot v_4} + \beta_2 \cdot \sqrt{s_3 \cdot v_3} \right) \cdot \hat{O} = 0; \\ B_3 \hat{O} &\equiv \left(\beta_3 \cdot \sqrt{s_5 \cdot v_5} + \beta_4 \cdot \sqrt{s_4 \cdot v_4} + \alpha_5 \cdot \sqrt{h_5} \right) \cdot \hat{O} = 0; \\ v_2 &= v_1 - v_3; \quad v_4 = v_2 + v_3 = v_1 - v_3 + v_5; \end{aligned} \right\} \quad (1.1.70)$$

Столбец Φ существует, поскольку B_i удовлетворяет (1.1.77) [24]. Минимальный порядок матриц α_i, β_j в (1.1.70) – 32. Однако, если умножить B_1, B_2, B_3 на α_1 и заменить $\alpha_1 \cdot \alpha_i \rightarrow \bar{\beta}_i, \alpha_1 \cdot \beta_j \rightarrow \bar{\alpha}_j, \bar{\alpha}_j, \bar{\beta}_i$ будут подчиняться определяющему соотношению алгебры альтернионов (1.1.73) [24]. Ясно так же, что Φ будет существовать, несмотря на такое умножение. Но матриц вида $\bar{\alpha}_j, \bar{\beta}_i$ потребуется уже только 8. Минимальный порядок их будет 2^4 .

Умножим теперь B_1 слева на α_1, B_2 – на α_3, B_3 – на β_3 . Заменяя $\alpha_1 \cdot \alpha_2 \rightarrow \tilde{\beta}_1; \alpha_1 \cdot \beta_2 \rightarrow \tilde{\alpha}_1; \alpha_3 \cdot \alpha_4 \rightarrow \tilde{\beta}_2; \alpha_3 \cdot \beta_2 \rightarrow \tilde{\alpha}_2; \beta_3 \cdot \beta_4 \rightarrow \tilde{\beta}_3; \beta_3 \cdot \alpha_5 \rightarrow \tilde{\alpha}_3$ можно записать

$$\left. \begin{aligned} \left(\sqrt{s_1 \cdot v_1} + \tilde{\beta}_1 \cdot \sqrt{s_3 \cdot v_3} + \tilde{\alpha}_1 \cdot \sqrt{h_1} \right) \cdot \tilde{O} &= 0; \\ \left(\sqrt{s_4 \cdot v_4} + \tilde{\beta}_2 \cdot \sqrt{s_2 \cdot v_2} + \tilde{\alpha}_2 \cdot \sqrt{s_3 \cdot v_3} \right) \cdot \tilde{O} &= 0; \\ \left(-\sqrt{s_5 \cdot v_5} + \tilde{\beta}_3 \cdot \sqrt{s_4 \cdot v_4} + \tilde{\alpha}_3 \cdot \sqrt{h_5} \right) \cdot \tilde{O} &= 0; \\ v_2 &= v_1 - v_3; \quad v_4 = v_2 + v_5 = v_1 - v_3 + v_5; \end{aligned} \right\} \quad (1.1.71)$$

И после такого умножения столбец \tilde{O} также будет существовать, поскольку существования \tilde{O} зависит только от алгебраических соотношений.

Для дальнейшего уменьшения порядка матриц, участвующих в расчётах, воспользуемся свойством тензорного произведения матриц, а именно: тем, что для произвольных матриц A и B матрицы $A \otimes E_n$ и $E_m \otimes B$ коммутируют. Легко продолжить дальше, т.е. бу-

дуг коммутировать матрицы $A \otimes E_n \otimes E_k$, $E_m \otimes B \otimes E_k$ и $E_p \otimes C$ и т.д. Этим свойством можно воспользоваться для понижения порядка матриц $\tilde{\alpha}_i$ и $\tilde{\beta}_j$ до восьмого.

Состав матрицы

$$\begin{aligned} \tilde{\beta}_1 &= \tilde{\beta}_1 \otimes \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; & \tilde{\alpha}_1 &= \tilde{\alpha}_1 \otimes \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; \\ \tilde{\alpha}_2 &= \tilde{\alpha}_2 \otimes \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; & \tilde{\beta}_2 &= \tilde{\beta}_2 \otimes \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; \\ \tilde{\beta}_3 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \otimes \beta_1; & \tilde{\alpha}_3 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \otimes \alpha_1; \end{aligned} \tag{1.1.72}$$

$$\tilde{\alpha}_1 = \alpha_1 \otimes E; \quad \tilde{\alpha}_2 = E \otimes \alpha_1; \quad \tilde{\beta}_1 = \beta_1 \otimes E; \quad \tilde{\beta}_2 = E \otimes \beta_1;$$

$$\alpha_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}; \quad \beta_1 = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}; \quad E = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Исключая неизвестные в (1.1.71), получим

$$v_1 \cdot \tilde{O} = \left(-\tilde{\beta}_1 \cdot \sqrt{\frac{s_3}{s_1}} \cdot v_3 - \tilde{\alpha}_1 \cdot \sqrt{\frac{h_3}{s_1}} \right) \cdot \tilde{O} \equiv A_1 \cdot \tilde{O}; \tag{1.1.73}$$

$$\begin{aligned} v_5 \cdot \tilde{O} &= \left(\tilde{\beta}_1 \cdot \sqrt{\frac{s_3}{s_1}} \cdot v_3 + \tilde{\alpha}_1 \cdot \sqrt{\frac{h_1}{s_1}} + v_3 + \tilde{\beta}_2 \cdot \tilde{\beta}_1 \cdot \sqrt{\frac{s_2 \cdot s_3}{s_1 \cdot s_4}} \cdot v_3 + \tilde{\beta}_2 \cdot \tilde{\alpha}_1 \cdot \sqrt{\frac{h_1 \cdot s_2}{s_1 \cdot s_4}} + \right. \\ &\left. + \tilde{\beta}_2 \cdot \sqrt{\frac{s_2}{s_4}} \cdot v_3 - \tilde{\alpha}_2 \cdot \sqrt{\frac{s_3}{s_4}} \cdot v_3 \right) \cdot \tilde{O} \equiv A_5 \cdot \tilde{O}; \end{aligned} \tag{1.1.74}$$

$$\begin{aligned}
& \left[\left(\sqrt{s_5} + \sqrt{\frac{s_3 \cdot s_5}{s_1}} \cdot \tilde{\beta}_1 + \sqrt{\frac{s_2 \cdot s_5}{s_4}} \cdot \tilde{\beta}_2 - \sqrt{\frac{s_3 \cdot s_5}{s_4}} \cdot \tilde{\alpha}_2 + \sqrt{\frac{s_2 \cdot s_3 \cdot s_5}{s_1 \cdot s_4}} \cdot \tilde{\beta}_2 \cdot \tilde{\beta}_1 - \right. \right. \\
& \left. \left. - \sqrt{s_2} \cdot \tilde{\beta}_3 \cdot \tilde{\beta}_2 + \sqrt{s_3} \cdot \tilde{\beta}_3 \cdot \tilde{\alpha}_2 - \sqrt{\frac{s_2 \cdot s_3}{s_1}} \cdot \tilde{\beta}_3 \cdot \tilde{\beta}_2 \cdot \tilde{\beta}_1 \right) \cdot v_3 + \right. \\
& \left. + \sqrt{\frac{h_1 \cdot s_5}{s_1}} \cdot \tilde{\alpha}_1 - \sqrt{h_5} \cdot \tilde{\alpha}_3 + \sqrt{\frac{h_1 \cdot s_2 \cdot s_5}{s_1 \cdot s_4}} \cdot \tilde{\beta}_2 \cdot \tilde{\alpha}_1 - \sqrt{\frac{h_1 \cdot s_2}{s_1}} \cdot \tilde{\beta}_3 \cdot \tilde{\beta}_2 \cdot \tilde{\alpha}_1 \right] \cdot \tilde{O} \equiv 0;
\end{aligned} \tag{1.1.75}$$

Обратные альтернионные элементы к тем выражениям, которые нужно обращать при исключении неизвестных, находятся довольно легко: умножим данное выражение на такое же, но в котором изменены знаки у слагаемых, содержащих альтернионы некоторого контура. В результате произведение не будет содержать этих матриц. Продолжая этот процесс, можно исключить все альтернионы, получить некоторое скалярное выражение.

Найдя из уравнения (1.1.73) (после подстановки явных выражений для $\tilde{\alpha}_i$ и $\tilde{\beta}_j$) расход v_3 и соответствующий ему собственный вектор \tilde{O} , остальные характеристические уравнения можно не решать, а воспользоваться тем, что

$$v_5 = \tilde{O}^T \cdot A_5 \cdot \tilde{O}.$$

Соответственно

$$v_1 = \tilde{O}^T \cdot A_1 \cdot \tilde{O}$$

Если некоторые v_i не удовлетворяют требованиям [24], то в соответствующих ветвях надо изменить направление, а в (1.1.70) $\lambda_i \rightarrow i \cdot \lambda_i$ и внести это изменение в (1.1.73).

В заключение отметим одну существенную особенность альтернионного анализа. Система альтернионных уравнений может быть записана в виде

$$\Lambda \cdot v = h;$$

Где

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \alpha_1 \cdot \sqrt{s_1} & \alpha_2 \cdot \sqrt{s_3} & 0 \\ \left(\alpha_3 \cdot \sqrt{s_3} + \alpha_4 \cdot \sqrt{s_4} \right) & \left(-\alpha_3 \cdot \sqrt{s_2} - \alpha_4 \cdot \sqrt{s_4} + \beta_2 \cdot \sqrt{s_3} \right) & \alpha_4 \cdot \sqrt{s_4} \\ \beta_4 \cdot \sqrt{s_4} & -\beta_4 \cdot \sqrt{s_4} & \left(\beta_3 \cdot \sqrt{s_5} + \beta_4 \cdot \sqrt{s_4} \right) \end{pmatrix}; \tag{1.1.76}$$

$$v = \begin{pmatrix} v_1 \cdot \hat{O} \\ v_3 \cdot \hat{O} \\ v_5 \cdot \hat{O} \end{pmatrix}; \quad h = \begin{pmatrix} -\beta_1 \cdot \sqrt{h_1} \cdot \hat{O} \\ 0 \\ -\alpha_5 \cdot \sqrt{h_5} \cdot \hat{O} \end{pmatrix}. \quad (1.1.77)$$

Задача расчета сети состоит в обращении блочной матрицы Λ и последующем решении задач на собственные значения v_1 , v_2 и v_3 . Ясно, что в этом случае задача может решаться по частям. В системе (1.1.69) из-за невозможности исключить неизвестные v_i матрицу, соответствующую Λ , нельзя избавиться от расходов v_i и в ее обращении ничего полезного нет.

1.1.4 Свободные напоры и их влияние на разбалансированность в системах водоснабжения

Эксплуатация внутренних водопроводов в значительной степени зависит от колебания свободных напоров в наружной водопроводной сети, то есть избыточных напоров, отсчитываемых от отметки местности, где расположен объект водопотребления.

Арматура расположенная в нижних этажах здания имеет всегда завышенные напоры, вызывающие непроизводительные расходы – разбалансированность системы водоснабжения.

Разбалансированность в виде непроизводительного расхода образуется и при сливе воды с недостаточной температурой из системы горячего водоснабжения и при сбросе через смесительную арматуру при регулировке температуры и расхода горячей воды.

Стабилизация напоров достигается установкой регулятора давления прямого действия.

Поэтажная регулировка напоров производится дросселированием (диафрагмированием) непосредственно перед водоразборной арматурой.

1.1.5 Периоды начала и окончания отопительного периода и их влияние на разбалансированность систем теплоснабжения

В начале и в конце отопительного сезона температура наружного воздуха как правило больше нуля. При этом по применяемым температурным графикам отопительных систем температура в подающей линии на систему отопления должна быть менее 60 °С, а на систему горячего водоснабжения 70 °С. Таким образом, для обеспечения температуры

горячей воды применяется так называемая «срезка» температурного графика, то есть поддерживается постоянная температура в подающей линии. При этом на систему отопления также подаётся вода с температурой 70 °С, что вызывает «перетоп», есть передаётся потребителю завышенное количество тепла на отопление. Это тепловая разбалансированность системы теплоснабжения, которая вызывает значительный перерасход топлива.

1.1.6 Влияние качества транспортируемой воды на гидравлическое сопротивление трубопроводов и ее влияние на разбалансированность систем водоснабжения

Результаты анализа конкретных случаев эксплуатации тепловых и водопроводных сетей показывают, что в случае нормальной химической обработки воды (удаление растворённых газов, окислов железа, органических примесей и солей постоянной и временной жесткости) срок службы трубопроводов может быть более 40 лет, в противном случае 3-5 лет. Считается нормальной скоростью коррозии 0,0005 мм/год [12].

При толщине стенки трубы 5-12 мм труба полностью корродирует за 10-24 года.

Коррозия внутренней поверхности трубопровода приводит к увеличению абсолютной шероховатости, образованию отложений и к снижению пропускной способности трубопроводов в процессе их эксплуатации до 50% от расчётной.

По данным [12] изменение шероховатости можно оценить по формуле:

$$\Delta_t = \Delta_0 + \delta \cdot t \quad (1.1.78)$$

где:

Δ_0 - абсолютная шероховатость в начале эксплуатации для новых труб (0,5 мм для стальных труб) мм;

Δ_t - через t лет эксплуатации, мм;

δ - ежегодный прирост абсолютной шероховатости, мм в год, зависящий от физико-химических свойств подаваемой по ним воды.

Пропускная способность трубопровода в зависимости от срока службы может быть выражена по формуле [12]:

$$Q_t = Q_p \cdot (1 - 0.01 \cdot n \cdot t^m) \quad (1.1.79)$$

«По А.Г. Камерштейну, природные воды разбиваются на пять групп, каждая из которых определяет характер и интенсивность снижения пропускной способности трубопровода:

группа 1 – слабоминерализованные некоррозионные воды с показателем стабильности от $-0,2$ до $+0,2$; вода с незначительным содержанием органических веществ и растворённого железа; $\delta = 0,005 \div 0,055$ (в среднем $0,25$); $n = 4,4 \div 2,3$; $m = 0,5$;

группа 11 – слабоминерализованные коррозионные воды с показателем стабильности до $-1,0$; воды, содержащие органические вещества и растворённое железо в количестве, меньшем 3 г/м^3 ; $\delta = 0,055 \div 0,18$ ($0,07$); $n = 6,4 \div 2,3$; $m = 0,5$;

группа 111 – весьма коррозионные воды с показателем стабильности от $-1,0$ до $2,5$, но с малым содержанием хлоридов и сульфатов (меньше $100\text{-}150 \text{ г/м}^3$); воды с содержанием железа больше 3 г/м^3 ; $\delta = 0,18 \div 0,40$ ($0,20$); $n = 11,6 \div 6,4$; $m = 0,4 \div 0,5$;

группа 1У – коррозионные воды с отрицательным показателем стабильности, но с большим содержанием сульфатов и хлоридов (больше $500\text{-}700 \text{ г/м}^3$); необработанные воды с большим содержанием органических веществ; $\delta = 0,4 \div 0,6$ ($0,51$); $n = 18 \div 11,6$; $m = 0,35 \div 0,40$;

группа У – воды, характеризующиеся значительной карбонатной и малой постоянной плотностью с показателем стабильности более $0,8$; сильноминерализованные и коррозионные воды с плотным остатком более 2000 г/м^3 ; $\delta = 0,6 \div 3,0$; $n = 32 \div 18$; $m = 0,25 \div 0,35$. Здесь первые значения n и m относятся к трубопроводам диаметром $150\text{-}300 \text{ мм}$, а вторые к $d = 400 \div 600 \text{ мм}$.

1.1.7 Влияние тепловых потерь и снижения температуры сетевой воды у удалённых потребителей на разбалансированность систем теплоснабжения

Тепловые потери неизбежны при транспорте горячей воды по трубопроводам тепловых сетей. При нормальной эксплуатации и своевременным ремонтными работами и замене изоляции потери тепловой энергии можно оценивать по падению температуры сетевой воды в подающем трубопроводе. Приблизительно можно считать нормальным падение температуры $0,5\text{-}1 \text{ }^\circ\text{C/км}$. Фактически тепловые потери часто завышены вследствие старения, намокания, разрушения как самой изоляции, так и её покрытия. При этом потребители получают сетевую воду с температурой ниже, чем по утверждённому графику. Это приводит к уменьшению количества тепла потребителям.

На практике, в течение отопительного сезона, проводится эпизодическая наладочная работа по применению местного количественного регулирования. Это в свою очередь приводит к увеличению расхода в магистральных участках и к увеличению потерь напора, то есть к ухудшению параметров для остальных потребителей.

Наблюдается как гидравлическая, так и тепловая разбалансированность.

1.1.8 Применение компьютерных программ для выполнения требований «Правил технической эксплуатации тепловых электростанций» по расчётам режимов работы тепловых сетей

Документом, необходимым к применению, являются «Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. РД 34.20.501-95. 15-е издание, переработанное и дополненное. (Внесены Изменения и Дополнения, утвержденные заместителем Министра топлива и энергетики Российской Федерации от 11.02.2000 г.) [16], в котором указано: «4.12.37. Гидравлические режимы водяных тепловых сетей должны разрабатываться ежегодно для отопительного и летнего периодов; для открытых систем теплоснабжения в отопительный период режимы должны разрабатываться при максимальном водоразборе из подающего и обратного трубопроводов и при отсутствии водоразбора».

Указанные требования Правил совершенно справедливы и обязательны при разработке тепловых и гидравлических режимов на предстоящий отопительный период. Однако даже для небольшой тупиковой тепловой сети разработка этих режимов требует высокой квалификации исполнителей и наличие современного программного обеспечения. На практике до настоящего времени разработка гидравлических и тепловых режимов на указанные в Правилах случаи не выполняется. При этом в отопительном сезоне либо проводится выборочная доналадка по требованиям потребителей с наихудшими параметрами теплоснабжения, либо сеть работает весь отопительный сезон с тепловой и гидравлической разбалансировкой.

В настоящее время разработаны программные продукты «ZULU», «ПОТОК», «БЕРНУЛЛИ», которые выполняют теплогидравлические расчёты кольцевых сетей любой сложности и размера на наладочный и поверочный (эксплуатационный) режимы. Тем самым возможно выполнение требований Правил по разработке гидравлических режимов.

Кроме того, указанные программы выполнены в виде геоинформационных систем, то есть расчёт выполняется в соответствии с введённой схемой и позволяет наглядно

представлять как результаты расчёта, так и исходные данные, то есть выполнять паспортизацию сетей.

1.2 Разработка методики проведения идентификации систем тепло- и водоснабжения

Задачи, связанные с анализом работы реальных водяных тепловых сетей и управлением их эксплуатацией и развитием, решаются в условиях той или иной неопределенности. Факторы неопределенности существенно влияют на процесс принятия решений, а также на сами решения и их фактическое последствие.

Незнание истинных параметров и топологии тепловой сети, недостаточная оснащенность измерительными приборами и датчиками, большая погрешность и неоднородность тех данных, которые удастся получить, приближенность математического моделирования и т.д. – вот те факторы, из которых складывается неопределенность при управлении эксплуатацией.

Эта неопределенность может быть существенно уменьшена при проведении детальной и грамотной паспортизации всех объектов и трубопроводов сети.

Хотя паспортизация является рекомендованным [17] видом деятельности организации, эксплуатирующей тепловую сеть, сбор и ввод информации осуществляется только при наличии воли руководства. Процесс паспортизации – процесс продолжительный и постоянный: тепловые сети и ремонтируются, и реконструируются, и модернизируются, и развиваются. Паспорт любого объекта, будучи только что заполненным, уже требует внесения изменений.

Последовательность проведения паспортизации не регламентирована, поэтому ее, к сожалению, начинают не с топологии сети, а с отдельных объектов (абонентских вводов, трубопроводов, запорной арматуры и т.д.), не представляя до конца, как вся собранная информация будет между собой стыковаться. В результате информации много, а тепловую сеть, как единое целое, как систему, представить не удастся.

Идентификация – процесс приближенного отображения (отождествления) функционирующей системы в виде математической модели, способной замещать реальный объект в процессе его анализа и принятия решений. Идентификация – обязательный этап управления и неизбежно проходит в условиях неопределенности.

Математическое моделирование всегда является приближенным, и степень его точности должна согласовываться с целями исследования и управления, количеством и качеством исходных данных. Но в любой задаче существуют факторы, пренебрежение которыми недопустимо.

Принято рассматривать движение теплоносителя как одномерное, усредняя по сечению трубы скорость, плотность, давление и температуру.

Используя классификацию гидравлических цепей [18], тепловые сети следует характеризовать как сети с переменными параметрами. В частном случае при отсутствии насосных станций, регуляторов расходов и давлений и упрощенном моделировании источников, при котором полагается независимость располагаемого напора от расхода, тепловые сети переходят в категорию цепей с сосредоточенными параметрами.

1.2.1 Математическая модель неизотермического потокораспределения в тепловых водяных сетях

Полная математическая модель установившегося неизотермического распределения потоков в тепловой сети строится на законах Кирхгофа, представляющих собой математическую запись физических законов сохранения массы (1.2.1) и энергии (1.2.2), замыкающих соотношениях (1.2.3), (1.2.4), связывающих расход и потери напора на участке, и уравнений теплового баланса в узлах (1.2.5), (1.2.6):

$$A \cdot \bar{x} = \bar{G} \quad (1.2.1)$$

$$B \cdot \bar{y} = 0 \quad (1.2.2)$$

$$\bar{y} + \bar{H} = S \cdot |x| \cdot \bar{x} \quad (1.2.3)$$

$$\bar{y} = A^T \cdot \bar{P} \quad (1.2.4)$$

$$A_1 \cdot C(0) \cdot \bar{t}(0) + A_2 \cdot C(L) \cdot \bar{t}(L) = \bar{\Theta} \quad (1.2.5)$$

$$\bar{t}(0) = A_1^T \cdot \bar{T} \quad (1.2.6)$$

где:

$A = \{a_{ij}\}$ – полная $n \times m$ матрица соединений узлов и ветвей, которая однозначно описывает структуру схемы сети и ориентацию ее ветвей; здесь $a_{ij} = 1$, если узел I является начальным, $a_{ij} = -1$, если узел I является конечным, $a_{ij} = 0$, когда узел I не принадлежит ветви j ;

$\bar{x} = \{x_j\}$ – вектор расходов на участках, т/ч;

$\bar{G} = \{G_i\}$ – вектор суммарных расходов в узлах, т/ч;

$B = \{b_{rj}\}$ – матрица главных контуров, $b_{rj} = 1$, если ветвь j принадлежит контуру r и ее ориентация совпадает с направлением обхода контура, $b_{rj} = -1$, когда ориентация,

входящей в контур r ветви j противоположна направлению его обхода, $b_{rj} = 0$, если ветвь j не принадлежит контуру r ;

$\bar{y} = \{y_j\}$ - вектор перепадов давлений на участках, m ;

$\bar{H} = \{H_j\}$ - вектор действующих напоров на участках, m , аппроксимируемых за-

висимостью вида:

$$H_j = H_j^o + s_j^* \cdot x_j^2 \quad (1.2.7)$$

где:

S – диагональная матрица порядка m , составленная из величин s_j , $m/(г/ч)^2$

для ветвей, моделирующих трубопроводы:

$$s_j = \frac{10^{12}}{2g(0,9\pi)^2 \rho_j^2} \cdot \frac{1}{d_j^4} \left(1000l_j \frac{\lambda_j}{d_j} + \sum \xi \right) \quad (1.2.8)$$

$\rho_j, l_j, d_j, \lambda_j, \sum \xi$ - параметры участка j , соответственно: плотность теплоносителя, $кг/м^3$, длина, $м$, внутренний диаметр, $мм$, коэффициент гидравлического трения, сумма коэффициентов местных сопротивлений;

В общем виде коэффициент гидравлического трения λ является функцией 3 параметров – числа Рейнольдса Re , эквивалентной шероховатости $K_{экв}$ и внутреннего диаметра d , причем вид функции определяется режимом течения. В излагаемом материале использовалась формула (1.2.9), представленная в [19]:

$$\lambda_j = \frac{1}{\left(1,14 + 2 \cdot \lg \frac{d_j}{K_{\hat{e}a_j}} \right)^2} \quad (1.2.9)$$

где:

$K_{\hat{e}a_j}$ - эквивалентная шероховатость, $мм$;

Для ветвей, моделирующих абонентские вводы:

$$s_j = \frac{\Delta P_j^{\text{дв}}}{(G_j^{\text{дв}})^2} \quad (1.2.10)$$

где:

$\Delta P_j^{\delta\lambda\bar{n}^-}, G_j^{\delta\lambda\bar{n}^-}$ - расчетные суммарные потери давления при расчетном расходе, м, и расчетный расход, т/ч;

Формула (1.2.10) является частным случаем, справедливым для непосредственного присоединения систем отопления и при отсутствии нагрузки на вентиляцию и ГВС. Моделирование абонентских вводов со всеми видами нагрузок и разными схемами присоединения на данном этапе не рассматривается.

$|X|$ - диагональная матрица порядка m , составленная из величин $|x_j|^{\beta-1}$;

β – заданный показатель степени, принимаемый для тепловых сетей равным 2;

$\bar{P} = \{P_i\}$ - вектор узловых давлений, м.

A_1, A_2 - матрицы ориентирования ветвей, получаемые из матрицы A заменой всех элементов, равных соответственно (-1) или (+1) нулями, они фиксируют все начальные или конечные узлы ветвей и связаны соотношением:

$$A_1 + A_2 = A \quad (1.2.11)$$

$C(0)$ - диагональная матрица порядка m , составленная из значений cx_j ;

$C(L)$ - диагональная матрица порядка m , составленная из значений cx_j ;

c – удельная теплоемкость, ккал/(кг С);

$\bar{T} = \{T_i\}$ - вектор узловых температур, С;

$\bar{t}(0) = \{t_j(0)\}, \bar{t}(L) = \{t_j(l_j)\}$ - вектор граничных температур для ветвей, моделирующих участки;

$$t_j(l_j) = t_{i\delta\delta_j} + \left(t_{i\delta\delta_j} - t_j \cdot (0) \right) e^{-\frac{k_j \cdot F_j}{1000c \cdot x_j}} \quad (1.2.12)$$

где:

$t_{i\delta\delta_j}$ - температура окружающей среды, принимаемая равной:

- температуре наружного воздуха для наземной прокладки $t_{\hat{t}}$, С;
- температуре грунта для подземной прокладки $t_{\hat{a}}$, С;
- температуре внутреннего воздуха для подвальной прокладки $t_{\hat{a}}$, С;

k_j - коэффициент теплопередачи стенок и изоляции трубопровода, ккал/(ч м² С);

F_j - площадь наружной поверхности трубопровода, м²;

На данном этапе выполнения работы произведение $k_j F_j$ находится по нормативным тепловым потерям трубопровода:

$$k_j \cdot F_j = \frac{Q_j^{\dot{i} \delta i}}{t_{\delta}^{\bar{n} \delta \bar{a}} - t_{i \delta \delta}^{\bar{n} \delta \bar{a}}} \quad (1.2.13)$$

Правила определения нормативных тепловых потерь $Q_j^{\dot{i} \delta i}$, ккал/ч, среднегодовых температур теплоносителя $t_{\delta}^{\bar{n} \delta \bar{a}}$ и окружающей среды $t_{i \delta \delta}^{\bar{n} \delta \bar{a}}$ описаны в [19].

$\bar{\Theta} = \{\theta_i\}$ - вектор узловых расходов тепла, состоящий из величин $c_i \dot{t}_i G_i$ для узлов, в которых имеет место приток теплоносителя с заданными температурой t_i и теплоемкостью c_i , и из $c_i T_i G_i$ - в случае потребителей с нагрузками G_i , а также температурами T_i и теплоемкостями c_i , подлежащими определению в результате расчета.

Для непосредственной схемы присоединения систем отопления без регуляторов расхода и при отсутствии нагрузки на системы вентиляции и ГВС температура теплоносителя, возвращаемого в сеть, $t_j(l_j)$, может быть определена в результате решения нелинейного уравнения:

$$A_{i \delta} \left[\frac{t_j(0) + t_j(l_j)}{2} - t_i - \frac{\tilde{n} \cdot x_j \cdot (t_j(0) - t_j(l_j))}{A_{\zeta \ddot{a}}} \right]^{1.2} - \tilde{n} \cdot x_j \cdot (t_j(0) - t_j(l_j)) = 0 \quad (1.2.14)$$

$$A_{i \delta} = \frac{Q^{\delta \dot{a} \bar{n} \delta}}{\left(\frac{T_1^{\delta \dot{a} \bar{n} \delta} + T_2^{\delta \dot{a} \bar{n} \delta}}{2} - t_a^{\delta \dot{a} \bar{n} \delta} \right)^{1.2}} \quad (1.2.15)$$

$$A_{\zeta \ddot{a}} = \frac{Q^{\delta \dot{a} \bar{n} \delta}}{\left(t_i^{\delta \dot{a} \bar{n} \delta} - t_a^{\delta \dot{a} \bar{n} \delta} \right)} \quad (1.2.16)$$

где:

$Q^{расч}$, $t_H^{расч}$, $t_B^{расч}$, $T_I^{расч}$, $T_2^{расч}$ – соответственно расчетные нагрузка системы отопления, температура наружного и внутреннего воздуха, температура теплоносителя в подающем и обратном трубопроводе, определяемая по температурному графику в точке с расчетной температурой наружного воздуха;

x_j – расход теплоносителя на участке j , моделирующем систему отопления абонента.

1.2.2 Оценка погрешности определения коэффициента гидравлического сопротивления

Проблему идентификации можно рассматривать с разных позиций. Так, например, в [18], был предложен метод “математического расходомера”, позволявший найти оценку эквивалентной шероховатости трубопроводов. Для реализации метода требовалась многократная манометрическая съемка во всех узлах сети и замеры расхода у отдельных потребителей. При этом об ошибке измерений давлений и расходов не упоминается.

Другой подход [20], использованный для идентификации параметров систем холодного водоснабжения, учитывает погрешность измерений давлений в узлах сети и расходов на участках.

В обоих случаях считаются достоверно известными топология сети, параметры участков (длина, внутренний диаметр, сумма коэффициентов местных сопротивлений).

Все параметры, от которых зависят гидравлические сопротивления (1.2.8), (1.2.10), задаются с некоторой погрешностью. Оценим значимость погрешности каждого параметра в ошибке определения s_j ,

Так как функция (1.2.8) является нелинейной по ряду параметров, ее необходимо линеаризовать [21]:

$$\begin{aligned}
 s(l, d, \Sigma\xi, K, \rho) \approx & s(l^0, d^0, \Sigma\xi^0, K_{y\hat{e}\hat{a}}^0, \rho^0) + \\
 & + \frac{\partial s(l^0, d^0, \Sigma\xi^0, K_{y\hat{e}\hat{a}}^0, \rho^0)}{\partial l} (l - l^0) + \frac{\partial s(l^0, d^0, \Sigma\xi^0, K_{y\hat{e}\hat{a}}^0, \rho^0)}{\partial d} (d - d^0) + \\
 & + \frac{\partial s(l^0, d^0, \Sigma\xi^0, K_{y\hat{e}\hat{a}}^0, \rho^0)}{\partial \Sigma\xi} (\Sigma\xi - \Sigma\xi^0) + \frac{\partial s(l^0, d^0, \Sigma\xi^0, K_{y\hat{e}\hat{a}}^0, \rho^0)}{\partial K_{y\hat{e}\hat{a}}} (K_{y\hat{e}\hat{a}} - K_{y\hat{e}\hat{a}}^0) + \\
 & + \frac{\partial s(l^0, d^0, \Sigma\xi^0, K_{y\hat{e}\hat{a}}^0, \rho^0)}{\partial \rho} (\rho - \rho^0)
 \end{aligned} \tag{1.2.17}$$

где:

$$\frac{\partial s}{\partial l} = \frac{10^{15}}{2 \cdot g(0,9\pi)^2 \rho^2} \cdot \frac{\lambda}{d^5} \tag{1.2.18}$$

$$\frac{\partial s}{\partial \Sigma\xi} = \frac{10^{12}}{2g \cdot (0,9\pi)^2 \rho^2 d^4} \tag{1.2.19}$$

$$\frac{\partial s}{\partial \rho} = -\frac{10^{12}}{g \cdot (0,9\pi)^2 \cdot \rho^3} \cdot \frac{1}{d^4} \left(1000 \cdot l \cdot \frac{\lambda}{d} + \Sigma \xi \right) \quad (1.2.20)$$

$$\frac{\partial s}{\partial K_{\dot{y}\dot{e}\dot{a}}} = \frac{2 \cdot 10^{15} l}{g \cdot (0,9\pi)^2 \cdot \rho^2 \cdot d^5 \cdot K_{\dot{y}\dot{e}\dot{a}} \ln(10) \left(1,14 + 2 \cdot \lg \left(\frac{d}{K_{\dot{y}\dot{e}\dot{a}}} \right) \right)^3} \quad (1.2.21)$$

$$\frac{\partial s}{\partial d} = -\frac{10^{12}}{2g \cdot (0,9\pi)^2 \cdot \rho^2 \cdot d^5} \cdot \frac{1}{\left\{ \begin{array}{l} \left[\frac{1000 \cdot l_j}{d \left(1,14 + 2 \lg \left(\frac{d}{K_{\dot{y}\dot{e}\dot{a}}} \right) \right)^2} \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{4}{\ln(10) \left(1,14 + 2 \lg \left(\frac{d}{K_{\dot{y}\dot{e}\dot{a}}} \right) \right)} + 5 \right] + 4 \cdot \Sigma \xi \right\}} \quad (1.2.22)$$

Дисперсия, вычисленная для линеаризованного выражения, является приближенной и применима лишь в малой окрестности выбранной точки, где функция заменяется линеаризованным выражением:

$$\begin{aligned} \sigma_s^2 \approx & \left[\frac{\partial s(l^0, d^0, \Sigma \xi^0, K_{\dot{y}\dot{e}\dot{a}}^0, \rho^0)}{\partial l} \right]^2 \sigma_l^2 + \left[\frac{\partial s(l^0, d^0, \Sigma \xi^0, K_{\dot{y}\dot{e}\dot{a}}^0, \rho^0)}{\partial d} \right]^2 \sigma_d^2 + \\ & + \left[\frac{\partial s(l^0, d^0, \Sigma \xi^0, K_{\dot{y}\dot{e}\dot{a}}^0, \rho^0)}{\partial \Sigma \xi} \right]^2 \sigma_{\Sigma \xi}^2 + \left[\frac{\partial s(l^0, d^0, \Sigma \xi^0, K_{\dot{y}\dot{e}\dot{a}}^0, \rho^0)}{\partial K_{\dot{y}\dot{e}\dot{a}}} \right]^2 \sigma_{\dot{E}_{\dot{y}\dot{e}\dot{a}}}^2 + \\ & + \left[\frac{\partial s(l^0, d^0, \Sigma \xi^0, K_{\dot{y}\dot{e}\dot{a}}^0, \rho^0)}{\partial \rho} \right]^2 \sigma_\rho^2 \end{aligned} \quad (1.2.23)$$

В общем случае параметры участка могут изменяться в широких диапазонах, представленных в табл. 1, при этом гидравлическое сопротивление меняется на 11 порядков от $1.87 \cdot 10^{-10}$ до 88.1 м/(т/ч)^2 .

Выбор диапазонов продиктован следующими соображениями. Наименьший условный диаметр, рекомендуемый для применения в тепловых сетях, составляет 40 мм, наибольший существующий - 1400 мм; наибольшее значение суммы коэффициентов местных сопротивлений (100) соответствует участку с диафрагмой или с частично закрытой задвижкой; минимальное значение эквивалентной шероховатости – регламентируе-

мому значению для новых труб, максимальное – трубе бывшей в эксплуатации, минимальное значение плотности определено для температуры теплоносителя 150 С, максимальное – для температуры 40 С.

Таблица 1.2.1 - Диапазоны изменения параметров участка

Параметр	Диапазон изменения		3 σ		
	Минимум	Максимум		10%	
Длина, l, м	1	10000	1	0.1	1
Внутренний диаметр d, мм	40	1400	10	4	140
Сумма коэффициентов местных сопротивлений	0.1	100	0.1	0.01	10
Эквивалентная шероховатость, $K_{э\text{кв}}$, мм	0.5	5	0.5	0.05	0.5
Плотность ρ , кг/м ³	904	992	44	90.4	99.2

Для решения поставленной задачи был спланирован и проведен численный эксперимент, план и результаты которого представлены в таблице 1.2.2.

Таблица 1.2.2 - Результаты численного эксперимента оценки влияния параметров на относительную погрешность гидравлического сопротивления

№	l	d	K _{экв}	ρ	Σζ	s	σ _s	σ _s /s	σ _s	σ _s /s
	м	мм	мм	кг/м ³		м/(т/ч) ²	м/(т/ч) ²	%	м/(т/ч) ²	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	40	0.5	904	0.1	3.42E-03	1.86E-03	54.4	6.48E-04	18.94
2	10000	40	0.5	904	0.1	3.11E+01	1.44E+01	46.2	6.03E+00	19.37
3	1	1400	0.5	904	0.1	2.26E-10	6.86E-11	30.4	3.51E-11	15.57
4	10000	1400	0.5	904	0.1	2.25E-07	1.80E-08	8.0	4.26E-08	18.93
5	1	40	5	904	0.1	9.08E-03	5.12E-03	56.4	1.81E-03	19.98
6	10000	40	5	904	0.1	8.78E+01	4.10E+01	46.7	1.77E+01	20.16
7	1	1400	5	904	0.1	2.43E-10	6.95E-11	28.6	3.84E-11	15.80
8	10000	1400	5	904	0.1	3.99E-07	1.44E-08	3.6	7.64E-08	19.16
9	1	40	0.5	992	0.1	2.84E-03	1.54E-03	54.3	5.38E-04	18.94
10	10000	40	0.5	992	0.1	2.59E+01	1.19E+01	46.2	5.01E+00	19.37
11	1	1400	0.5	992	0.1	1.87E-10	5.69E-11	30.4	2.92E-11	15.57
12	10000	1400	0.5	992	0.1	1.87E-07	1.47E-08	7.9	3.54E-08	18.93
13	1	40	5	992	0.1	7.54E-03	4.25E-03	56.4	1.51E-03	19.98
14	10000	40	5	992	0.1	7.29E+01	3.41E+01	46.7	1.47E+01	20.16
15	1	1400	5	992	0.1	2.02E-10	5.76E-11	28.6	3.19E-11	15.80
16	10000	1400	5	992	0.1	3.31E-07	1.11E-08	3.4	6.34E-08	19.16
17	1	40	0.5	904	100	3.08E-01	1.03E-01	33.6	4.71E-02	15.31
18	10000	40	0.5	904	100	3.14E+01	1.45E+01	46.1	6.08E+00	19.32
19	1	1400	0.5	904	100	2.03E-07	6.87E-09	3.4	3.10E-08	15.28
20	10000	1400	0.5	904	100	4.28E-07	2.18E-08	5.1	7.28E-08	17.01
21	1	40	5	904	100	3.14E-01	1.06E-01	33.9	4.82E-02	15.39
22	10000	40	5	904	100	8.81E+01	4.11E+01	46.7	1.77E+01	20.14
23	1	1400	5	904	100	2.03E-07	6.87E-09	3.4	3.10E-08	15.28
24	10000	1400	5	904	100	6.01E-07	2.11E-08	3.5	1.06E-07	17.68
25	1	40	0.5	992	100	2.56E-01	8.58E-02	33.6	3.91E-02	15.31
26	10000	40	0.5	992	100	2.61E+01	1.20E+01	46.1	5.05E+00	19.32
27	1	1400	0.5	992	100	1.69E-07	5.24E-09	3.1	2.58E-08	15.28
28	10000	1400	0.5	992	100	3.55E-07	1.75E-08	4.9	6.04E-08	17.01
29	1	40	5	992	100	2.60E-01	8.81E-02	33.8	4.01E-02	15.39
30	10000	40	5	992	100	7.31E+01	3.41E+01	46.7	1.47E+01	20.14
31	1	1400	5	992	100	1.69E-07	5.24E-09	3.1	2.58E-08	15.28
32	10000	1400	5	992	100	4.99E-07	1.62E-08	3.2	8.83E-08	17.68

Относительная погрешность меняется от 3.1 до 56.4 % (см. таблицу 1.2.2, столбец 9). Дисперсионный анализ, проведенный с помощью алгоритма Йетса [22], позволил ран-

жировать параметры по значимости их влияния на относительную ошибку определения гидравлического сопротивления следующим образом:

- Внутренний диаметр;
- Сумма коэффициентов местных сопротивлений;
- Длина.

Несмотря на заданную, достаточно большую погрешность эквивалентной шероховатости и плотности (см. таблицу 1.2.1), эти параметры не оказывают значимого влияния на относительную ошибку.

Поэтому можно считать вполне правомерным пренебрежение изменением плотности теплоносителя в зависимости от температуры и использование в гидравлических расчетах константы $\rho=1000 \text{ кг/м}^3$.

Если в численном эксперименте в качестве максимальной погрешности использовать 10% отклонение от текущего значения параметра (таблица 1.2.1), то диапазон изменения относительной погрешности уменьшится и составит 15.3 – 20.2% (таблица 1.2.2, столбец 11), при 5% отклонении диапазон уменьшится в 2 раза и составит 7.6 -10.1 %. При этом, по прежнему, эквивалентная шероховатость и плотность не оказывают значимого влияния. Остальные параметры по значимости распределяются следующим образом:

- Длина;
- Внутренний диаметр;
- Сумма коэффициентов местных сопротивлений.

1.2.3 Оценка погрешности параметров тепловой сети

Как было показано выше, можно оценить погрешность задания коэффициентов гидравлических сопротивлений каждого участка. Но связи между участками в каждой сети индивидуальны. Попытка классифицировать топологию сетей и затем вычислять погрешность совокупности участков на наш взгляд привела бы в тупик. Совокупная погрешность гидравлических сопротивлений участков сказывается на результатах численного моделирования потокораспределения в сети.

Первый вопрос, возникающий при идентификации объекта, это выбор параметров - откликов, по которым можно судить о том, что заложенные в расчет значения соответствуют данным объекта. Второй вопрос – реальность проведения одновременных замеров этих параметров.

В качестве параметров - откликов, характеризующих всю сеть целиком, можно предложить следующие:

- “гидромеханическая” мощность $-N_{\text{мех}}$:

$$N_{i \delta \delta} = H_{\delta \delta} \cdot G_{\delta \delta} = \sum_{j=1}^{m_{\delta \delta}} y_j \cdot x_j + \sum_{j=m_{\delta \delta}+1}^{m_{\delta \delta}+m_{ad}} y_j \cdot x_j \quad (1.2.24)$$

— “тепловая” мощность $-N_{men}$:

$$N_{\delta \delta} = \tilde{n} \cdot G_{\delta \delta} \cdot (T_1^{\delta \delta} - T_2^{\delta \delta}) = \sum_{j=1}^{m_{\delta \delta}} c \cdot x_j \cdot (t_j(0) - t_j(l_j)) + \sum_{j=m_{\delta \delta}+1}^{m_{\delta \delta}+m_{ad}} c \cdot x_j \cdot (t_j(0) - t_j(l_j)) \quad (1.2.25)$$

где:

H_{ucm} – располагаемый напор сети;

G_{ucm} – циркулирующий расход;

T_1^{ucm} – температура теплоносителя, на выходе из источника;

T_2^{ucm} – температура теплоносителя, на входе в источник;

m_{mp} – количество ветвей, моделирующих трубопроводы тепловой сети;

m_{ad} – количество ветвей, моделирующих абонентские вводы;

Не смотря на все еще слабую оснащенность тепловых сетей измерительными приборами, можно предположить, что на источниках теплоснабжения контролируются параметры, входящие в левую часть выражений (1.2.24) и (1.2.25). В любом случае их одновременное измерение представляется вполне выполнимой задачей.

При сопоставлении левой (“измеренной”) и правой (“вычисленной”) частей выражений (1.2.24) и (1.2.25) необходимо помнить о погрешности измерений “гидромеханической” и “тепловой” мощностей источника, которая зависит как от способа измерений, так и от погрешности измерительных приборов.

При идентификации параметров сети необходимо максимально использовать всю имеющуюся информацию о замерах параметров. Обычно замерные узлы устанавливают на абонентских вводах, поэтому в качестве сопоставляемых величин можно использовать замерные и вычисленные значения следующих параметров - откликов:

- напоры в подающем и обратном трубопроводах или располагаемый напор;
- температура теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах;
- расхода теплоносителя.

Важным параметром является температура “некого” внутреннего воздуха в отапливаемых зданиях, которую вычислить можно, а замерить нереально. Поэтому этот параметр переходит из категории количественных в категорию качественных, поскольку расхождение можно оценить, используя наличие или отсутствие жалоб жильцов.

Следует оговориться, что топология сети известна точно, т. е. известны не только основные магистрали и квартальные ответвления от них, но, что особенно важно, все пе-

ремычки между подающими и обратными трубопроводами, проверено наличие, состояние и положение запорной арматуры на них.

В качестве гипотезы можно утверждать, что некорректное задание топологии сети, не позволит, варьируя значения параметров, получить приемлемого совпадения замеров и результатов расчета. Но это только гипотеза, требующая отдельного рассмотрения.

Уточнение значений параметров сети возможно только одним способом – выходом “в поле”. Но оценить влияние погрешности в задании значений параметров можно, проведя численный эксперимент. Не менее важно, на наш взгляд, определить последовательность уточнения значений параметров.

Для решения поставленной задачи был проведен численный эксперимент. В качестве объекта была выбрана тепловая сети, представленная на рисунке 1.2.1. Сеть состоит из 1 источника, 9 участков и 5 абонентов. Длины, диаметры, суммы коэффициентов местных сопротивлений участков различны. Тепловая нагрузка абонентов различна. Значения этих параметров вынесены на рисунке 1.2.1.

Предполагалось, что:

- расчетная температура наружного воздуха равна $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- текущая температура наружного воздуха совпадает с расчетной;
- температурный график источника 140/70;
- располагаемый напор источника равен $80-40=40$ м и постоянен;
- среднегодовые температуры наружного воздуха, теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах составляют соответственно 3.8, 79.1 и $53.7\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- все участки имеют надземную прокладку;
- коэффициент теплопередачи тепловой изоляции трубопроводов соответствует нормативным тепловым потерям трубопроводов, запроектированным до 1980 г.;
- коэффициент эквивалентной шероховатости всех участков одинаковый;
- все абоненты имеют тепловую нагрузку только на системы отопления, которые подключены непосредственно к тепловой сети;
- расчетные потери напора при расчетном расходе теплоносителя в каждой системе отопления составляют 2 м;
- расчетная температура внутреннего воздуха равна $18\text{ }^{\circ}\text{C}$;

В качестве факторов, погрешность в задании которых, влияет на погрешность сопоставляемых параметров - откликов, перечисленных выше, были выбраны:

- Длины участков - l;
- Внутренние диаметры участков - d;

- Эквивалентная шероховатость - k ;
- Суммы коэффициентов местных сопротивлений – s ;
- Тепловая нагрузка абонентов – q .

В качестве реперной точки, по отношению к которой определялись погрешности значений параметров – откликов, были выбраны результаты численного моделирования неизотермического потокораспределения в тепловой сети (таблица 1.2.3, таблица 1.2.4, таблица 1.2.5 , вариант 0).

Был спланирован полный 2-уровневый 5-факторный эксперимент, состоящий из 32 вариантов расчета. В каждом варианте моделировалось потокораспределение в той же тепловой сети, но в выбранные параметры – факторы вносилась погрешность, одинаковая для всех факторов. Столбцы 3- 7 содержат значение уровня фактора. Значение уровня (-1) соответствует нижнему уровню, значение (1) – верхнему.

Например, в варианте 14 были увеличены:

- длина каждого участка l_j на величину $0.01s_p l_j$ (s_p - заданная погрешность, %),
- коэффициент эквивалентной шероховатости $K_{э\kappa\text{в}}$ на $0.01s_p K_{э\kappa\text{в}}$;
- сумма коэффициентов местных сопротивлений каждого участка j $\Sigma\zeta$ на $0.01s_p \Sigma\zeta$,

и уменьшены:

- диаметр участка d_j на $0.01s_p d_j$;
- нагрузка каждого абонента $Q_{абj}$ на $0.01s_p Q_{абj}$.

В таблицах 1.2.3, 1.2.4 и 1.2.5 представлены результаты моделирования для 3 вариантов расчета 14, 17, 19 (см.таблицу 1.2.5) , для которых были выявлены наибольшие относительные погрешности $N_{\text{мех}}$ (таблица 1.2.5) и для 2 значений погрешностей – 3 и 30 %. Те же результаты представлены в виде пьезометрического графика (рисунок 1.2.2) и графика распределения температуры теплоносителя (рисунок 1.2.3) от источника до “контролируемого” абонента М/р 5.

Для каждого значения погрешности проводился дисперсионный анализ, в результате которого определялась значимость фактора (таблица 1.2.6).

Формально полагалось, что все взаимодействия (2, 3, 4 и 5 факторов) равны 0. В столбце “Отношение средних квадратов” содержится отношение квадрата среднего эффекта фактора к сумме квадратов эффектов взаимодействий всех уровней.

Уровни значимости маркированы «*» (см. таблицу 1.2.6, столбец “Значимость”). Используются следующие условные обозначения [22]:

«*» -уровень значимости от 0.01 до 0.05 – значимый уровень;

«**» -уровень значимости от 0.001 до 0.01 – высокосзначимый уровень;

«***» -уровень значимости от 0.0001 до 0.001 – в высшей степени значимый уровень.

Результаты дисперсионного анализа позволяют сделать следующие выводы:

В рамках использованной математической модели для рассматриваемой сети с учетом ее параметров на погрешности значений всех выбранных параметров – откликов самое сильное влияние оказывает погрешность в задании диаметра участков (в высшей степени значимый уровень) и расчетной нагрузка абонентов (в высшей степени значимый уровень для всех откликов, за исключением температуры внутреннего воздуха).

Погрешность в задании суммы коэффициентов местных сопротивлений не оказывает значимого влияния ни на один выбранный показатель.

Погрешность в задании эквивалентной шероховатости не оказывает значимого влияния на погрешность “тепловой” мощности сети, на другие параметры – отклики, значимость его погрешности вырастает по мере уточнения других параметров. Первой откликается погрешность располагаемого напора “контролируемого” абонента (15% погрешность задания параметров). Все остальные отклики начинают считать значимой погрешность в задании эквивалентной шероховатости при 5% погрешности задания остальных параметров.

Погрешность в задании длин участков в высшей степени значимо влияет на погрешности “тепловой” мощности сети, располагаемого перепада и температуры внутреннего воздуха у “контролируемого” абонента.). Все остальные отклики начинают считать значимой погрешность в задании длины участков при 20% погрешности задания остальных параметров.

Для погрешностей всех откликов прослеживается тенденция к увеличению при увеличении погрешности задания параметров (рисунок 1.2.4, рисунок 1.2.5, рисунок 1.2.6, рисунок 1.2.7, рисунок 1.2.8, рисунок 1.2.9).

Из рисунков 1.2.2 и 1.2.3 видно, как “накапливается” ошибка по длине трассы, особенно сильно отклонение от реперной кривой видно на распределение температур в обратном трубопроводе. Поэтому, если существует возможность измерять, “гидромеханическую” и “тепловую” мощность не только на источнике, но и в узлах сети, то появляется возможность “сузить” круг поиска.

Все выше изложенное позволяет сделать предварительные выводы о последовательности уточнения параметров тепловой сети:

1. топология;
2. диаметры участков;
3. тепловая нагрузка абонентов;
4. длины участков
5. эквивалентная шероховатость
6. местные сопротивления.

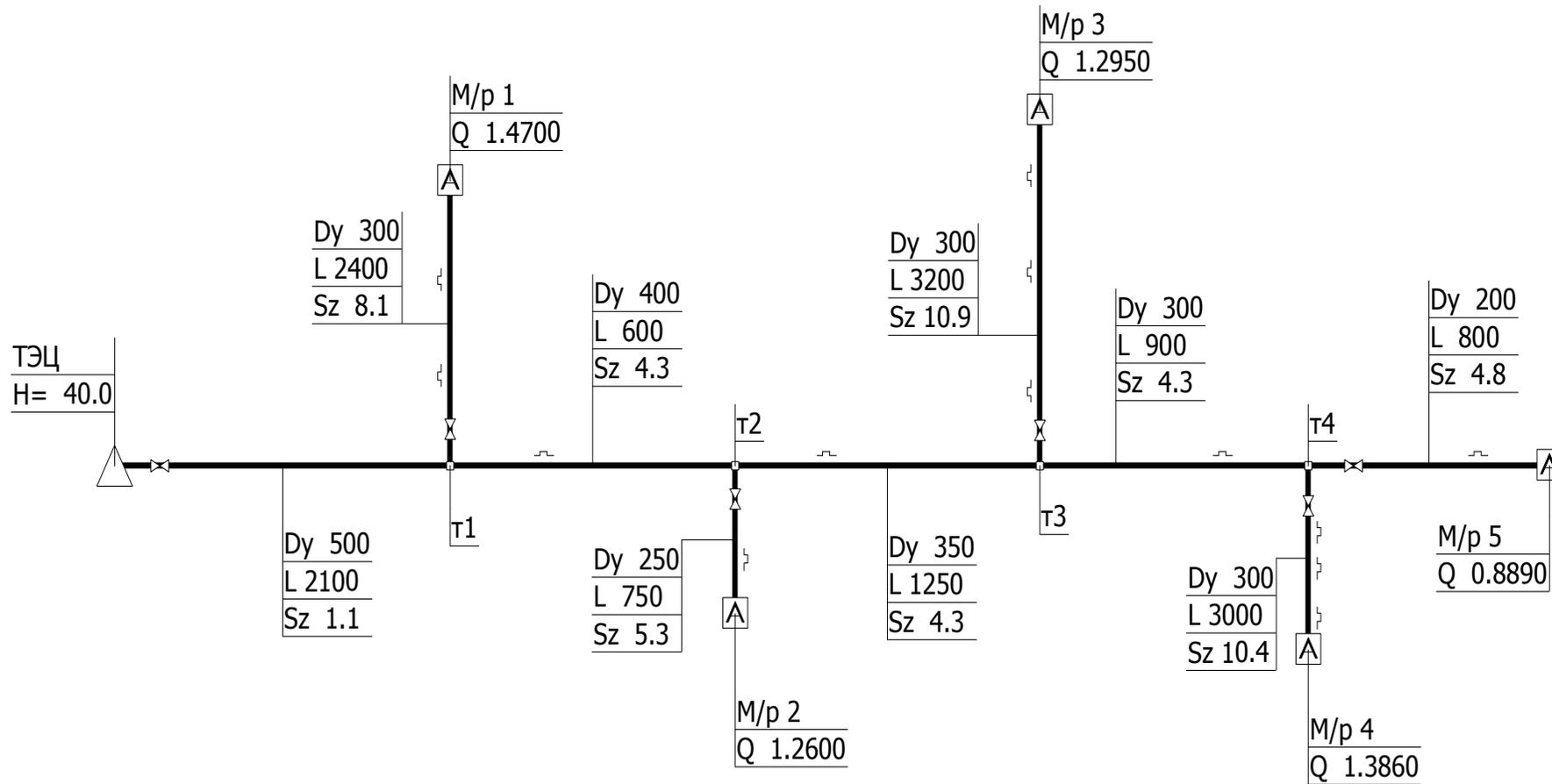


Рисунок 1.2.1 - Схема тепловой сети

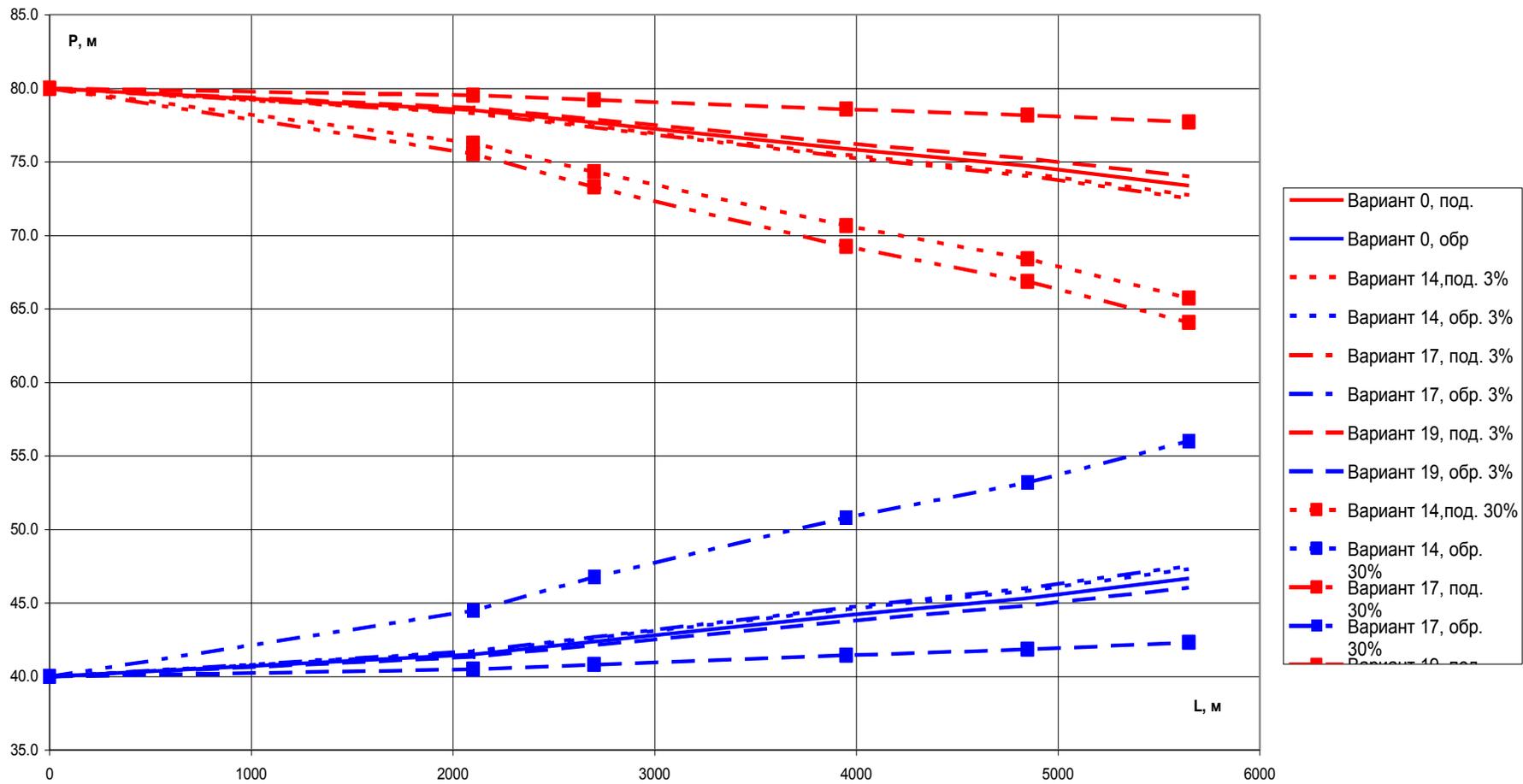


Рисунок 1.2.2 - Пьезометрический график ТЭЦ-М/р 5
57

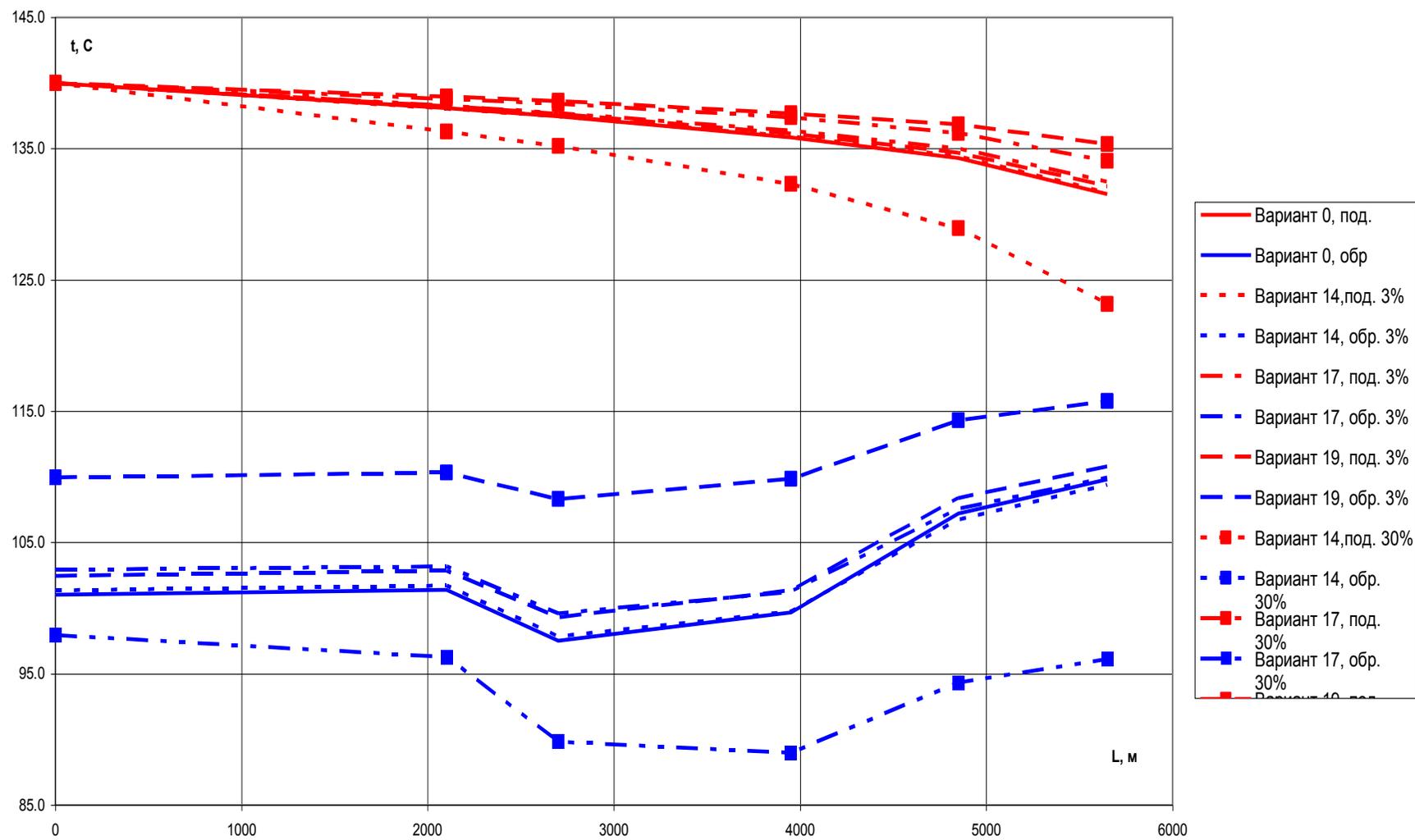


Рисунок 1.2.3 - Распределение температуры по длине трассы ТЭЦ – М/р 5

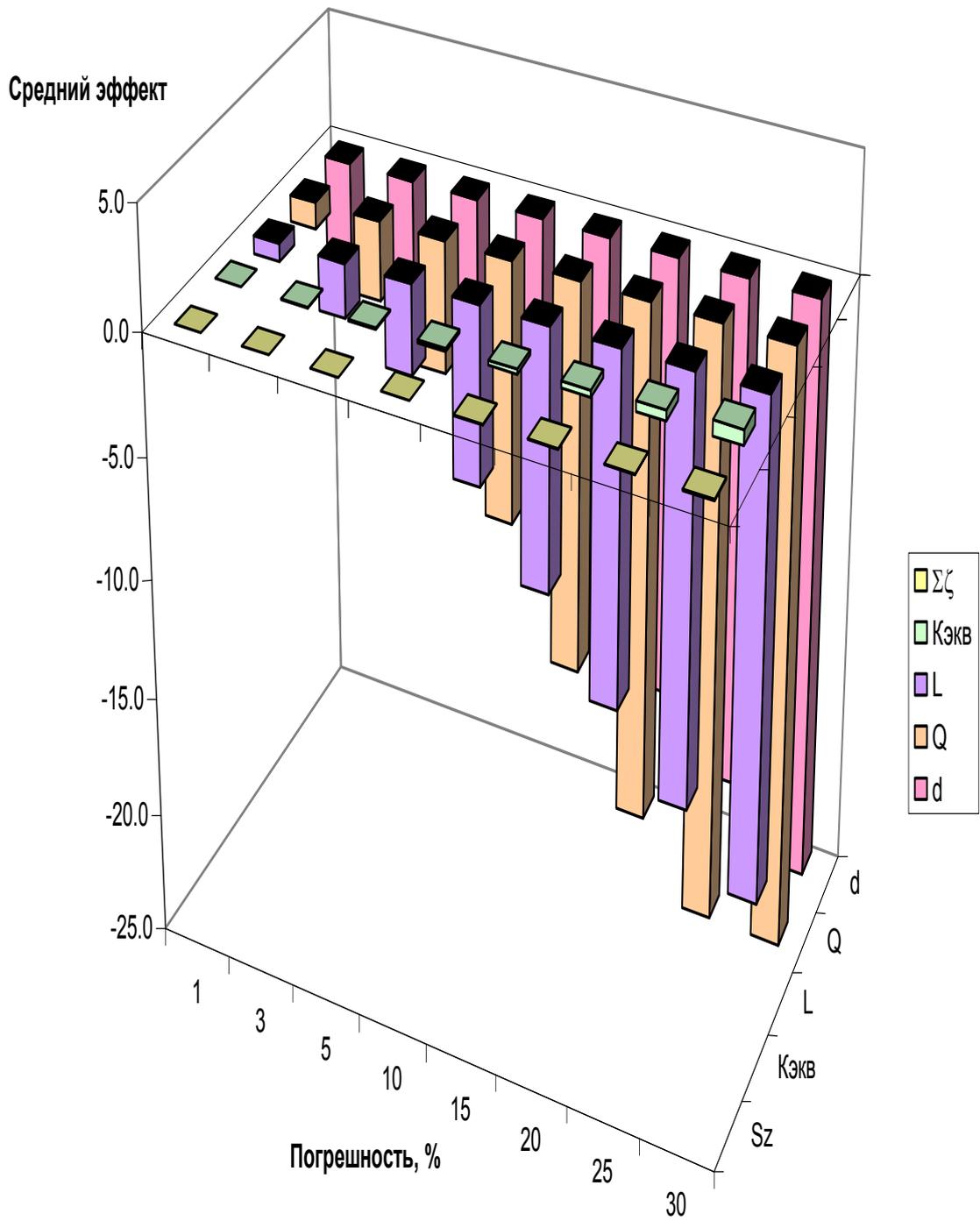


Рисунок 1.2.4 - Влияние средних эффектов факторов на погрешность “гидромеханической” мощности

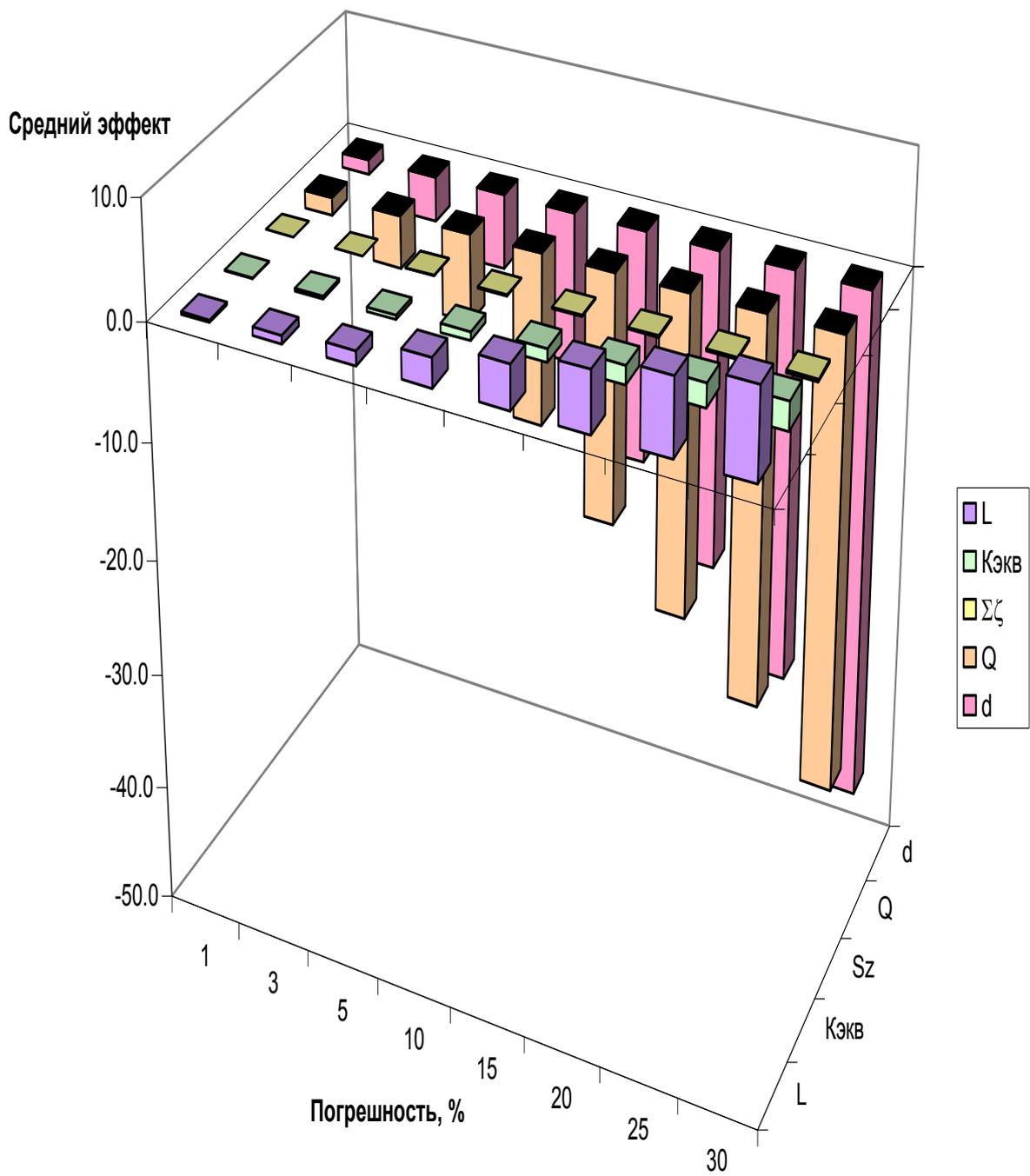


Рисунок 1.2.5 - Влияние средних эффектов факторов на погрешность “тепловой” мощности

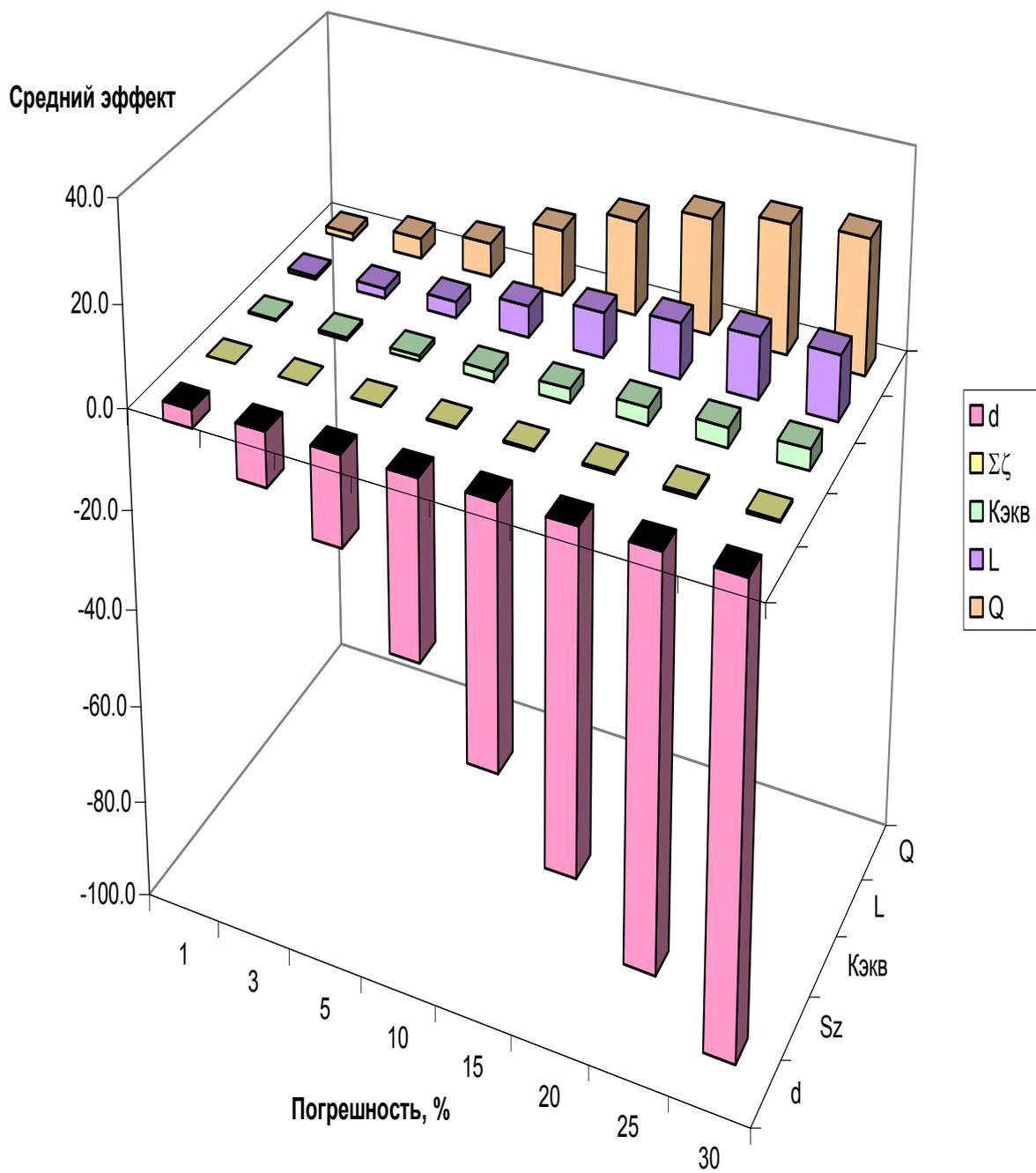


Рисунок 1.2.6 - Влияние средних эффектов факторов на погрешность располагаемого перепада у “контролируемого” абонента

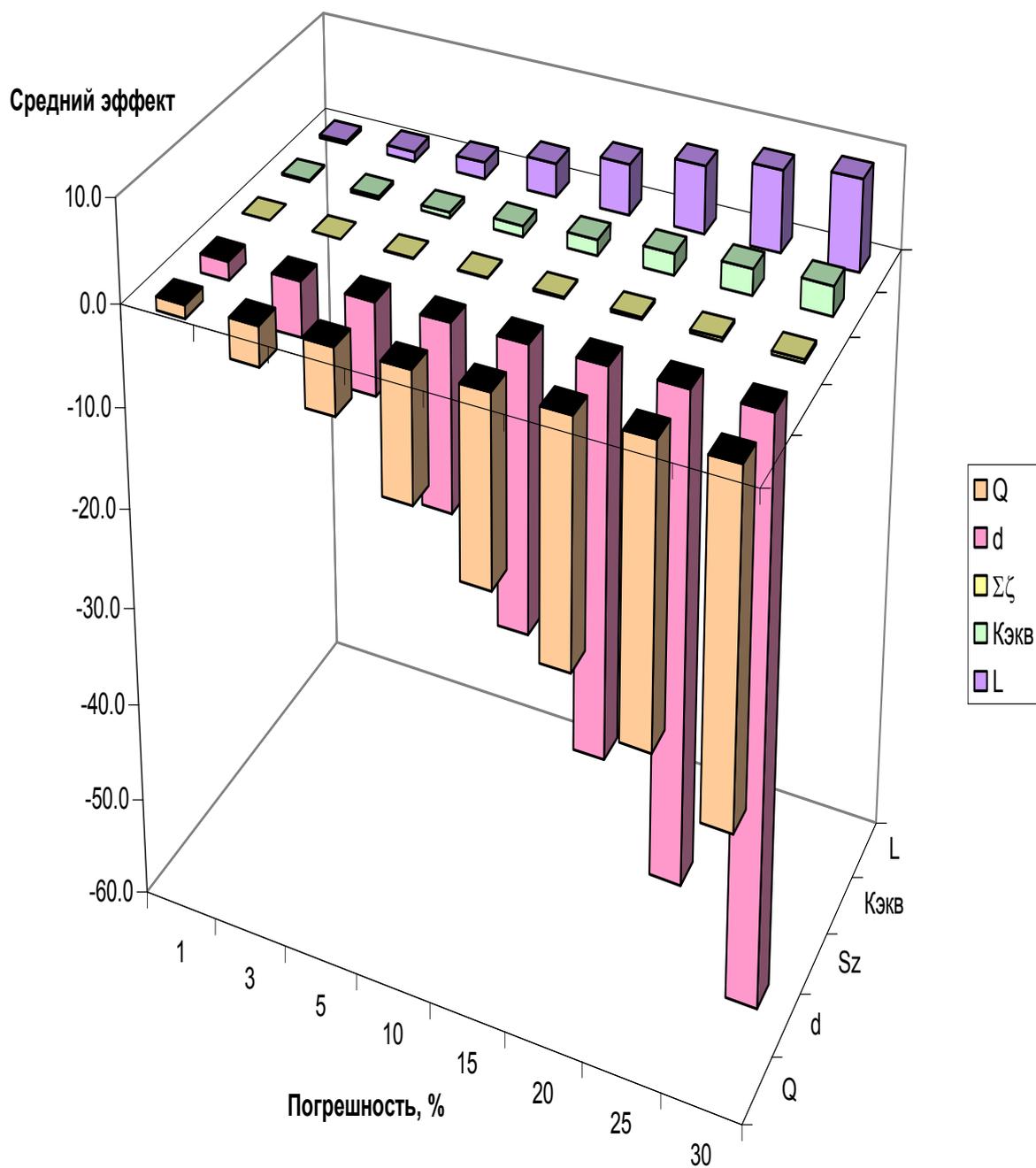


Рисунок 1.2.7 - Влияние средних эффектов факторов на погрешность расхода теплоносителя у “контролируемого” абонента

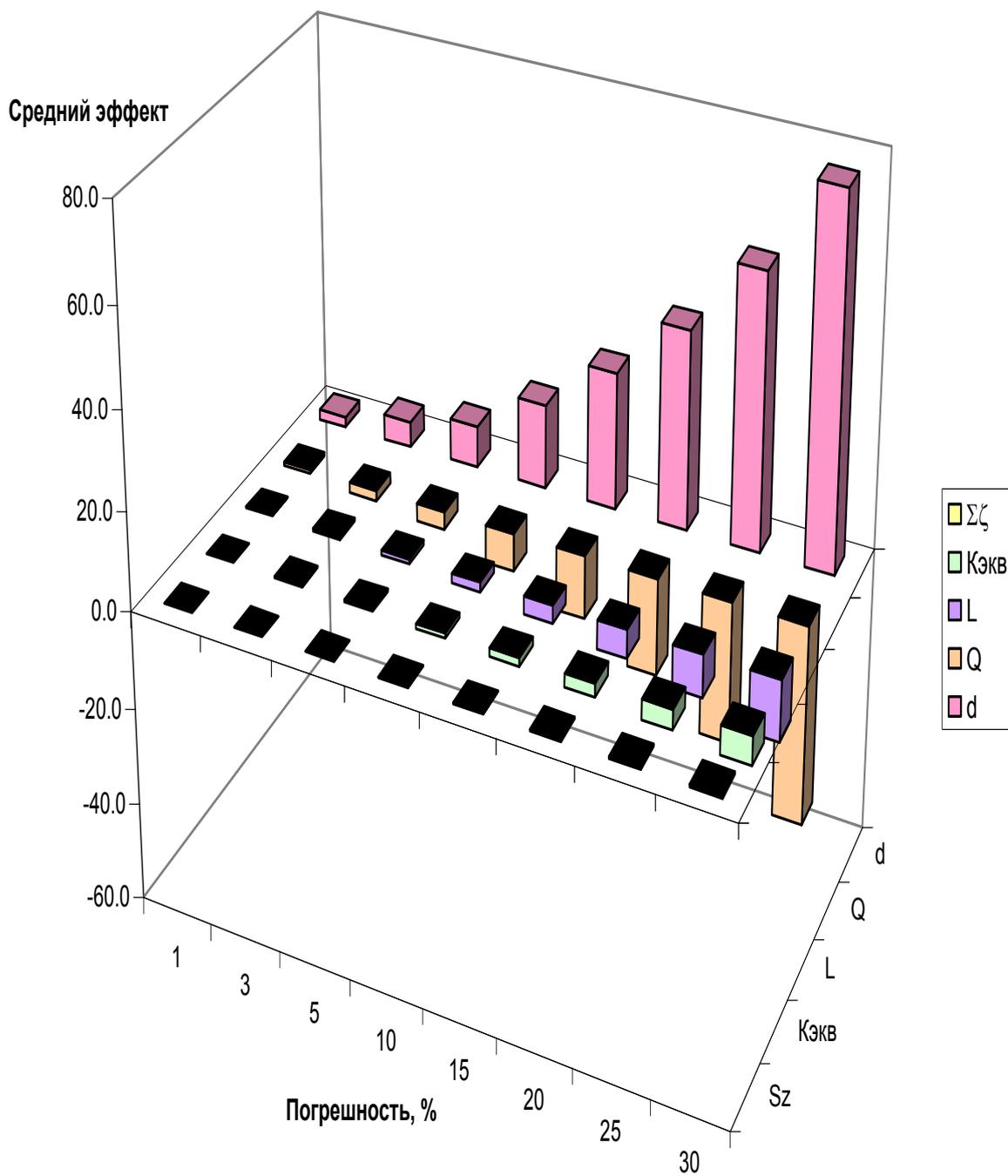


Рисунок 1.2.8 - Влияние средних эффектов факторов на погрешность температуры теплоносителя на вводе “контролируемого” абонента

Средний эффект

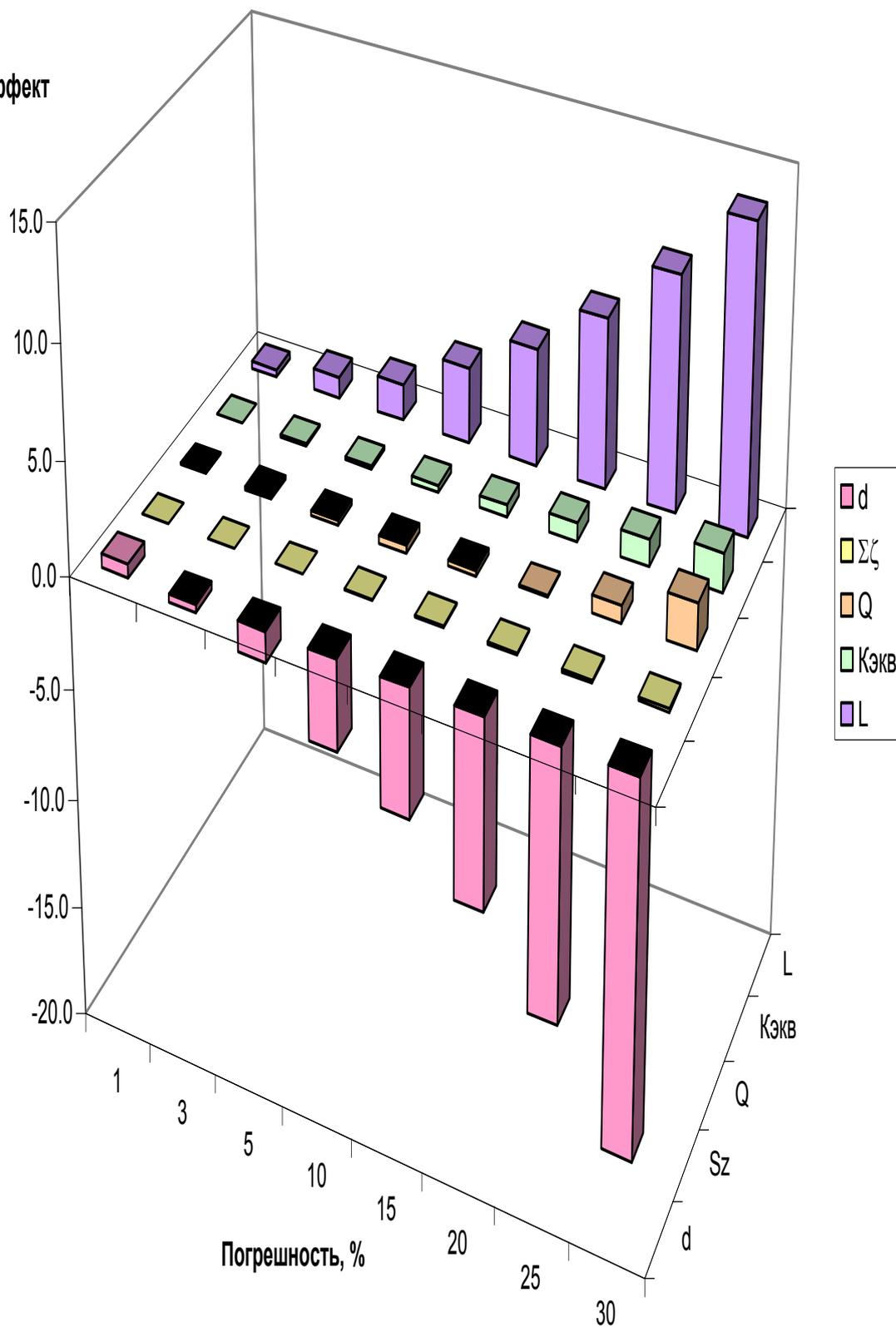


Рисунок 1.2.9 - Влияние средних эффектов факторов на погрешность температуры внутреннего воздуха “контролируемого” абонента

Таблица 1.2.3 - Результаты численного моделирования потокораспределения в тепловой сети (участки)

Погрешность, %	Вариант	Участок начало (Н)	Участок конец (К)	L м	D мм	K _{экв} мм	Σζ		Подводящий трубопровод								Обратный трубопровод							
							под.	обр.	G	v	P _н ^н	P _н ^к	RL+Z	Z	t ₁ ^н	t ₁ ^к	G	v	P _о ^н	P _о ^к	RL+Z	Z	t ₂ ^н	t ₂ ^к
									т/ч	м/с	м	м	м	м	С	С	т/ч	м/с	м	м	м	м	С	С
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27
0	0	ТЭЦ	т1	2100.0	500	2.0	1.1	1.1	348.8	0.5	80.0	78.5	1.49	0.01	140.0	138.1	-348.8	0.5	40.0	41.5	1.49	0.01	101.0	102.8
		т1	М/р 1	2400.0	300	2.0	8.1	8.9	86.3	0.3	78.5	76.9	1.60	0.05	138.1	132.3	-86.3	0.3	41.5	43.1	1.61	0.05	107.1	112.7
		т1	т2	600.0	400	2.0	4.3	5.0	262.5	0.6	78.5	77.7	0.85	0.07	138.1	137.5	-262.5	0.6	41.5	42.4	0.87	0.09	101.4	102.0
		т2	М/р 2	750.0	250	2.0	5.3	6.1	73.5	0.4	77.7	76.7	0.98	0.05	137.5	135.6	-73.5	0.4	42.4	43.3	0.98	0.05	113.5	115.4
		т2	т3	1250.0	350	2.0	4.3	5.0	189.0	0.5	77.7	75.9	1.78	0.07	137.5	135.8	-189.0	0.5	42.4	44.1	1.79	0.08	97.5	98.9
		т3	М/р 3	3200.0	300	2.0	10.9	11.7	70.3	0.3	75.9	74.5	1.42	0.04	135.8	126.6	-70.3	0.3	44.1	45.6	1.42	0.05	97.7	106.4
		т3	т4	900.0	300	2.0	4.3	5.0	118.7	0.5	75.9	74.7	1.15	0.05	135.8	134.3	-118.7	0.5	44.1	45.3	1.16	0.06	99.7	101.1
		т4	М/р 4	3000.0	300	2.0	10.4	10.7	72.2	0.3	74.7	73.3	1.40	0.04	134.3	125.9	-72.2	0.3	45.3	46.7	1.41	0.04	97.1	105.0
		т4	М/р 5	800.0	200	2.0	4.8	5.5	46.4	0.4	74.7	73.4	1.34	0.04	134.3	131.5	-46.4	0.4	45.3	46.7	1.35	0.05	107.2	109.8
3	14	ТЭЦ	т1	2163.0	485	2.1	1.1	1.1	332.4	0.5	80.0	78.3	1.65	0.01	140.0	138.1	-332.4	0.5	40.0	41.7	1.65	0.01	101.4	103.2
		т1	М/р 1	2472.0	291	2.1	8.3	9.2	82.8	0.3	78.3	76.5	1.80	0.05	138.1	132.6	-82.8	0.3	41.7	43.5	1.81	0.06	107.5	112.8
		т1	т2	618.0	388	2.1	4.4	5.2	249.6	0.6	78.3	77.4	0.94	0.08	138.1	137.5	-249.6	0.6	41.7	42.6	0.95	0.09	101.7	102.3
		т2	М/р 2	772.5	243	2.1	5.5	6.3	70.5	0.4	77.4	76.3	1.10	0.05	137.5	135.7	-70.5	0.4	42.6	43.7	1.10	0.06	113.6	115.3
		т2	т3	1287.5	340	2.1	4.4	5.2	179.1	0.5	77.4	75.5	1.95	0.07	137.5	135.9	-179.1	0.5	42.6	44.6	1.96	0.08	97.8	99.2
		т3	М/р 3	3296.0	291	2.1	11.2	12.1	66.9	0.3	75.5	73.9	1.57	0.04	135.9	127.1	-66.9	0.3	44.6	46.1	1.57	0.05	98.2	106.4
		т3	т4	927.0	291	2.1	4.4	5.2	112.2	0.5	75.5	74.2	1.26	0.05	135.9	134.4	-112.2	0.5	44.6	45.8	1.26	0.06	99.7	101.1
		т4	М/р 4	3090.0	291	2.1	10.7	11.0	68.3	0.3	74.2	72.7	1.53	0.04	134.4	126.4	-68.3	0.3	45.8	47.4	1.53	0.05	97.4	104.9
		т4	М/р 5	824.0	194	2.1	4.9	5.7	43.9	0.4	74.2	72.7	1.47	0.04	134.4	131.6	-43.9	0.4	45.8	47.3	1.47	0.05	106.7	109.4
	17	ТЭЦ	т1	2037.0	485	1.9	1.1	1.1	351.0	0.5	80.0	78.3	1.71	0.02	140.0	138.3	-351.0	0.5	40.0	41.7	1.71	0.02	102.9	104.6
		т1	М/р 1	2328.0	291	1.9	7.9	8.6	87.7	0.4	78.3	76.4	1.87	0.05	138.3	133.4	-87.7	0.4	41.7	43.6	1.87	0.06	108.7	113.4
		т1	т2	582.0	388	1.9	4.2	4.9	263.3	0.6	78.3	77.3	0.97	0.08	138.3	137.7	-263.3	0.6	41.7	42.7	0.98	0.09	103.2	103.7
		т2	М/р 2	727.5	243	1.9	5.1	5.9	74.6	0.4	77.3	76.2	1.13	0.05	137.7	136.1	-74.6	0.4	42.7	43.8	1.14	0.06	114.1	115.6
		т2	т3	1212.5	340	1.9	4.2	4.9	188.7	0.6	77.3	75.3	2.00	0.07	137.7	136.4	-188.7	0.6	42.7	44.7	2.01	0.08	99.6	100.8
		т3	М/р 3	3104.0	291	1.9	10.6	11.3	70.5	0.3	75.3	73.7	1.61	0.05	136.4	128.4	-70.5	0.3	44.7	46.3	1.61	0.05	100.0	107.4
		т3	т4	873.0	291	1.9	4.2	4.9	118.2	0.5	75.3	74.0	1.29	0.05	136.4	135.0	-118.2	0.5	44.7	46.0	1.30	0.06	101.2	102.5
		т4	М/р 4	2910.0	291	1.9	10.1	10.4	71.9	0.3	74.0	72.5	1.57	0.05	135.0	127.8	-71.9	0.3	46.0	47.6	1.57	0.05	99.2	105.9
т4	М/р 5	776.0	194	1.9	4.7	5.3	46.3	0.4	74.0	72.5	1.50	0.04	135.0	132.5	-46.3	0.4	46.0	47.5	1.51	0.05	107.6	110.0		

Продолжение таблицы 1.2.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27
3	19	ТЭЦ	т1	2037.0	515	1.9	1.1	1.1	364.9	0.5	80.0	78.7	1.34	0.01	140.0	138.2	-364.9	0.5	40.0	41.3	1.34	0.01	102.5	104.1
		т1	М/р 1	2328.0	309	1.9	7.9	8.6	89.8	0.3	78.7	77.2	1.43	0.04	138.2	132.8	-89.8	0.3	41.3	42.8	1.43	0.05	108.1	113.3
		т1	т2	582.0	412	1.9	4.2	4.9	275.2	0.6	78.7	77.9	0.77	0.07	138.2	137.6	-275.2	0.6	41.3	42.1	0.79	0.08	102.9	103.4
		т2	М/р 2	727.5	258	1.9	5.1	5.9	76.4	0.4	77.9	77.0	0.87	0.04	137.6	135.9	-76.4	0.4	42.1	43.0	0.88	0.05	114.1	115.9
		т2	т3	1212.5	361	1.9	4.2	4.9	198.7	0.5	77.9	76.3	1.62	0.06	137.6	136.2	-198.7	0.5	42.1	43.8	1.63	0.07	99.3	100.6
		т3	М/р 3	3104.0	309	1.9	10.6	11.3	73.7	0.3	76.3	75.0	1.28	0.04	136.2	127.6	-73.7	0.3	43.8	45.0	1.29	0.04	99.4	107.5
		т3	т4	873.0	309	1.9	4.2	4.9	125.0	0.5	76.3	75.2	1.05	0.05	136.2	134.7	-125.0	0.5	43.8	44.8	1.06	0.05	101.3	102.7
		т4	М/р 4	2910.0	309	1.9	10.1	10.4	76.1	0.3	75.2	73.9	1.28	0.04	134.7	126.9	-76.1	0.3	44.8	46.1	1.28	0.04	99.0	106.3
		т4	М/р 5	776.0	206	1.9	4.7	5.3	48.9	0.4	75.2	74.0	1.22	0.04	134.7	132.2	-48.9	0.4	44.8	46.0	1.23	0.05	108.4	110.8
30	14	ТЭЦ	т1	2730.0	350	2.6	1.4	1.4	180.9	0.5	80.0	76.3	3.74	0.02	140.0	136.3	-180.9	0.5	40.0	43.7	3.74	0.02	82.8	85.8
		т1	М/р 1	3120.0	210	2.6	10.5	11.6	49.5	0.4	76.3	71.3	4.94	0.08	136.3	126.4	-49.5	0.4	43.7	48.7	4.94	0.09	94.9	103.8
		т1	т2	780.0	280	2.6	5.6	6.5	131.5	0.6	76.3	74.3	1.94	0.10	136.3	135.2	-131.5	0.6	43.7	45.7	1.96	0.12	82.3	83.1
		т2	М/р 2	975.0	175	2.6	6.9	7.9	42.3	0.5	74.3	71.3	3.03	0.08	135.2	131.8	-42.3	0.5	45.7	48.7	3.04	0.10	105.0	108.2
		т2	т3	1625.0	245	2.6	5.6	6.5	89.2	0.5	74.3	70.6	3.68	0.08	135.2	132.3	-89.2	0.5	45.7	49.4	3.70	0.09	72.8	74.8
		т3	М/р 3	4160.0	210	2.6	14.2	15.2	35.0	0.3	70.6	67.3	3.30	0.06	132.3	114.6	-35.0	0.3	49.4	52.7	3.31	0.06	74.9	89.4
		т3	т4	1170.0	210	2.6	5.6	6.5	54.1	0.4	70.6	68.4	2.24	0.05	132.3	128.9	-54.1	0.4	49.4	51.6	2.24	0.06	74.7	77.2
		т4	М/р 4	3900.0	210	2.6	13.5	13.9	32.9	0.3	68.4	65.7	2.74	0.05	128.9	111.6	-32.9	0.3	51.6	54.4	2.74	0.05	70.2	84.0
		т4	М/р 5	1040.0	140	2.6	6.2	7.2	21.2	0.4	68.4	65.7	2.67	0.05	128.9	123.1	-21.2	0.4	51.6	54.3	2.68	0.05	88.1	93.1
	17	ТЭЦ	т1	1470.0	350	1.4	0.8	0.8	295.7	0.9	80.0	75.5	4.46	0.03	140.0	138.8	-295.7	0.9	40.0	44.5	4.46	0.03	98.0	99.1
		т1	М/р 1	1680.0	210	1.4	5.7	6.2	83.5	0.7	75.5	69.4	6.19	0.13	138.8	135.5	-83.5	0.7	44.5	50.7	6.20	0.14	106.2	109.2
		т1	т2	420.0	280	1.4	3.0	3.5	212.2	1.0	75.5	73.3	2.27	0.14	138.8	138.4	-212.2	1.0	44.5	46.7	2.29	0.16	96.3	96.6
		т2	М/р 2	525.0	175	1.4	3.7	4.3	71.8	0.8	73.3	69.4	3.83	0.13	138.4	137.3	-71.8	0.8	46.7	50.6	3.85	0.15	109.7	110.8
		т2	т3	875.0	245	1.4	3.0	3.5	140.4	0.8	73.3	69.2	4.04	0.10	138.4	137.4	-140.4	0.8	46.7	50.8	4.06	0.12	89.8	90.7
		т3	М/р 3	2240.0	210	1.4	7.6	8.2	56.2	0.5	69.2	65.5	3.75	0.08	137.4	131.0	-56.2	0.5	50.8	54.6	3.75	0.08	93.1	98.6
		т3	т4	630.0	210	1.4	3.0	3.5	84.2	0.7	69.2	66.9	2.38	0.07	137.4	136.2	-84.2	0.7	50.8	53.2	2.39	0.08	89.0	90.0
		т4	М/р 4	2100.0	210	1.4	7.3	7.5	51.1	0.4	66.9	64.0	2.90	0.06	136.2	129.6	-51.1	0.4	53.2	56.1	2.90	0.06	87.2	92.5
		т4	М/р 5	560.0	140	1.4	3.4	3.9	33.1	0.6	66.9	64.0	2.81	0.06	136.2	134.1	-33.1	0.6	53.2	56.0	2.82	0.07	94.3	96.1

Продолжение таблицы 1.2.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27
30	19	ТЭЦ	τ1	1470.0	650	1.4	0.8	0.8	500.8	0.4	80.0	79.5	0.49	0.01	140.0	139.0	-500.8	0.4	40.0	40.5	0.49	0.01	110.0	111.0
		τ1	М/р 1	1680.0	390	1.4	5.7	6.2	119.1	0.3	79.5	79.0	0.49	0.02	139.0	135.5	-119.1	0.3	40.5	41.0	0.49	0.02	113.1	116.6
		τ1	τ2	420.0	520	1.4	3.0	3.5	381.7	0.5	79.5	79.2	0.30	0.04	139.0	138.6	-381.7	0.5	40.5	40.8	0.30	0.04	110.3	110.7
		τ2	М/р 2	525.0	325	1.4	3.7	4.3	101.7	0.3	79.2	78.9	0.30	0.02	138.6	137.5	-101.7	0.3	40.8	41.1	0.30	0.03	117.2	118.3
		τ2	τ3	875.0	455	1.4	3.0	3.5	279.9	0.5	79.2	78.6	0.63	0.04	138.6	137.7	-279.9	0.5	40.8	41.4	0.63	0.04	108.3	109.2
		τ3	М/р 3	2240.0	390	1.4	7.6	8.2	102.3	0.2	78.6	78.1	0.48	0.02	137.7	132.4	-102.3	0.2	41.4	41.9	0.48	0.02	108.2	113.4
		τ3	τ4	630.0	390	1.4	3.0	3.5	177.6	0.4	78.6	78.2	0.41	0.03	137.7	136.8	-177.6	0.4	41.4	41.8	0.42	0.03	109.8	110.7
		τ4	М/р 4	2100.0	390	1.4	7.3	7.5	108.2	0.3	78.2	77.7	0.50	0.02	136.8	132.2	-108.2	0.3	41.8	42.3	0.50	0.02	108.4	113.0
		τ4	М/р 5	560.0	260	1.4	3.4	3.9	69.4	0.4	78.2	77.7	0.47	0.02	136.8	135.3	-69.4	0.4	41.8	42.3	0.48	0.03	114.3	115.8

Таблица 1.2.4 - Результаты численного моделирования потокораспределения (абоненты)

Погрешность %	Вариант	Объект	P_n	P_o	DP	t_n	t_o	$Q^{расч}$	Q^Φ	$G^{расч}$	G_Φ	t_Φ
			м	м	м	С	С	Гкал/ч	Гкал/ч	т/ч	т/ч	С
0	0	М/р 1	76.9	43.1	33.8	132.3	112.7	1.4700	1.6905	21.00	86.33	24.7
		М/р 2	76.7	43.3	33.3	135.6	115.4	1.2600	1.4815	18.00	73.49	25.9
		М/р 3	74.5	45.6	28.9	126.6	106.4	1.2950	1.4221	18.50	70.31	22.4
		М/р 4	73.3	46.7	26.6	125.9	105.0	1.3860	1.5095	19.80	72.23	22.0
		М/р 5	73.4	46.7	26.7	131.5	109.8	0.8890	1.0084	12.70	46.43	24.0
3	14	М/р 1	76.5	43.5	33.1	132.6	112.8	1.4259	1.6419	20.37	82.84	24.8
		М/р 2	76.3	43.7	32.6	135.7	115.3	1.2222	1.4371	17.46	70.49	25.9
		М/р 3	73.9	46.1	27.8	127.1	106.4	1.2562	1.3824	17.95	66.85	22.5
		М/р 4	72.7	47.4	25.3	126.4	104.9	1.3444	1.4666	19.21	68.32	22.1
		М/р 5	72.7	47.3	25.4	131.6	109.4	0.8623	0.9769	12.32	43.93	24.0
	17	М/р 1	76.4	43.6	32.8	133.4	113.4	1.5141	1.7527	21.63	87.66	25.1
		М/р 2	76.2	43.8	32.4	136.1	115.6	1.2978	1.5304	18.54	74.58	26.1
		М/р 3	73.7	46.3	27.4	128.4	107.4	1.3339	1.4814	19.06	70.53	23.0
		М/р 4	72.5	47.6	24.9	127.8	105.9	1.4276	1.5721	20.39	71.95	22.6
		М/р 5	72.5	47.5	25.0	132.5	110.0	0.9157	1.0430	13.08	46.27	24.3
	19	М/р 1	77.2	42.8	34.5	132.8	113.3	1.5141	1.7487	21.63	89.78	25.0
		М/р 2	77.0	43.0	34.0	135.9	115.9	1.2978	1.5303	18.54	76.45	26.1
		М/р 3	75.0	45.0	29.9	127.6	107.5	1.3339	1.4769	19.06	73.72	22.8
		М/р 4	73.9	46.1	27.8	126.9	106.3	1.4276	1.5695	20.39	76.08	22.5
		М/р 5	74.0	46.0	27.9	132.2	110.8	0.9157	1.0450	13.08	48.90	24.4
30	14	М/р 1	71.3	48.7	22.6	126.4	103.8	1.0290	1.1178	14.70	49.45	21.9
		М/р 2	71.3	48.7	22.5	131.8	108.2	0.8820	0.9954	12.60	42.30	23.8
		М/р 3	67.3	52.7	14.6	114.6	89.4	0.9065	0.8833	12.95	35.02	16.8
		М/р 4	65.7	54.4	11.3	111.6	84.0	0.9702	0.9109	13.86	32.92	15.3
		М/р 5	65.7	54.3	11.4	123.1	93.1	0.6223	0.6388	8.89	21.23	19.2
	17	М/р 1	69.4	50.7	18.7	135.5	109.2	1.9110	2.1952	27.30	83.47	24.7
		М/р 2	69.4	50.6	18.9	137.3	110.8	1.6380	1.9053	23.40	71.84	25.3
		М/р 3	65.5	54.6	10.9	131.0	98.6	1.6835	1.8244	24.05	56.24	21.8
		М/р 4	64.0	56.1	7.9	129.6	92.5	1.8018	1.8954	25.74	51.06	20.3
		М/р 5	64.0	56.0	8.0	134.1	96.1	1.1557	1.2553	16.51	33.09	21.9
	19	М/р 1	79.0	41.0	38.0	135.5	116.6	1.9110	2.2564	27.30	119.07	26.1
		М/р 2	78.9	41.1	37.8	137.5	118.3	1.6380	1.9601	23.40	101.75	26.8
		М/р 3	78.1	41.9	36.2	132.4	113.4	1.6835	1.9424	24.05	102.32	24.9
		М/р 4	77.7	42.3	35.3	132.2	113.0	1.8018	2.0736	25.74	108.18	24.8
		М/р 5	77.7	42.3	35.4	135.3	115.8	1.1557	1.3595	16.51	69.44	25.9

Таблица 1.2.5 - План эксперимента. Результаты численного моделирования потокораспределения в тепловой сети (источник).

Погреш- ность, %	Вариант	Фактор					G т/ч	t ₂ С	N _{теп}						N _{мех}						Абонент			
		L	т/ч	С	Sz	Q			уч.	аб.	сум	уч.	аб.	сум	уч.	аб.	сум	уч.	аб.	сум	DP	G	t ₁	t _в
		1	2	3	4	5			6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	0						348.8	101.0	6.5	7.1	13.6				3.4	10.6	14.0							
3	1	-1	-1	-1	-1	-1	335.8	102.6	5.6	6.9	12.6	13.2	2.4	7.5	3.4	10.0	13.4	-0.5	5.1	3.7	2.1	4.0	-1.5	-0.8
	2	1	-1	-1	-1	-1	333.3	101.4	5.9	6.9	12.9	8.3	2.9	5.4	3.5	9.8	13.3	-3.8	7.1	4.4	4.1	5.0	-2.1	0.2
	3	-1	1	-1	-1	-1	348.0	102.0	6.3	6.9	13.2	2.6	2.6	2.6	2.8	11.1	13.9	17.4	-5.3	0.2	-8.4	-1.0	3.4	-1.1
	4	1	1	-1	-1	-1	346.0	100.8	6.7	6.9	13.6	-2.9	3.1	0.2	2.9	10.9	13.8	14.2	-3.5	0.8	-6.6	-0.1	3.1	-0.1
	5	-1	-1	1	-1	-1	335.1	102.5	5.6	6.9	12.6	13.2	2.4	7.6	3.4	10.0	13.4	-1.5	5.7	3.9	2.7	4.3	-1.7	-0.7
	6	1	-1	1	-1	-1	332.5	101.4	5.9	6.9	12.8	8.3	2.9	5.5	3.6	9.7	13.3	-4.8	7.7	4.7	4.8	5.3	-2.4	0.3
	7	-1	1	1	-1	-1	347.4	101.9	6.3	6.9	13.2	2.6	2.6	2.6	2.8	11.1	13.9	16.4	-4.8	0.4	-7.8	-0.7	3.2	-1.0
	8	1	1	1	-1	-1	345.3	100.7	6.7	6.9	13.6	-2.9	3.1	0.2	2.9	10.9	13.8	13.2	-2.9	1.0	-6.0	0.1	2.8	0.0
	9	-1	-1	-1	1	-1	335.7	102.6	5.6	6.9	12.6	13.2	2.4	7.5	3.4	10.0	13.4	-0.6	5.1	3.7	2.2	4.1	-1.5	-0.8
	10	1	-1	-1	1	-1	333.2	101.4	5.9	6.9	12.9	8.3	2.9	5.4	3.5	9.8	13.3	-3.9	7.2	4.5	4.2	5.1	-2.1	0.2
	11	-1	1	-1	1	-1	348.0	101.9	6.3	6.9	13.2	2.6	2.6	2.6	2.8	11.1	13.9	17.3	-5.2	0.2	-8.3	-0.9	3.4	-1.1
	12	1	1	-1	1	-1	345.9	100.8	6.7	6.9	13.6	-2.9	3.1	0.2	2.9	10.9	13.8	14.1	-3.4	0.8	-6.5	-0.1	3.0	-0.1
	13	-1	-1	1	1	-1	335.0	102.5	5.6	6.9	12.6	13.2	2.4	7.6	3.4	10.0	13.4	-1.6	5.7	4.0	2.8	4.4	-1.8	-0.7
	14	1	-1	1	1	-1	332.4	101.4	5.9	6.9	12.8	8.3	2.9	5.5	3.6	9.7	13.3	-5.0	7.8	4.7	4.9	5.4	-2.4	0.3
	15	-1	1	1	1	-1	347.3	101.9	6.3	6.9	13.2	2.6	2.6	2.6	2.8	11.1	13.9	16.3	-4.7	0.4	-7.7	-0.7	3.2	-1.0
	16	1	1	1	1	-1	345.3	100.7	6.7	6.9	13.6	-2.9	3.1	0.2	2.9	10.9	13.8	13.1	-2.9	1.0	-5.9	0.2	2.8	0.0
	17	-1	-1	-1	-1	1	351.0	102.9	5.6	7.4	13.0	13.1	-3.8	4.3	3.9	10.2	14.0	-14.1	3.7	-0.6	6.4	0.3	-3.8	-0.9
	18	1	-1	-1	-1	1	348.1	101.8	6.0	7.3	13.3	8.1	-3.3	2.2	4.0	9.9	13.9	-17.6	5.9	0.2	8.5	1.5	-4.5	0.1
	19	-1	1	-1	-1	1	364.9	102.5	6.3	7.4	13.7	2.4	-3.6	-0.8	3.2	11.4	14.6	5.2	-7.8	-4.6	-4.6	-5.3	1.6	-1.3
	20	1	1	-1	-1	1	362.6	101.3	6.7	7.3	14.0	-3.1	-3.1	-3.1	3.3	11.2	14.5	1.7	-5.8	-4.0	-2.7	-4.4	1.1	-0.4
	21	-1	-1	1	-1	1	350.1	102.8	5.6	7.4	13.0	13.1	-3.7	4.3	3.9	10.1	14.0	-15.2	4.4	-0.4	7.1	0.7	-4.1	-0.8
	22	1	-1	1	-1	1	347.2	101.7	6.0	7.3	13.3	8.2	-3.2	2.2	4.0	9.9	13.9	-18.7	6.6	0.4	9.2	1.9	-4.8	0.2
	23	-1	1	1	-1	1	364.2	102.4	6.3	7.4	13.7	2.4	-3.6	-0.7	3.2	11.3	14.6	4.2	-7.2	-4.4	-4.0	-5.0	1.4	-1.2
	24	1	1	1	-1	1	361.8	101.3	6.7	7.3	14.0	-3.1	-3.1	-3.1	3.4	11.1	14.5	0.7	-5.2	-3.7	-2.1	-4.1	0.9	-0.3
	25	-1	-1	-1	1	1	350.9	102.9	5.6	7.4	13.0	13.1	-3.8	4.3	3.9	10.2	14.0	-14.2	3.8	-0.6	6.5	0.4	-3.8	-0.9

Продолжение таблицы 1.2.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
3	26	1	-1	-1	1	1	348.0	101.8	6.0	7.3	13.3	8.1	-3.3	2.2	4.0	9.9	13.9	-17.7	6.0	0.2	8.6	1.5	-4.6	0.1
	27	-1	1	-1	1	1	364.8	102.5	6.3	7.4	13.7	2.4	-3.6	-0.8	3.2	11.4	14.6	5.1	-7.7	-4.6	-4.5	-5.3	1.6	-1.3
	28	1	1	-1	1	1	362.5	101.3	6.7	7.3	14.0	-3.1	-3.1	-3.1	3.3	11.2	14.5	1.6	-5.7	-3.9	-2.6	-4.3	1.1	-0.3
	29	-1	-1	1	1	1	350.0	102.8	5.6	7.4	13.0	13.1	-3.7	4.3	3.9	10.1	14.0	-15.3	4.4	-0.4	7.1	0.7	-4.2	-0.8
	30	1	-1	1	1	1	347.1	101.7	6.0	7.3	13.3	8.2	-3.2	2.2	4.0	9.9	13.9	-18.8	6.7	0.5	9.3	1.9	-4.9	0.2
	31	-1	1	1	1	1	364.1	102.4	6.3	7.4	13.7	2.4	-3.6	-0.7	3.3	11.3	14.6	4.0	-7.1	-4.4	-3.9	-5.0	1.3	-1.2
	32	1	1	1	1	1	361.7	101.3	6.7	7.3	14.0	-3.1	-3.1	-3.1	3.4	11.1	14.5	0.5	-5.1	-3.7	-2.0	-4.0	0.8	-0.3
	Минимум						332.4	100.7	5.6	6.9	12.6	-3.1	-3.8	-3.1	2.8	9.7	13.3	-18.8	-7.8	-4.6	-8.4	-5.3	-4.9	-1.3
	Максимум						364.9	102.9	6.7	7.4	14.0	13.2	3.1	7.6	4.0	11.4	14.6	17.4	7.8	4.7	9.3	5.4	3.4	0.3
30	1	-1	-1	-1	-1	-1	219.0	101.6	3.4	5.0	8.4	47.2	29.9	38.2	3.3	5.4	8.8	1.6	48.6	37.2	26.5	40.0	-16.1	1.0
	2	1	-1	-1	-1	-1	191.2	85.2	5.9	4.6	10.5	9.4	35.2	22.9	3.9	3.7	7.6	-15.9	64.8	45.2	49.9	50.5	-30.1	16.9
	3	-1	1	-1	-1	-1	278.0	102.9	5.3	5.0	10.3	18.3	29.3	24.1	0.3	10.8	11.1	91.5	-2.6	20.3	-44.2	15.9	15.5	-3.1
	4	1	1	-1	-1	-1	275.2	89.2	9.3	4.7	14.0	-42.8	33.4	-2.9	0.5	10.5	11.0	85.1	0.6	21.1	-40.1	17.1	18.5	7.6
	5	-1	-1	1	-1	-1	210.6	100.3	3.4	5.0	8.4	47.6	30.4	38.6	3.6	4.9	8.4	-5.1	54.0	39.6	34.4	43.3	-22.0	2.6
	6	1	-1	1	-1	-1	181.4	82.9	5.8	4.5	10.4	10.5	36.0	23.9	4.0	3.2	7.3	-19.1	69.5	48.0	57.0	54.1	-38.1	20.0
	7	-1	1	1	-1	-1	277.4	102.8	5.3	5.0	10.3	18.3	29.4	24.1	0.3	10.8	11.1	89.9	-1.8	20.5	-43.2	16.2	15.3	-3.0
	8	1	1	1	-1	-1	274.0	89.0	9.2	4.7	14.0	-42.6	33.4	-2.8	0.6	10.4	11.0	82.5	1.9	21.5	-38.4	17.7	18.1	7.8
	9	-1	-1	-1	1	-1	218.1	101.5	3.4	5.0	8.4	47.3	30.0	38.2	3.4	5.4	8.7	0.8	49.2	37.5	27.5	40.4	-16.8	1.1
	10	1	-1	-1	1	-1	190.6	85.1	5.9	4.6	10.5	9.4	35.3	23.0	3.9	3.7	7.6	-16.1	65.1	45.3	50.4	50.7	-30.5	17.1
	11	-1	1	-1	1	-1	277.9	102.9	5.3	5.0	10.3	18.3	29.3	24.1	0.3	10.8	11.1	91.1	-2.4	20.3	-44.0	16.0	15.5	-3.1
	12	1	1	-1	1	-1	275.0	89.1	9.3	4.7	14.0	-42.8	33.4	-2.9	0.5	10.5	11.0	84.7	0.8	21.2	-39.9	17.2	18.5	7.6
	13	-1	-1	1	1	-1	209.8	100.2	3.4	4.9	8.3	47.6	30.4	38.6	3.6	4.8	8.4	-5.6	54.4	39.8	35.2	43.6	-22.6	2.8
	14	1	-1	1	1	-1	180.9	82.8	5.8	4.5	10.3	10.5	36.1	23.9	4.0	3.2	7.2	-19.2	69.7	48.1	57.3	54.3	-38.5	20.2
	15	-1	1	1	1	-1	277.2	102.8	5.3	5.0	10.3	18.3	29.4	24.1	0.4	10.7	11.1	89.6	-1.6	20.5	-43.0	16.3	15.2	-3.0
	16	1	1	1	1	-1	273.8	88.9	9.2	4.7	14.0	-42.6	33.4	-2.8	0.6	10.3	11.0	82.1	2.0	21.5	-38.1	17.7	18.0	7.8
	17	-1	-1	-1	-1	1	295.7	98.0	3.4	9.1	12.4	48.3	-27.6	8.6	7.6	4.2	11.8	-125.1	60.3	15.2	70.0	28.7	-74.7	9.0
	18	1	-1	-1	-1	1	239.0	81.2	5.7	8.3	14.0	11.7	-17.0	-3.3	7.2	2.4	9.6	-112.6	77.7	31.5	83.0	46.4	-110.3	28.1
	19	-1	1	-1	-1	1	500.8	110.0	5.4	9.6	15.0	15.9	-34.9	-10.7	1.7	18.4	20.0	50.7	-73.8	-43.6	-32.4	-49.6	9.9	-7.9
	20	1	1	-1	-1	1	484.8	100.8	9.7	9.2	19.0	-50.3	-30.1	-39.7	2.7	16.7	19.4	20.1	-58.0	-39.0	-20.9	-42.9	8.7	-0.8
	21	-1	-1	1	-1	1	277.2	95.7	3.3	9.0	12.3	48.8	-26.2	9.6	7.6	3.5	11.1	-123.2	66.7	20.5	74.9	34.9	-88.2	12.2

Продолжение таблицы 1.2.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
30	22	1	-1	1	-1	1	221.5	77.9	5.6	8.2	13.8	13.4	-14.7	-1.3	6.9	1.9	8.9	-105.1	81.9	36.5	86.1	51.5	-126.4	32.9		
	23	-1	1	1	-1	1	496.9	109.8	5.4	9.6	15.0	16.0	-34.8	-10.6	1.9	17.9	19.9	43.0	-69.9	-42.5	-29.5	-47.9	9.0	-7.6		
	24	1	1	1	-1	1	478.4	100.4	9.7	9.2	19.0	-50.0	-29.8	-39.4	3.1	16.0	19.1	8.9	-51.9	-37.2	-16.4	-40.3	7.2	-0.3		
	25	-1	-1	-1	1	1	293.7	97.7	3.3	9.1	12.4	48.3	-27.5	8.7	7.6	4.1	11.7	-124.9	61.0	15.8	70.6	29.5	-76.2	9.4		
	26	1	-1	-1	1	1	237.9	81.1	5.7	8.3	14.0	11.8	-16.8	-3.2	7.2	2.3	9.5	-112.2	78.0	31.8	83.2	46.7	-111.3	28.4		
	27	-1	1	-1	1	1	499.8	109.9	5.4	9.6	15.0	15.9	-34.8	-10.6	1.7	18.3	20.0	48.7	-72.8	-43.3	-31.6	-49.1	9.6	-7.8		
	28	1	1	-1	1	1	483.9	100.8	9.7	9.2	19.0	-50.3	-30.0	-39.7	2.8	16.6	19.4	18.5	-57.1	-38.7	-20.2	-42.5	8.5	-0.7		
	29	-1	-1	1	1	1	275.6	95.4	3.3	9.0	12.3	48.9	-26.0	9.7	7.6	3.5	11.0	-122.9	67.2	21.0	75.4	35.5	-89.6	12.5		
	30	1	-1	1	1	1	220.7	77.7	5.6	8.1	13.8	13.5	-14.5	-1.2	6.9	1.9	8.8	-104.7	82.1	36.7	86.2	51.8	-127.3	33.2		
	31	-1	1	1	1	1	495.9	109.7	5.4	9.6	15.0	16.0	-34.7	-10.5	2.0	17.8	19.8	41.1	-68.9	-42.2	-28.7	-47.5	8.7	-7.6		
	32	1	1	1	1	1	477.6	100.3	9.7	9.2	18.9	-49.9	-29.8	-39.4	3.1	16.0	19.1	7.4	-51.2	-36.9	-15.8	-39.9	7.0	-0.2		
	Минимум							180.9	77.7	3.3	4.5	8.3	-50.3	-34.9	-39.7	0.3	1.9	7.2	-125.1	-73.8	-43.6	-44.2	-49.6	-127.3	-7.9	
	Максимум							500.8	110.0	9.7	9.6	19.0	48.9	36.1	38.6	7.6	18.4	20.0	91.5	82.1	48.1	86.2	54.3	18.5	33.2	

Таблица 1.2.6 - Дисперсионный анализ

Погрешность, %	Фактор	N _{мех} %			N _{теп} %			D _p %			G, %			t ₁ %			t _в %		
		Средний эффект	Отношение средних квадратов	Значимость	Средний эффект	Отношение средних квадратов	Значимость	Средний эффект	Отношение средних квадратов	Значимость	Средний эффект	Отношение средних квадратов	Значимость	Средний эффект	Отношение средних квадратов	Значимость	Средний эффект	Отношение средних квадратов	Значимость
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	L	0.2	245.5	***	-0.7	8329.6	***	0.7	270.0	***	0.3	240.1	***	-0.2	92.8	***	0.3	2808.3	***
	D	-1.3	7309.5	***	-4.8	340097.9	***	-3.6	8102.0	***	-1.8	7201.9	***	2.1	12884.4	***	0.6	10417.1	***
	КЭКВ	0.1	23.1	***	0.0	1.6		0.2	26.4	***	0.1	23.5	***	-0.1	23.8	***	0.0	20.5	***
	Sz	0.0	0.3		0.0	0.0		0.0	0.5		0.0	0.4		0.0	0.4		0.0	0.4	
	Q _{аб}	-1.5	10256.8	***	-1.1	18301.4	***	1.4	1170.4	***	-1.3	3773.3	***	-0.7	1476.3	***	0.0	66.6	***
3	L	0.7	114.5	***	-2.2	6079.4	***	2.0	229.2	***	1.0	117.8	***	-0.5	50.2	***	1.0	1796.3	***
	D	-3.8	3405.5	***	-5.1	32003.6	***	-10.9	6908.2	***	-5.4	3535.9	***	5.3	4764.3	***	-0.4	237.2	***
	КЭКВ	0.2	10.8	**	0.0	1.2		0.6	22.4	***	0.3	11.5	**	-0.3	12.8	**	0.1	13.3	**
	Sz	0.0	0.2		0.0	0.0		0.1	0.4		0.0	0.2		0.0	0.2		0.0	0.2	
	Q _{аб}	-4.5	4740.7	***	-3.3	13360.2	***	4.1	994.0	***	-3.9	1838.4	***	-2.2	789.2	***	-0.1	40.7	***
5	L	1.2	56.0	***	-3.7	4520.2	***	3.3	177.3	***	1.7	59.0	***	-0.9	26.9	***	1.6	1018.1	***
	D	-6.4	1662.7	***	-5.5	9878.3	***	-18.0	5392.2	***	-9.1	1770.9	***	8.6	2284.7	***	-1.4	693.2	***
	КЭКВ	0.4	5.3	*	0.1	0.9		1.0	17.4	***	0.5	5.8	*	-0.5	6.8	*	0.1	7.7	**
	Sz	0.0	0.1		0.0	0.0		0.1	0.3		0.1	0.1		-0.1	0.1		0.0	0.1	
	Q _{аб}	-7.5	2278.4	***	-5.5	9944.2	***	6.8	769.7	***	-6.5	907.0	***	-3.7	415.7	***	-0.2	20.8	***
10	L	2.4	17.4	***	-7.4	2328.9	***	6.3	91.3	***	3.3	18.5	***	-2.1	9.7	**	3.4	334.3	***
	D	-13.1	513.7	***	-6.5	1799.9	***	-35.7	2897.9	***	-18.4	560.0	***	17.3	678.3	***	-4.0	467.8	***
	КЭКВ	0.7	1.7		0.1	0.6		2.0	9.0	**	1.1	1.8		-1.0	2.4		0.3	2.8	
	Sz	0.1	0.0		0.0	0.0		0.3	0.1		0.1	0.0		-0.1	0.0		0.0	0.0	
	Q _{аб}	-14.8	656.1	***	-11.0	5157.0	***	13.2	397.9	***	-12.8	268.7	***	-7.8	139.0	***	-0.4	3.9	
15	L	3.7	8.7	**	-10.9	996.9	***	9.0	55.9	***	5.0	9.2	**	-3.7	5.8	*	5.3	155.8	***
	D	-20.2	257.8	***	-9.6	786.3	***	-52.4	1917.7	***	-28.1	285.2	***	28.2	338.0	***	-5.6	179.5	***
	КЭКВ	1.1	0.8		0.2	0.3		2.8	5.5	*	1.6	0.9		-1.8	1.3		0.5	1.5	
	Sz	0.1	0.0		0.0	0.0		0.4	0.1		0.2	0.0		-0.2	0.0		0.1	0.0	
	Q _{аб}	-21.6	296.2	***	-16.4	2268.8	***	18.8	245.3	***	-18.6	124.9	***	-13.1	72.8	***	-0.3	0.4	

Продолжение таблицы 1.2.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
20	L	5.0	5.4	*	-14.7	348.1	***	10.9	40.3	***	6.6	5.6	*	-5.9	4.2	*	7.6	94.8	***
	D	-27.7	164.7	***	-18.6	561.2	***	-67.8	1547.9	***	-38.0	185.0	***	41.0	207.1	***	-8.3	114.1	***
	КЭКВ	1.6	0.5		0.3	0.1		3.5	4.0		2.1	0.6		-2.7	0.9		0.8	1.1	
	Sz	0.2	0.0		0.0	0.0		0.4	0.1		0.2	0.0		-0.3	0.0		0.1	0.0	
	Q _{аб}	-27.9	166.5	***	-21.7	764.3	***	23.0	177.8	***	-24.0	73.5	***	-20.0	49.3	***	0.1	0.0	
25	L	6.3	3.8		-17.8	226.5	***	12.2	32.4	***	8.0	3.8		-8.7	3.5		10.4	65.7	***
	D	-35.8	121.0	***	-21.5	333.0	***	-81.5	1442.1	***	-48.1	138.1	***	56.8	146.6	***	-11.9	84.7	***
	КЭКВ	2.0	0.4		0.4	0.1		3.9	3.3		2.6	0.4		-4.1	0.8		1.2	0.9	
	Sz	0.2	0.0		0.0	0.0		0.5	0.0		0.3	0.0		-0.4	0.0		0.1	0.0	
	Q _{аб}	-33.6	106.9	***	-26.8	514.8	***	25.6	142.6	***	-29.1	50.5	***	-29.1	38.6	***	0.8	0.4	
30	L	7.5	2.8		-20.6	153.3	***	12.8	28.0	***	9.0	2.7		-12.5	3.1		13.6	49.1	***
	D	-44.1	97.2	***	-24.4	215.8	***	-93.4	1480.4	***	-58.0	112.3	***	76.4	114.5	***	-16.4	70.8	***
	КЭКВ	2.4	0.3		0.6	0.1		4.1	2.9		2.9	0.3		-5.8	0.7		1.7	0.8	
	Sz	0.2	0.0		0.0	0.0		0.5	0.0		0.3	0.0		-0.5	0.0		0.1	0.0	
	Q _{аб}	-38.9	75.4	***	-31.6	361.0	***	26.7	120.7	***	-34.1	38.9	***	-41.0	33.0	***	2.0	1.1	

1.3 Разработка методик для определения степени тепловой и гидравлической разбалансированности систем тепло- и водоснабжения

1.3.1 Оценка параметров, влияющих на степень тепловой и гидравлической разбалансированности систем тепло- и водоснабжения

Для оценки качества теплоснабжения потребителей, подключенных к тепловым сетям, можно рекомендовать методику, приведённую в [7].

При отсутствии теплосчетчика у потребителя количество тепловой энергии, определенное по прибору источника теплоснабжения, после вычета нормативных и активированных потерь тепловой сети распределяется по отдельным зданиям пропорционально проектной (или договорной) нагрузке. Но это обоснование весьма относительно, если потребители имеют проектный расход теплоносителя, чего в городской теплосети достигнуть практически невозможно.

В жилищно-коммунальном хозяйстве (даже при наличии приборов учета на балансе муниципальных служб) стоимость полученного количества тепловой энергии на отопление распределяется по потребителям пропорционально отапливаемой площади. Это второй этап несправедливого и незаконного распределения общей стоимости тепловой энергии по конечным потребителям, так как количество полученной тепловой энергии зависит не от отапливаемой площади, а от количества, состояния и режима теплоснабжения отопительных приборов.

Изменения состояния здания и его отопительной системы с годами неизбежны. Режим теплоснабжения (расход и температура теплоносителя) у потребителя, как правило, не соответствуют проектным условиям. Уточнение проектных отопительных характеристик здания путем определения термического сопротивления ограждающих конструкций требует много времени, средств, специального оборудования и квалифицированного персонала.

Даже при соответствии расчетных тепловых характеристик здания реальным значениям избежать несоответствия распределения теплоносителя по конечным потребителям расчетному гидравлическому режиму не всегда удастся. Сверхплановая, из-за перетопа или недотопа, дотация из городского бюджета областного города выливается в десятки миллионов рублей за отопительный сезон. При переходе на 100%-ную оплату отопления населением это могут быть убытки энергоснабжающей организации, вызванные неумением распределить теплоноситель в точном соответствии с договорной нагрузкой и несоответствием реального температурного графика расчетному.

Поэтому, в преддверии коммунальной реформы, представляется актуальным рассмотреть возможность определения количества тепловой энергии для отопления по данным эксплуатационных приборов теплового узла (манометров и термометров), которые большинство зданий имеют.

Суть предложения состоит в том, чтобы при отсутствии у потребителя стандартного регистрирующего прибора учета расчет количества принятой для отопления тепловой энергии ($Q_{i\delta}$, Гкал/ч) производить не пропорционально договорной нагрузке, а так, как этого требуют правила учета тепловой энергии: по расходу (G , т/ч) и средней за расчетный период разнице температур теплоносителя ($t_1 - t_2, ^\circ\tilde{N}$), которые контролируются приборами в тепловом пункте здания. Это выглядит как

$$Q_{i\delta} = c \cdot G \cdot (t_1 - t_2) \cdot 0,001, \quad (1.3.1)$$

где:

c - теплоемкость воды, принимаемая в дальнейшем равной 1 ккал/кг \cdot $^\circ\text{C}$

Входящие в эту формулу величины:

Расход теплоносителя (G). Расход теплоносителя можно определить известным способом по значению диаметра шайбы или сопла элеватора (D_c , мм) и располагаемому напору (H , м), по показаниям манометров теплового узла по формуле:

$$G = 0,01 \cdot D_c^2 \cdot \sqrt{H}. \quad (1.3.2)$$

Температура теплоносителя на вводе в здание (t_1). Средняя за отчетный период температура теплоносителя на вводе в здание отличается от средней температуры теплоносителя на выходе с источника теплоснабжения, где она регистрируется прибором или записью в оперативном журнале, не более чем на 1-2 $^\circ\text{C}$. Эта разница для каждого здания легко определяется опытным путем и может быть согласована между поставщиком тепловой энергии и потребителем.

Кроме того, для определения среднемесячного значения t_1 на вводе в здание можно воспользоваться данными регистрирующих приборов учета других, близко расположенных зданий этой же тепловой сети, введя согласованную поправку, (до 1 $^\circ\text{C}$).

Конечно, если есть возможность, лучше иметь регистратор температуры воды в подающем трубопроводе. Стоимость, установка и обслуживание его много дешевле прибора учета

Температура теплоносителя на выходе из здания (t_2). Если расход теплоносителя для данного здания в рассматриваемый период времени величина постоянная, то t_2 для данного здания может быть найдена как функция t_1 по формуле

$$t_2 = \frac{(1 - 0,5 \cdot B) \cdot t_1 + (u + 1) \cdot B \cdot t_i}{1 + 0,5 \cdot B + u \cdot B}, \quad (1.3.3)$$

где:

u - коэффициент смешения воды; t_n - температура наружного воздуха; $B = k \cdot F / c \cdot G$ — безразмерный расходный коэффициент здания, представляющий собой отношение произведения приведенного коэффициента теплопередачи тепловой энергии от теплоносителя к наружному воздуху в реальных условиях данного здания и площади передачи тепловой энергии к расходу и теплоемкости теплоносителя.

Расходный коэффициент здания B при постоянном расходе теплоносителя в течение отопительного периода может быть принят величиной постоянной, которую можно определить с помощью измерения температур теплоносителя в тепловом пункте здания:

$$B = (t_1 - t_2) / \left[(t_{cp} - t_i) \cdot (u + 1) \right], \quad (1.3.4)$$

где:

u - коэффициент смешения; $t_{nd} = 0,5(t_3 + t_2)$ - средняя температура в приборах отопления здания; t_3 - температура теплоносителя после смесительного устройства теплового пункта здания.

Если по данным измерения температуры теплоносителя при данной температуре наружного воздуха коэффициент B не равен проектному значению, то или расход не проектный, или термическое сопротивление системы отопления и здания, или то и другое вместе, не проектные.

Формулы (1.3.3) и (1.3.4) получены из обычного условия баланса количества тепловой энергии теплоносителя, переданного за счет теплопередачи в окружающую среду:

$$c \cdot G \cdot (t_1 - t_2) = k \cdot F (t_{cp} - t_i) \quad (1.3.5)$$

Если для данного здания по показаниям манометров теплового пункта известен постоянный располагаемый напор теплоносителя (H , м), известен диаметр устройства (D_c , мм), ограничивающего расход теплоносителя, то, измерив температуры теплоносителя (t_1 , t_2 , t_3), при данной температуре наружного воздуха, определяются постоянные (по крайней мере, на отопительный период) для данного здания B и u , которые легко контролируются. Используя их, можно определить количество тепловой энергии для отопления за любой период, за который известна средняя температура теплоносителя в подающей магистрали и температура наружного воздуха.

Таким образом, при использовании предлагаемой методики учета переданного потребителю количества тепловой энергии для отопления по данным приборов теплового узла здания нет необходимости:

- использовать проектную (договорную) максимальную часовую нагрузку здания;
- знать значение общего расхода тепловой энергии с источника;
- знать величину потерь от источника до потребителя.

То есть, нет необходимости в расчетах с потребителем использовать величины, которые трудно проверить поставщику или потребителю.

При отказе использовать данную методику для оценки реального теплоснабжения на отопление здания предлагаемый расчет может быть полезен:

- для экспресс-анализа соответствия договору (проекту или нормативу) режима теплоснабжения жилых и административных зданий;
- для экспресс-оценки эффективности теплосберегающих мероприятий;
- для оценки качества подготовки здания к отопительному сезону;
- при предварительном анализе спорных вопросов теплоснабжения;
- при оценке эффективности установки прибора учета.

При расчетах за отопление по проектным данным, тем более по тем, которые невозможно проверить (максимальные тепловые потери, удельная тепловая характеристика или удельный расход на отопление 1 м^2), неизбежны ошибки, обман, злоупотребление служебным положением и т. п.

Расчет по эксплуатационным приборам теплового пункта здания тоже не лишен недостатков. Главный из них - тоже ошибка в определении расхода и параметров теплоно-

сителя. Но эта ошибка измерений. Она контролируется, имеет доверительный интервал, в отличие от бесконтрольной ошибки расчета «по проектным данным».

Поэтому временное, до массовой установки современных приборов учета, использование данной методики повышает взаимное доверие партнеров по теплоснабжению. В условиях рыночных отношений это немаловажный фактор.

Анализ соответствия эксплуатационных данных проектным по отоплению жилых, общественных и производственных зданий проводится для оценки технического состояния системы и режима отопления зданий. Такая оценка полезна при приёме здания в эксплуатацию после завершения строительства, капитального и текущего ремонта и при заключении договора по теплоснабжению от источника.

Анализ соответствия проектных и фактических расходов воды и тепловых нагрузок подключённых зданий проводится в [6].

Влияние отклонений от проектного режима теплоснабжения на температуру в помещениях здания.

1. Нарушение температурного графика

Если теплопотери здания, режим и система отопления соответствуют проекту, в помещении поддерживается допустимая температура.

При постоянном расходе сетевой воды отношение перепада температур в подающем и обратном трубопроводах на входе в здание к перепаду температур внутри и снаружи здания есть величина практически постоянная.

$$(t_1 - t_2) / (t_a - t_i) = q \cdot V / G \cdot 10^{-3} \quad (1.3.6)$$

где:

t_1 и t_2 - температуры сетевой воды в подающем и обратном трубопроводах на входе в здание, °С;

где t_a и t_i - температуры воздуха внутри и снаружи здания, °С;

V – объём здания, м³;

q – удельная тепловая характеристика здания, ккал/(м³ч°С);

G – расход теплоносителя, т/ч.

Если удельная тепловая характеристика здания и расход теплоносителя – проектные, измерив температуры теплоносителя на входе и выходе из здания и температуру наружного воздуха, можно определить среднюю температуру внутри помещения, используя уравнение (1.3.6).

2. Расчёт теплопотребления эксплуатируемого здания

Для определения теплотребления эксплуатируемым зданием при принятом качественном регулировании отопительной нагрузки кроме температурного графика должен быть известен расход теплоносителя.

Расход теплоносителя G (т/ч) для эксплуатируемого здания, необходимый для подачи в здание расчётного количества тепловой энергии Q (Гкал/ч) при заданных температурах воды в подающем и обратном трубопроводах, определяется поставщиком тепла по проектной максимальной часовой теплотере здания $Q_{\text{max},i \text{ до},i \text{ до}}$ (Гкал/ч) при расчетной температуре наружного воздуха.

$$G = Q_{\text{max},i \text{ до},i \text{ до}} / (t_1 - t_2) \cdot 10^{-3} \quad (1.3.7)$$

Если имеет место дефицит тепловой энергии или сетевой воды, фактический расход теплоносителя $G_{\text{ф}}$ может быть меньше расчётного при существующей разнице температур воды в подающем и обратном трубопроводе, или меньше проектного.

Ограничения по расходу теплоносителя устанавливает поставщик тепловой энергии путём установки расчетной ограничительной шайбы или расчётного сопла элеватора (конуса). Размер (диаметр) отверстия (мм), ограничивающий расход теплоносителя, рассчитывается поставщиком тепловой энергии по располагаемому на данном участке перепаду давлений ΔH (м) в подающем и обратном трубопроводах и расходу теплоносителя по уравнению

$$D_c = 9,6 \cdot \sqrt[4]{G^2 / \Delta H} . \quad (1.3.8)$$

При установленной энергоснабжающей организацией ограничительной шайбе или известном диаметре сопла элеватора максимальный расход теплоносителя (т/ч) определяется по формуле

$$G = 0,01 \cdot D_c^2 \cdot \sqrt{\Delta H} . \quad (1.3.9)$$

Если имеется возможность, расход теплоносителя проверяется портативным переносным расходомером и в дальнейших расчетах используется измеренное значение расхода.

Результаты измерения или расчета $G_{\text{ф}}$ используются для определения фактического максимального теплотребления здания $Q_{\text{max},i \text{ до},i \text{ до}}$ по уравнению

$$Q_{i \text{ аа.д.}} = \frac{c_{\text{а}} \cdot G_{\text{д}} \cdot (t_{1,u} - t_{2,u}) \cdot (t_{\text{а.д.}} - t_{i.\text{д.}})}{(t_{\text{а}} - t_i)_u}, \quad (1.3.10)$$

где:

$t_{1,u}$ и $t_{2,u}$ - измеренные температуры теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах;

$(t_{\text{а}} - t_i)_u$ - разность температур воздуха внутри и снаружи здания в период измерения расхода;

$t_{\text{а.д.}}$ и $t_{i.\text{д.}}$ - соответственно внутренняя и наружная расчетные (нормативные) температуры воздуха.

3. Расчет максимального часового расхода теплоты (Гкал/ч) по измеренной (заданной) максимальной разнице температур в подающем и обратном трубопроводах и измеренном (заданном) расходе сетевой воды производится по уравнению:

$$Q_{i \text{ аа.д.}} = G_{\text{д}} \cdot c \cdot (t_{1,u} - t_{2,u})_{\text{д}} \cdot 10^{-3}, \quad (1.3.11)$$

где:

c – теплоемкость воды, принимается 1 ккал/(кг·°С).

4. Расчет (проверка) температуры внутри помещения по измеренному расходу тепловой энергии

Исходные данные:

- проектный часовой расход тепла $Q_{i.\text{д.}}$, Гкал/ч;
- измеренный (заданный) расход сетевой воды $G_{\text{ф}}$, т/ч;
- измеренные (заданные) температуры воды в подающем t_1 и обратном t_2 трубопроводах;
- измеренная (заданная) температура наружного воздуха t_i .

Расчетная по данным измерений расхода и температур теплоносителя температура внутри помещения

$$t_{\text{а}} = (t_{\text{а.д.}} - t_{i.\text{д.}}) \cdot \frac{c \cdot G_{\text{д}} \cdot (t_{1.\text{д.}} - t_{2.\text{д.}}) \cdot 10^{-3}}{Q_{i.\text{д.}}} + t_i. \quad (1.3.12)$$

Этой формулой можно пользоваться только для ориентировочной оценки влияния на температуру в помещении изменения температуры и расхода теплоносителя, если система отопления в помещении проектная.

Большая разница измеренной и рассчитанной по (1.3.12) температурам свидетельствует о большом несоответствии проектных и фактических теплотерь помещения.

5. Расчет удельной тепловой характеристики эксплуатируемого здания или отдельного помещения по данным измерении.

- объём здания по наружному обмеру, $V_{зд}$, м³;
- рассчитанный по данным измерений часовой расход тепла Q_u , Гкал/ч;
- измеренная температура наружного воздуха t_n , °С;
- измеренная температура внутри помещения t_b , °С.

Расчетная по данным измерений удельная тепловая характеристика здания $q_{\dot{a}.v}$, ккал/(м³ч°С) или $q_{\dot{a}.F}$, (ккал/(м²ч°С) находится по зависимостям

$$q_{\dot{a}.v} = \frac{Q_u}{V_{\dot{a}}(t_{\dot{a}} - t_i)} \quad \text{или} \quad q_{\dot{a}.F} = \frac{Q_u}{F(t_{\dot{a}.e} - t_{i.e})}. \quad (1.3.13)$$

6. Определения теплотребления встроенных помещений

Если нет возможности измерить расход и температуры теплоносителя, поступающего во внутреннее помещение, для определения фактического теплотребления необходимо использовать уравнение теплопередачи.

Исходными (измеренными) в данном случае является площадь $F_{от}$ (м²), средняя температура греющей поверхности приборов отопления $t_{ср.от}$ и температура в помещении t_b .

$$Q_{\dot{a}.\dot{o}} = k \cdot F_{\dot{o}} \cdot (t_{\dot{a}.e} - t_{\dot{o}}). \quad (1.3.14)$$

Коэффициент теплопередачи принимается по справочным данным. При отсутствии их можно ориентировочно принять $k=8$ ккал/м²ч°С.

7. Оценка соответствия фактического расхода теплоносителя расчётному по данным измерения температур теплоносителя

Соответствие фактического расхода воды расчетному с достаточной для наладочных работ точностью, используя следующие зависимости (1.3.10), (1.3.11) при подмешивании обратной воды в прямую.

$$y = \frac{G_{\delta}}{G_{\delta}} = \frac{(t_{1,\delta} - t_{2,\delta}) \cdot (t_{3,\delta} + t_{2,\delta} - 2 \cdot t_{a,\delta})}{(t_{1,\delta} - t_{2,\delta}) \cdot (t_{3,\delta} + t_{2,\delta} - 2 \cdot t_{a,\delta})} \quad (1.3.15)$$

Без подмешивающих устройств

$$y = \frac{G_{\delta}}{G_{\delta}} = \frac{(t_{1,\delta} - t_{2,\delta}) \cdot (t_{1,\delta} + t_{2,\delta} - 2 \cdot t_{a,\delta})}{(t_{1,\delta} - t_{2,\delta}) \cdot (t_{1,\delta} + t_{2,\delta} - 2 \cdot t_{a,\delta})} \quad (1.3.16)$$

Для отопительно-вентиляционной установки с забором наружного воздуха

$$y = \frac{G_{\delta}}{G_{\delta}} = \frac{(t_{1,\delta} - t_{2,\delta}) \cdot (t_{1,\delta} + t_{2,\delta} - 2 \cdot \tau_i)}{(t_{1,\delta} - t_{2,\delta}) \cdot (t_{1,\delta} + t_{2,\delta} - 2 \cdot \tau_i)} \quad (1.3.17)$$

Для сверки теплового баланса с уравнением теплопередачи

$$\frac{G_{\delta} \cdot \tilde{n}_{\delta} \cdot (t_{1,\delta} - t_{2,\delta})}{G_{\delta} \cdot \tilde{n}_{\delta} \cdot (t_{1,\delta} - t_{2,\delta})} = \frac{Q_{\delta}}{Q_{\delta}} = \frac{F_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot \Delta t_{\tilde{n}\delta,\delta}}{F_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot \Delta t_{\tilde{n}\delta,\delta}} \quad (1.3.18)$$

где:

$y = \frac{G_{\delta}}{G_{\delta}}$ - отношение фактического расхода сетевой воды к расчетному;

$t_{1,\delta}$, $t_{2,\delta}$, $t_{3,\delta}$ - соответственно измеренное на вводе температура воды в подающем трубопроводе, после смешения в элеваторе и обратном, °С.

$t_{2,\delta}$, $t_{3,\delta}$ - температуры обратной и смешанной воды по температурному графику, соответствующие измеренной температуре воды в подающем трубопроводе;

$t_{a,\delta}$, $t_{a,\delta}$ - фактическая и расчетная температуры воздуха внутри помещения;

τ_i - температура наружного воздуха.

1.3.2 Методика определения степени тепловой разбалансированности

Оценка расхода тепла на отопление подключённых зданий приведена в [8], [9].

Метод проверки соответствия фактической отопительной нагрузки абонентских установок расчётной нагрузке основывается на показаниях термометров, установленных на абонентских вводах.

По отклонению действительной температуры обратной воды от расчётного значения $\delta\tau_2 = \tau_2 - \tau_{2D}$ можно во многих случаях не только качественно оценить наличие перерасходов или недорасхода тепла на отопление, но и количественно определить отклонение действительной отопительной нагрузки от расчётной, т.е. определить $\delta\bar{Q} = \bar{Q} - \bar{Q}_D$, а также расход сетевой воды, вызвавшей данный перерасход или недорасход тепла на отопление.

$$\tau_2 = \tau_1 - \frac{\tau_1 - t_H - \bar{Q}(t_{B,P} - t_{H,O}) - \Delta t' \cdot \bar{Q}^{0,8}}{(0,5 + u) / (1 + u)} \quad (1.3.19)$$

где:

τ_1, τ_2, τ_3 - фактические температуры воды в подающей линии тепловой сети, после отопительной установки и на входе в отопительный прибор при произвольной наружной температуре $t_H, ^\circ\text{C}$;

$\bar{Q} = Q / Q' = (t_B - t_H) / (t_{B,P} - t_{H,O})$ - фактическая относительная отопительная нагрузка при произвольной наружной температуре t_H ;

Q - фактическая тепловая нагрузка отопительной установки при наружной температуре t_H , кДж/с;

Q' - расчётная тепловая нагрузка отопительной установки при расчётной для отопления температуре наружного воздуха $t_{H,i}$, кДж/с;

t_B - фактическая внутренняя температура отапливаемых помещений, $^\circ\text{C}$;

$t_{B,P}$ - расчётная внутренняя температура, $^\circ\text{C}$;

$t_{H,O}$ - расчётная наружная температура для проектирования отопления, $^\circ\text{C}$;

$\Delta t' = [0,5(\tau'_3 + \tau'_2) - t_{B,P}]$ - расчётный температурный напор в отопительных приборах, $^\circ\text{C}$;

$\tau'_1, \tau'_2, \tau'_3$ - расчётные температуры воды в подающей линии тепловой сети, после отопительной и на входе в отопительный прибор при наружной температуре $t_{H,O}$;

$u = (\tau_1 - \tau_3) / (\tau_3 - \tau_2) = \partial\tau / \Theta - 1$ - коэффициент смешения элеваторного узла, где $\partial\tau = \tau_1 - \tau_2$ $\Theta = \tau_3 - \tau_2$ при произвольной наружной температуре t_H .

На основе уравнения (1.3.19) может быть найдена зависимость отклонения фактической обратной температуры τ_2 от расчетной τ_{2P} ($\partial\tau_2 = \tau_2 - \tau_{2P}$) от изменения относительной отопительной нагрузки \bar{Q} от расчетного значения \bar{Q}_P ($\partial\bar{Q} = \bar{Q} - \bar{Q}_P$) и других параметров системы.

$$u = u_p = \partial\tau' / \Theta' - 1$$

$$\frac{\partial\tau_2}{\partial\bar{Q}} = \frac{(t_{B.P} - t_{H.O}) + 0,8 \cdot \Delta t' / \bar{Q}^{0,2}}{(0,5 + u) / (1 + u)} \quad (1.3.20)$$

где:

$\frac{\partial\tau_2}{\partial\bar{Q}}$ - положительная величина, так как правая часть уравнения (1.3.20) положительная. Это значит, что с ростом относительной отопительной нагрузки \bar{Q} ($\partial\bar{Q} > 0$) температура обратной воды τ_2 повышается ($\partial\tau_2 > 0$). Соответственно при снижении \bar{Q} ($\partial\bar{Q} < 0$) уменьшается τ_2 ($\partial\tau_2 < 0$).

Уравнение (1.3.22) может быть представлено в другой модификации:

$$\frac{\partial\bar{Q}}{\partial\tau_2} = \frac{(0,5 + u) / (1 + u)}{(t_{B.P} - t_{H.O}) + 0,8 \cdot \Delta t' / \bar{Q}^{0,2}} \quad (1.3.21)$$

При $\partial\tau_2 = 1^\circ C$ правая часть уравнения (1.3.21) представляет изменение относительной отопительной нагрузки на $1^\circ C$ изменения температуры обратной воды ($\bar{q}, 1^\circ C$)

$$\bar{q} = \frac{(0,5 + u) / (1 + u)}{(t_{B.P} - t_{H.O}) + 0,8 \cdot \Delta t' / \bar{Q}^{0,2}} \quad (1.3.22)$$

Формула (1.3.22) действительна только в том случае, когда выдерживаются расчетные температуры воды в подающей линии сети и коэффициент смешения на абонентском вводе, т. е. при $\tau_1 = \tau_{1P}$ и $u = u_p$.

Для наиболее длительного диапазона стояния отопительных нагрузок \bar{Q} от 0,4 до 1,0 можно для приближенных расчетов (с погрешностью не более 6%) принять при рассматриваемых расчетных параметрах отопительных установок $\bar{q} = 0,00848 \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

При отклонении, фактической температуры обратной воды от расчетной на величину $\delta\tau_2$ отклонение фактической относительной отопительной нагрузки \bar{Q} от расчетной \bar{Q}^p составляет

$$\delta\bar{Q} = \bar{q}\delta\tau_2 \quad (1.3.23)$$

Перерасход (или недорасход) тепла на отопление ΔQ (кДж/с) составляет при этом

$$\Delta Q = Q' \cdot \delta\bar{Q} = Q' \cdot \bar{q}\delta\tau_2 \quad (1.3.24)$$

Относительный эквивалент расхода сетевой воды на отопление \bar{W} в рассматриваемом режиме находится на основе уравнения характеристики отопительных установок, которое приводится к следующему виду:

$$\bar{W} = \frac{(0,5 + u) \cdot \delta\tau' / (1 + u)}{(t_1 - t_H) / \bar{Q} - (t_{B.P} - t_{H.O}) - \Delta t' / \bar{Q}^{0,2}}, \quad (1.3.25)$$

где:

$\bar{Q} = \bar{Q}_p + \delta\bar{Q}$ - отклонение относительного эквивалента расхода сетевой воды от расчетного;

$$\delta\bar{W} = \bar{W} - 1 \quad - \quad (1.3.26)$$

- перерасход (или недорасход) сетевой воды на отопление ΔW , [кДж/(с·°C)]:

$$\Delta\bar{W} = \bar{W} \cdot \delta\bar{W} \quad (1.3.27)$$

В том случае, когда расчетная температура в подающей линии сетевой воды или расчетный коэффициент смешения элеваторов не выдерживаются, т. е. при $\tau_1 \neq \tau_{1p}$ и $u \neq u_p$, фактическая относительная отопительная нагрузка \bar{Q} определяется по уравнению (1.3.28), полученному из уравнения (1.3.19) путем его решения относительно \bar{Q} :

$$\bar{Q} = \frac{(t_1 - t_H) - (t_1 - t_2) \cdot (0,5 + u) / (1 + u)}{(t_{B.P} - t_{H.O}) - \Delta t' / \bar{Q}^{0,2}}. \quad (1.3.28)$$

Поскольку искомая величина \bar{Q} входит в правую и левую части уравнения, то задача решается методом постепенных приближений. Сначала принимают $\bar{Q}^{0,2} = 1$, затем уточняют значение \bar{Q} . Обычно достаточно точное решение находится после второго уточнения.

Как видно из уравнения (1.3.28), при неизменном значении τ_2 снижение τ_1 приводит к снижению \bar{Q} , а снижение u — к повышению \bar{Q} .

Относительный эквивалент расхода сетевой воды определяется по уравнению (1.3.25). Отклонение относительной отопительной нагрузки от расчетной при произвольной наружной температуре t_H

$$\partial \bar{Q} = \bar{Q} - \frac{t_{B.P} - t_H}{t_{B.P} - t_{H.O}}. \quad (1.3.29)$$

Перерасход или недорасход тепла на отопление ΔQ (кДж/с):

$$\Delta Q = Q' \cdot \partial \bar{Q}. \quad (1.3.30)$$

Перерасход (или недорасход) сетевой воды на [кДж/(с·°C)] определяется по формулам (1.3.26), (1.3.27).

Отопительная нагрузка является основной тепловой нагрузкой во многих городах нашей страны. Для обеспечения комфортных условий в отапливаемых зданиях подача тепла на отопление должна быть равна тепловым потерям. Подача избыточного количества тепла, так же как и недодача тепла на отопление, приводит к нарушению комфортных бытовых условий.

При современных системах централизованного теплоснабжения городов, когда от единой двухтрубной водяной тепловой сети удовлетворяются различные тепловые нагрузки — отопление, вентиляция, горячее водоснабжение, изменяющиеся по различным законам, полное соответствие подачи тепла на отопление фактическим теплотерям зданий может быть достигнуто только при автоматическом регулировании групповых и местных тепловых подстанций (абонентских вводов). В этом заключается одно из основных направлений прогресса в области централизованного теплоснабжения. Однако авторегулирование получило пока ограниченное применение в централизованном теплоснабжении. Причины — высокая начальная стоимость, дефицитность электронной аппаратуры, недостаток квалифицированных кадров.

При ограниченном использовании авторегулирующих приборов контроль и наладку режима теплового потребления абонентских установок приходится проводить по приборам учета тепла. Однако и в этой области создались неблагоприятные условия в связи с прекращением промышленного производства теплосчетчиков и водосчетчиков горячей воды.

Поэтому весьма важной задачей представляется разработка метода проверки и контроля соответствия фактической отопительной нагрузки абонентских установок расчетной нагрузке по показаниям термометров, установленных на абонентских вводах.

Как показано в [8], по величине отклонения действительной температуры обратной воды после отопительной установки τ_2 от ее расчетной величины τ_2^p для данной наружной температуры t_H т. е. по разности $\partial\tau_2 = \tau_2 - \tau_2^p$, можно не только качественно оценить наличие перерасхода или недорасхода тепла на отопление, но и количественно определить величину отклонения действительной нагрузки Q от ее расчетного значения Q^p . По найденной величине перерасхода или недодачи тепла при данной наружной температуре t_H , т. е. по величине $\Delta Q = Q - Q^p$ можно также определить величину отклонения действительного расхода сетевой воды на отопление W от расчетного расхода W_p , т. е. найти перерасход или недорасход сетевой воды на отопление $\Delta W = W - W_p$.

Из совместного решения балансового уравнения отопительной установки

$$\bar{Q} = \bar{W}(\tau_1 - \tau_2) / \delta\tau', \quad (1.3.31)$$

и уравнения характеристики отопительной установки (1.3.32)

$$\bar{Q} = \frac{\tau_1 - t_H}{(t_{B.P.} - t_{H.O}) + \frac{\Delta t'}{\bar{Q}^{0,2}} + \frac{0,5 + u}{1 + u} \cdot \frac{\delta\tau'}{\bar{W}}}; \quad (1.3.32)$$

выводится следующее уравнение для рассматриваемой задачи

$$\bar{Q} = \frac{\frac{0,5}{1+u} \cdot \tau_1 + \frac{0,5+u}{1+u} \cdot \tau_2 - t_H}{t_{B.P.} - t_{H.O} + \frac{\Delta t'}{\bar{Q}^{0,2}}}, \quad (1.3.33)$$

Следует отметить, что уравнения (1.3.31) — (1.3.33) относятся к так называемому установившемуся режиму работы отопительной установки, т. е. к режиму, имеющему место в течение продолжительного времени. Поэтому в тех случаях, когда переменный режим горячего водоснабжения нарушает стабильность работы отопительной установки (например, при двухступенчатом последовательном включении отопления и горячего водоснабжения) замеры параметров теплоносителя до и после отопительной установки должны проводиться в периоды малой нагрузки горячего водоснабжения, например, в ночное время. В приведенных уравнениях:

$\bar{Q} = Q / Q' = (t_B - t_H) / (t_{B.P.} - t_{H.O})$ - фактическая относительная отопительная нагрузка при произвольной наружной температуре t_H ; Q — фактическая тепловая нагрузка отопительной установки при наружной температуре t_H , кДж/с; Q' — расчетная тепловая нагрузка отопительной установки при расчетной для отопления наружной температуре t_H , кДж/с; t_B — фактическая внутренняя температура отапливаемых помещений, °C; $t_{B.P.}$ — расчетная внутренняя температура (для жилых зданий $t_{B.P.} = 18$ °C); $t_{H.O}$ — расчетная наружная температура для проектирования отопления, °C; $\bar{W} = \frac{W}{W'}$ - относительный эквивалент расхода сетевой воды на отопление при произвольной наружной температуре W — фактический эквивалент расхода сетевой воды на отопление при наружной температуре t_H ; кДж/(с·°C); W' - расчетный эквивалент расхода сетевой воды на отопление при

наружной температуре $t_{H.O}$, кДж/(с·°C); τ_1 и τ_2 — фактические температуры воды на входе в отопительную установку и на выходе из нее при произвольной наружной температуре t_H , °C; $\Delta t' = 0,5(\tau'_3 + \tau'_2) - t_{B.P}$ — расчетный температурный напор в отопительном приборе, °C; τ'_3 — расчетная температура воды на входе в отопительный прибор при наружной температуре $t_{H.O}$, °C; τ'_2 — расчетная температура воды на выходе из отопительного прибора при наружной температуре $t_{H.O}$, °C;

$u = (\tau_1 - \tau_3) / (\tau_3 - \tau_2)$ - фактический коэффициент смешения элеваторного узла;

τ_3 — температура воды на входе в отопительный прибор при произвольной наружной температуре t_H , °C;

$u' = (\tau'_1 - \tau'_3) / (\tau'_3 - \tau'_2)$ - расчетный коэффициент смешения элеваторного узла; τ'_1 — расчетная температура воды в подающей линии тепловой сети при наружной температуре $t_{H.O}$, °C; $\partial \tau' = (\tau'_1 - \tau'_2)$ — расчетный перепад температур в отопительной установке. Обычно коэффициент смешения элеватора остается постоянным и равным расчетному значению при любых фактических температурах сетевой воды, поэтому $u = u'$.

При отклонении фактических температур воды τ_1 и τ_2 от их расчетных значений при данной наружной температуре t_H происходит отклонение фактической относительной отопительной нагрузки \bar{Q} от его расчетного значения при этой же наружной температуре.

Как следует из уравнения (1.3.33), завышение температур τ_1 и τ_2 по сравнению с их расчетными значениями при данной наружной температуре приводит к увеличению относительной отопительной нагрузки, т. е. к перерасходу тепла. Занижение температур τ_1 и τ_2 приводит к обратному эффекту, т. е. к недодаче тепла.

Количественное влияние величины отклонения температур τ_1 и τ_2 на величину изменения относительной отопительной нагрузки легко установить путем дифференцирования уравнения (1.3.33) по $\partial \tau_1$ и $\partial \tau_2$. При одновременном отклонении обеих температур τ_1 и τ_2 от их расчетных значений при данной наружной температуре t_H относительный перерасход или относительная недодача тепла на отопление равны

$$\partial \bar{Q} = \bar{q}_1 \cdot \partial \tau_1 + \bar{q}_2 \cdot \partial \tau_2. \quad (1.3.34)$$

Положительный знак $\partial\bar{Q}$ соответствует перерасходу тепла, отрицательный знак — недодаче тепла.

$$\bar{q}_1 = \frac{0,5}{(1+u)\left(t_{B.P} - t_{H.O} + 0,8 \frac{\Delta t'}{\bar{Q}^{0,2}}\right)}; \quad (1.3.35)$$

$$\bar{q}_2 = \frac{(0,5+u)}{(1+u)\left(t_{B.P} - t_{H.O} + 0,8 \frac{\Delta t'}{\bar{Q}^{0,2}}\right)}; \quad (1.3.36)$$

где:

\bar{q}_1, \bar{q}_2 ; - коэффициенты изменения относительной отопительной нагрузки на 1 °С отклонения температуры воды перед отопительной установкой и после нее, 1 °С;

$$\partial\tau_1 = \tau_1 - \tau_1^p, \quad \partial\tau_2 = \tau_2 - \tau_2^p, \quad \partial\bar{Q} = \bar{Q} - \bar{Q}^p;$$

τ_1, τ_2, \bar{Q} - фактические значения температур сетевой воды и относительного расхода тепла на отопление при произвольной наружной температуре t_H ;

$\tau_1^p, \tau_2^p, \bar{Q}^p$ — этих параметров при той же наружной температуре t_H .

Как следует из уравнений (1.3.35) и (1.3.36), коэффициенты \bar{q}_1 и \bar{q}_2 являются практически постоянными для данной отопительной установки, характеризуемой заданными значениями $\Delta t'$ и и.

Зависимость \bar{q}_1 и \bar{q}_2 от \bar{Q} весьма слабая. С увеличением \bar{Q} значения \bar{q}_1 и \bar{q}_2 несколько возрастают.

При расчете коэффициентов \bar{q}_1 и \bar{q}_2 по уравнениям (1.3.35) и (1.3.36) можно с достаточной точностью принимать $\bar{Q} = \bar{Q}^p$, т. е. считать, что \bar{Q} зависит только от наружной температуры

$$\bar{Q}^p = (t_{B.P} - t_H) / (t_{B.P} - t_{H.O}) \quad (1.3.37)$$

Если определить значения \bar{q}_1 и \bar{q}_2 при некотором усредненном значении $\bar{Q}^p = 0,6$, то в диапазоне значений \bar{Q}^p от 0,4 до 1,0, охватывающем основную длительность отопи-

тельного сезона, максимальное расхождение между полученными значениями \bar{q}_1 и \bar{q}_2 и их точными значениями не превосходят 6 %. В частности, при широко применяемых в современных системах централизованного теплоснабжения городов расчетных параметрах $\tau'_1 = 150$ °С, $\tau'_2 = 70$ °С, что соответствует $u = 2,2$ и $\Delta t' = 64,5$ °С, значения коэффициентов изменения отопительной нагрузки при $t_{B.P} - t_{H.O} = 43$ °С и $\bar{Q}^P = 0,6$ составляют по формулам (1.3.35) и (1.3.36):

$$\bar{q}_1 = 0,00156 \cdot 10^6 \cdot \tilde{N} \quad \text{и} \quad \bar{q}_2 = 0,008411 \cdot 10^6 \cdot \tilde{N}$$

По величине относительного перерасхода или недодачи тепла на отопление можно также определить величину изменения внутренней температуры в отапливаемых помещениях

$$\partial t_B = t_B - t_{B.P} = \partial \bar{Q}(t_{B.P} - t_{H.O}) \quad (1.3.38)$$

Из уравнений (1.3.35) и (1.3.36) следует

$$\frac{\bar{q}_2}{\bar{q}_1} = 1 + 2u \quad (1.3.39)$$

Это значит, что при $u > 0$, что практически имеет место во всех городских системах централизованного теплоснабжения, отклонение температуры воды после отопительной системы от расчетного значения на некоторую величину $\partial \tau_2$ существенно сильнее влияет на величину изменения относительной нагрузки $\partial \bar{Q}$ по сравнению с такой же величиной отклонения температуры сетевой воды на входе в отопительную систему $\partial \tau_1$.

В частности, при широко применяемых в современных городских системах централизованного теплоснабжения параметрах теплоносителя, при которых коэффициент смешения элеваторов $u = 2,2$, отклонение от расчетной величины на 1 °С температуры воды после отопительной установки вызывает такое же изменение отопительной нагрузки, как отклонение от расчетной величины температуры воды перед отопительной установкой на 5,4 °С.

Формулы (1.3.35) и (1.3.36) для расчета коэффициентов изменения отопительной нагрузки принципиально применимы при любой схеме присоединения отопительной

нагрузки к тепловой сети. В частности, при зависимой схеме присоединения без смешительного узла, когда коэффициент смешения

$$\bar{q}_1 = \bar{q}_2 = \frac{0,5}{t_{B.P} - t_{H.O} + 0,8 \frac{\Delta t'}{\bar{Q}^{0,2}}}. \quad (1.3.40)$$

При этой схеме присоединения отклонение от расчетной величины температуры воды после отопительной системы вызывает такое же изменение относительной отопительной нагрузки, как отклонение на такую же величину температуры сетевой воды перед отопительной установкой.

Формулы (1.3.35) и (1.3.36) полностью применимы также при независимой схеме присоединения отопительной установки к тепловой сети, т. е. при присоединении через водо-водяной теплообменник. В этом случае следует, под τ_1 и τ_2 понимать температуры воды во вторичном контуре, а именно: $\tau_1 = \tau_{01}$ — температура воды непосредственно перед отопительной установкой; $\tau_2 = \tau_{02}$ — температура воды на выходе из отопительной установки.

При воздушном отоплении коэффициент теплопередачи водовоздушных калориферов очень слабо зависит от температурного напора и является практически постоянной величиной, т. е. $\bar{k} = 1$. Кроме того, при воздушном отоплении отсутствуют смешительные узлы на абонентских вводах. В этих условиях уравнение (1.3.33) принимает вид

$$\bar{Q} = \frac{0,5(\tau_1 + \tau_2) - t_H}{t_{B.P} - t_{H.O} + \Delta t'}. \quad (1.3.41)$$

Из дифференцирования уравнения (1.3.41) следует

$$\bar{q}_1 = \bar{q}_2 = \frac{0,5}{t_{B.P} - t_{H.O} + \Delta t'}, \quad (1.3.42)$$

где $\Delta t' = 0,5(\tau_1 + \tau_2) - t_{B.P}$ — расчетный температурный напор в водовоздушном калорифере при расчетной наружной температуре.

Абсолютная величина перерасхода или недодачи тепла на отопление по сравнению с расчетным расходом тепла при данной наружной температуре.

$$\Delta Q = Q - Q^P = (\bar{q}_1 \cdot \partial\tau_1 + \bar{q}_2 \cdot \partial\tau_2) \cdot Q'. \quad (1.3.43)$$

Положительный знак ΔQ означает перерасход, отрицательный знак — недодача тепла.

Относительный эквивалент расхода сетевой воды на отопление находится из уравнения характеристики отопительной установки (1.3.32).

$$\bar{W} = \frac{0,5 + u}{1 + u} \delta\tau' \frac{1}{\frac{t_1 - t_H}{\bar{Q}} - (t_{B.P} - t_{H.O}) - \frac{\Delta t'}{\bar{Q}^{0,2}}} \quad (1.3.44)$$

Уравнение (1.3.44) принципиально применимо при любой схеме присоединения отопительной установки к тепловой сети. В частности, при зависимом присоединении без смесительного узла, $u = 0$.

$$\bar{W} = \frac{0,5\delta\tau'}{\frac{t_1 - t_H}{\bar{Q}} - (t_{B.P} - t_{H.O}) - \frac{\Delta t'}{\bar{Q}^{0,2}}} \quad (1.3.45)$$

Для воздушного отопления

$$\bar{W} = \frac{0,5\delta\tau'}{\frac{t_1 - t_H}{\bar{Q}} - (t_{B.P} - t_{H.O}) - \Delta t'} \quad (1.3.46)$$

При использовании уравнений (1.3.44) — (1.3.46) следует под \bar{Q} понимать фактическую относительную отопительную нагрузку

$$\bar{Q} = \bar{Q}^P + \partial\bar{Q}. \quad (1.3.47)$$

Относительный эквивалент расхода воды на отопление можно также определить из балансового уравнения (1.3.31). Подставив в это уравнение значения

$\tau_1 - \tau_2 = \tau_1^P - \tau_2^P + \partial\tau_1 - \partial\tau_2$ и $\frac{\tau_1^P - \tau_2^P}{\delta\tau'} = \bar{Q}^P$ получим выражение для определения \bar{W}

$$\bar{W} = \frac{\bar{Q}^P + \partial\bar{Q}}{\bar{Q}^P + \frac{\partial\tau_1 - \partial\tau_2}{\delta\tau'}}. \quad (1.3.48)$$

Абсолютное значение фактического эквивалента расхода сетевой воды

$$W = \bar{W} \cdot W'; \quad (1.3.49)$$

где:

$$W' = \frac{Q'}{\delta\tau'} \text{ — расчетный эквивалент расхода сетевой воды на отопление, кДж/(с·°C).}$$

Отклонение относительного эквивалента расхода сетевой воды от расчетного значения

$$\partial\bar{W} = \bar{W} - 1 \quad - \quad (1.3.50)$$

- абсолютное значение перерасхода или недорасхода сетевой воды

$$\Delta W = W' \cdot \partial\bar{W} \quad (1.3.51)$$

Проведение наладочных работ в соответствии с требованием Правил эксплуатации тепловых сетей вызывает необходимость их контроля, [10].

Наладка системы теплоснабжения является последним завершающим этапом подготовки к началу отопительного сезона.

От качества проведенной наладки зависит степень комфортности в отапливаемых помещениях и экономичная работа источника тепловой энергии.

При оснащении узла управления потребительской системы приборами КИП, включая теплосчетчик, соответствие расчетного и фактического режимов проверить не сложно, сравнив значения расходов и температур теплоносителя и тепловой нагрузки при текущей температуре наружного воздуха. А как быть в условиях минимальной оснащённости узлов управления приборами КИП или их полного отсутствия?

При отсутствии приборов КИП с некоторой точностью могут быть лишь получены значения температур теплоносителя до и после системы отопления, измеренные, например, контактными термометрами или бесконтактными пирометрами.

На первый взгляд можно только констатировать степень отклонения полученных значений температур от расчетных. Если температура теплоносителя в подающем трубопроводе при без элеваторной схеме подключения потребителя равна или несколько меньше этой же температуры на источнике тепла, то температура в обратном трубопроводе после системы отопления колеблется в широких пределах относительно расчетного значения. При этом обычно принято считать, что завышение температуры «обратки» свидетельствует о завышенном расходе теплоносителя через систему отопления и к такому потребителю нужно «принимать меры». И, наоборот, при низкой температуре теплоносителя после системы отопления данный потребитель обделен теплотой и вниманием со стороны теплоснабжающей организации.

Основным методом регулирования отпуска потребителям тепловой энергии, применяемым в настоящее время, является качественный метод. Качественный метод заключается в изменении на источнике тепла температуры теплоносителя, направляемого с постоянным расходом в тепловую сеть, в зависимости от температуры наружного воздуха таким образом, чтобы температура воздуха внутри отапливаемых помещений поддерживалась постоянной.

Постоянство расхода теплоносителя при этом обеспечивается установкой в узлах управления отопительных систем ограничительных дроссельных диафрагм. Диаметры отверстий ограничительных диафрагм определяются исходя из подачи расчетного расхода теплоносителя в зависимости от перепадов напоров перед узлом управления и в системе отопления.

Часто, по ряду причин, главным образом ввиду неполной достоверности исходной информации (отклонения от расчетных значений геометрических, гидравлических и тепловых характеристик тепловых сетей и систем отопления), фактические расходы теплоносителя оказываются не соответствующими расчетным и требуют корректировки. Действительно, после установки в узлах управления ограничительных дроссельных диафрагм у некоторых потребителей выявляются отклонения от расчетного режима, выражающиеся в конечном итоге в перетопе или недотопе здания.

Теория

Стационарный процесс (независящий от времени) отопления здания можно описать системой из трех уравнений. При нестационарном процессе имеет место изменение во времени температур теплоносителя в системе теплоснабжения, вызванное изменением погодных условий, изменением тепловой мощности источника тепла, а также транспортным запаздыванием при движении теплоносителя в тепловых сетях. Системы отопления обла-

дают большой тепловой инерцией (постоянная времени зданий $T = 20 \dots 60$ часов). В связи с этим изменения температур теплоносителя в обратном трубопроводе существенно запаздывают в сравнении с изменением температур теплоносителя в подающем трубопроводе.

Первое уравнение. Тепловой поток на компенсацию тепловых потерь зданием:

$$Q = (t_a - t_i) \cdot \sum (K_i \cdot F_i)_{\zeta \ddot{a}}, \quad (1.3.52)$$

где:

t_a - температура воздуха в отапливаемом помещении;

t_i - температура наружного воздуха;

$\sum (K_i \cdot F_i)_{\zeta \ddot{a}}$ - сумма произведений коэффициентов теплопередачи отдельных ограждающих конструкций здания на их поверхности.

Комплекс $\sum (K_i \cdot F_i)_{\zeta \ddot{a}}$ можно выразить через расчетные значения тепловой нагрузки и расчетной разности температур:

$$\sum (K_i \cdot F_i)_{\zeta \ddot{a}} = p \frac{Q_p}{\Delta t_p}, \quad (1.3.53)$$

где p - параметр, характеризующий соответствие фактических суммарных тепловых потерь ограждающими конструкциями здания расчетному значению. Проектное значение параметра $p = 1$. При $p > 1$ фактическая тепловая нагрузка здания превышает проектную. Подстрочные индексы «р» здесь и далее обозначают расчетное значение.

В безразмерном виде уравнение (1.3.52) представится:

$$Q = p \frac{t_a - t_i}{\Delta t_p}, \quad (1.3.54)$$

Второе уравнение. Тепловой поток, выделяемый нагревательными приборами:

$$Q = \left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{2} - t_a \right) \cdot \sum (K_i \cdot F_i)_{i \delta}, \quad (1.3.55)$$

где:

τ_1 - температура теплоносителя на входе в нагревательный прибор;

τ_2 - температура теплоносителя на выходе;

$\sum (K_i \cdot F_i)_{i\delta}$ - сумма произведений коэффициента теплопередачи отдельных нагревательных приборов на их поверхности.

Коэффициент теплопередачи нагревательного прибора не является постоянной величиной и зависит от температурного напора отопительного прибора θ .

$$\theta = \frac{\tau_1 - \tau_2}{2} - t_a, \quad (1.3.56)$$

$$K_{i\delta} = a \cdot F_{i\delta} \cdot \theta^n, \quad (1.3.57)$$

где:

a - постоянная, зависящая от типа прибора, места, способа установки и ряда других факторов;

n - постоянная, также зависящая от типа нагревательного прибора, далее принято $n = 0,25$.

Комплекс $\sum (K_i \cdot F_i)_{i\delta}$ также можно выразить через расчетные значения тепловой нагрузки и температурного напора:

$$\sum (K_i \cdot F_i)_{i\delta} = \frac{Q_p}{\theta_p}, \quad (1.3.58)$$

где:

$$\theta_p = \frac{\tau_{1p} - \tau_{2p}}{2} - t_{ap}.$$

В безразмерном виде уравнение (1.3.55) представится:

$$\bar{Q} = f \cdot \left(\frac{Q_p}{\theta_p} \right)^{n+1}, \quad (1.3.59)$$

где:

f параметр, характеризующий соответствие фактической поверхности нагревательных приборов расчетному значению. Проектное значение параметра $f = 1$.

Третье уравнение. Тепловой поток, сообщаемый теплоносителем нагревательным приборам:

$$Q = c \cdot G \cdot (\tau_1 - \tau_2), \quad (1.3.60)$$

где:

c - теплоемкость теплоносителя; G - расход теплоносителя.

Расход теплоносителя G можно также выразить через расчетные значения тепловой нагрузки и разности температур теплоносителя:

$$G = \frac{g \cdot Q_p}{c \cdot (\tau_{1p} - \tau_{2p})} = \frac{g \cdot Q_p}{c \cdot \Delta\tau_p}, \quad (1.3.61)$$

где:

g - параметр, характеризующий соответствие фактического расхода теплоносителя расчетному значению (относительный расход). Проектное значение параметра $g = 1$.

В безразмерном виде уравнение (1.3.60) представится:

$$Q = g \cdot \frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta\tau_p}. \quad (1.3.62)$$

Система уравнений (1.3.54), (1.3.59), (1.3.62) будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \bar{Q} = p \cdot \frac{t_a - t_i}{\Delta t_\delta} \\ \bar{Q} = f \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_p} \right)^{n+1} \\ \bar{Q} = g \cdot \frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta\tau_\delta} \end{cases}. \quad (1.3.63)$$

Относительную тепловую нагрузку \bar{Q} целесообразно представить в виде произведения двух сомножителей:

$$\bar{Q} = q_{\delta \hat{a} \hat{e}} \cdot q_{i \hat{a}}, \quad (1.3.64)$$

где:

$$q_{\delta \hat{a} \hat{e}} = \frac{t_{\hat{a} \delta} - t_i}{\Delta t_{\delta}} - \text{текущая относительная тепловая нагрузка, зависящая только от тем-}$$

пературы наружного воздуха при проектных условиях;

$$q_{i \hat{a}} = \frac{t_{\hat{a}} - t_i}{t_{\hat{a} \delta} - t_i} - \text{обеспеченная относительная тепловая нагрузка для любой температу-}$$

ры наружного воздуха.

При решении системы уравнений относительно температур теплоносителя τ_1 и τ_2 получаются уравнения отопительного температурного графика:

$$\tau_1 = t_i + q_{\delta \hat{a} \hat{e}} \cdot q_{i \hat{a}} \cdot \left(\Delta t_{\delta} + \frac{P \cdot \Delta \tau_{\delta}}{2 \cdot g} \right) + \theta_{\delta} \cdot \left(\frac{P \cdot q_{\delta \hat{a} \hat{e}} \cdot q_{i \hat{a}}}{f} \right)^{\frac{1}{n+1}}, \quad (1.3.65)$$

$$\tau_1 = t_i + q_{\delta \hat{a} \hat{e}} \cdot q_{i \hat{a}} \cdot \left(\Delta t_{\delta} - \frac{P \cdot \Delta \tau_{\delta}}{2 \cdot g} \right) + \theta_{\delta} \cdot \left(\frac{P \cdot q_{\delta \hat{a} \hat{e}} \cdot q_{i \hat{a}}}{f} \right)^{\frac{1}{n+1}}. \quad (1.3.66)$$

При $g = \text{const}$ уравнения (1.3.65) и (1.3.66) описывают температурный график качественного регулирования отпуска тепла, а в частном случае, при $g = 1$ уравнения (1.3.65) и (1.3.66) описывают типовой отопительный температурный график.

Суть метода

В системах теплоснабжения, не подвергавшихся наладке, фактические расходы теплоносителя всегда существенно отличаются от расчетных расходов, причем их величина в основном зависит от удаленности конкретного потребителя от источника тепла. Так у близко расположенных к источнику тепла потребителей расход может достигать $g = 3$, а у наиболее удаленных потребителей может быть и $g < 1$. В этом случае, как следует из уравнения (1.3.59), для каждого потребителя требуется свой индивидуальный температурный график, зависящий от конкретного расхода g . Например, при $g = 1$ и $q_{i \hat{a}} = 0$ темпера-

турный график должен быть $95/70^{\circ}\text{C}$. при $g = 2$ соответственно $88,8/76,2^{\circ}\text{C}$, при $g=3$ соответственно $86,7/78,3^{\circ}\text{C}$.

Однако отопительный режим ведется, как правило, по типовым температурным графикам. В этом случае потребители, имеющие $g > 1$, перетапливаются ($q_{i\dot{a}} > 1$) а потребители с $g < 1$ недотапливаются ($q_{i\dot{a}} < 1$) в течение всего отопительного периода.

Теплоотдача нагревательных приборов зависит от средней температуры теплоносителя в приборе. Средняя температура теплоносителя является полусуммой температур теплоносителя и выражается уравнением, полученным из уравнений (1.3.59) и (1.3.60):

$$\tau_{\dot{n}\dot{o}} = t_i + q_{\dot{o}\dot{a}\dot{e}} \cdot q_{i\dot{a}} \cdot \Delta t_{\dot{o}} + \theta_{\dot{o}} \cdot \left(\frac{p \cdot q_{\dot{o}\dot{a}\dot{e}} \cdot q_{i\dot{a}}}{f} \right)^{\frac{1}{n+1}}. \quad (1.3.67)$$

Важно отметить, что в уравнении (1.3.67) $\tau_{\dot{n}\dot{o}}$ не зависит от расхода теплоносителя и однозначно является функцией от t_i и $q_{i\dot{a}}$. Отсюда проистекает важное следствие: на источниках тепла систем теплоснабжения, не прошедших стадии наладки и имеющих фактические расходы теплоносителя в тепловых сетях существенно отличающиеся от расчетных, целесообразно поддерживать температурный график по средней температуре теплоносителя $\tau_{\dot{n}\dot{o}}$, а не по τ_1 . Тем самым, по крайней мере, будет снижено влияние расходов при $g > 1$ на перетопы зданий, что позволит снизить «пережог» топлива на источнике тепла.

На практике $\tau_{\dot{n}\dot{o}}$ легко определить путем измерения температур теплоносителя τ_1 и τ_2 . Тогда из уравнения (1.3.67) можно определить обеспеченную относительную тепловую нагрузку $q_{i\dot{a}}$ для конкретной температуры $\tau_{\dot{n}\dot{o}}$.

Функция $q_{i\dot{a}}$ при оптимальном обеспечении отапливаемого здания тепловой энергией принимает значение $q_{i\dot{a}} = 1$. Отклонение $q_{i\dot{a}}$ от 1 свидетельствует о перетопе ($q_{i\dot{a}} > 1$) или недотопе ($q_{i\dot{a}} < 1$) здания. При выдерживании на источнике тепла расчетного температурного графика, $q_{i\dot{a}}$ имеет постоянное значение во всем диапазоне температурного графика.

Определение $q_{i\dot{a}}$ по известному значению $\tau_{\dot{n}\dot{o}}$ из уравнения (1.3.67) не удобно из-за наличия дробного показателя степени: $1/(n+1) = 0,8$.

Автором предлагается формула, которая позволяет определять $q_{iá}$ по известным значениям $\tau_{\bar{n}\bar{d}}$ и t_n с достаточной для практических расчетов точностью:

$$q_{iá} = \frac{\tau_{\bar{n}\bar{d}} - t_i}{q_{\delta \hat{a}\hat{e}} \cdot \left[\Delta t_{\delta} + \theta_{\delta} \cdot \frac{p}{f} \cdot \left(\frac{\theta_{\delta}}{\tau_{\bar{n}\bar{d}} - t_{\hat{a}\hat{d}}} \right)^n \right]}, \quad (1.3.68)$$

Для конкретной системы теплоснабжения можно составить, используя уравнение (1.3.67), специальную расчетную таблицу (пример приведен в таблице 1.3.1). С помощью таблицы легко определить обеспеченность того или иного потребителя тепловой энергией при любой текущей температуре наружного воздуха. При составлении таблицы I параметры приняты: $p = 1$, $f = 1$. Пользоваться таблицей несложно, например, при температуре наружного воздуха $t_i = 12^{\circ}\text{C}$, в результате измерения температур теплоносителя, определено $\tau_{\bar{n}\bar{d}} = 57,6^{\circ}\text{C}$, тогда $q_{iá} = 95\%$. По формуле (1.3.68) $q_{iá} = 94,4\%$.

Таблица 1.3.1

$T_{\text{нар}}$	$q_{\delta \hat{a}\hat{e}}$	Относительная обеспеченная тепловая нагрузка $q_{iá}, \%$										
		75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125
8	20	29,6	30,9	32,1	33,4	34,6	35,8	37	38,2	39,4	40,6	41,8
4	28	33	34,7	36,4	38	39,7	41,3	42,9	44,5	46,2	47,8	49,3
0	36	36,1	38,2	40,3	42,4	44,4	46,5	48,5	50,5	52,6	54,6	56,6
-4	44	39,1	41,6	44,1	46,5	49	51,4	53,9	56,3	58,7	61,1	63,5
-8	52	41,9	44,8	47,7	50,5	53,4	56,2	59	61,9	64,6	67,4	70,2
-12	60	44,6	47,9	51,1	54,4	57,6	60,9	64,1	67,3	70,4	73,6	76,7
-16	68	47,1	50,8	54,5	58,1	61,8	65,4	69	72,5	76,1	79,6	83,1
-20	76	49,6	53,7	57,8	61,8	65,8	69,8	73,7	77,7	81,6	85,5	89,4
-24	84	52,1	56,5	61	65,4	69,7	74,1	78,4	82,7	87	91,3	-
-28	92	54,4	59,3	64,1	68,9	73,6	78,3	83	87,7	92,4	-	-
-32	100	56,7	62	67,1	72,3	77,4	82,5	87,6	92,6	-	-	-

Относительная обеспеченная тепловая нагрузка q_{o6} по мнению автора, является обобщенным критерием качества теплоснабжения.

По известному значению q_{o6} можно определить второй важный показатель качества теплоснабжения - относительный расход теплоносителя - параметр g .

Относительный расход теплоносителя определяется делением относительной тепловой нагрузки на относительную разность температур теплоносителя $(\tau_1 - \tau_2) / \Delta\tau_p$:

$$g = q_{\delta \dot{a} \dot{e}} \cdot q_{i \dot{a}} \cdot \frac{\Delta \tau_{\delta}}{\tau_1 - \tau_2} \quad (1.3.69)$$

Параметр g при расчетном расходе теплоносителя принимает значение $g = 1$. Отклонения g от 1 свидетельствуют о недостаточном расходе $g < 1$ или избыточном расходе $g > 1$. Параметр g также имеет постоянное значение во всем диапазоне температурного графика.

При $g \neq 1$ требуется корректировка диаметра отверстия ограничительной дроссельной диафрагмы, которая может быть произведена по формуле:

$$d_{\dot{e} i \delta} = \frac{d_{\dot{o} \dot{n} \dot{o}}}{\sqrt{g}} \quad (1.3.70)$$

Параметр g может быть определен не только для отдельной системы отопления, но и для системы теплоснабжения в целом.

При отсутствии на котельной расходомеров, фиксирующих расход теплоносителя, относительный расход» может быть определен по формуле:

$$g_{\dot{e} i \delta} = \frac{\left(q_{\delta \dot{a} \dot{e}} \cdot q_{i \dot{a}} + q_{\delta \dot{i}} \cdot \frac{\tau_{\dot{n} \dot{o}} - t_i}{\tau_{\dot{n} \dot{o}, \delta} - t_{i \delta}} \right) \cdot \Delta \tau_{\delta}}{\Delta \tau_{\dot{e} i \delta}}, \quad (1.3.71)$$

где:

$q_{i \dot{a}}$ - обеспеченная тепловая нагрузка, определенная по $\tau_{\dot{n} \dot{o}}$, замеренной на котельной;

$q_{\delta \dot{i}}$ - расчетная доля тепловых потерь в тепловых сетях, определенная при $t_{i \delta}$;

$\Delta \tau_{\dot{e} i \delta}$ - разность температур теплоносителя на котельной.

По известному значению $q_{i \dot{a}}$ можно оценить усредненную температуру воздуха внутри отапливаемых помещений:

$$t_{\dot{a}} = t_i + q_{i \dot{a}} \cdot (t_{\dot{a} \dot{o}} - t_i). \quad (1.3.72)$$

В практике иногда встречаются случаи, когда системы отопления потребителей имеют суммарную поверхность нагрева отопительных приборов, отличную от проектной,

при этом параметру $f \neq 1$. Чаще всего это самовольно установленные дополнительные поверхности нагревательных приборов $f > 1$. При обеспечении температуры теплоносителя в подающем трубопроводе τ_1 по отопительному температурному графику и при пропуске расчетного расхода $g = 1$ здание будет перетапливаться $q_{i\dot{a}} > 1$ во всем диапазоне температур наружного воздуха. При этом температура теплоносителя после системы отопления оказывается всегда ниже, чем по температурному графику. Влияние параметра f на $q_{i\dot{a}}$ и приведено в таблице 1.3.2.

Таблица 1.3.2

f	g	τ_1	τ_2	$q_{i\dot{a}}$	$t_{\dot{a}}$
1	1	95	70	1	18
1,1	1	95	68,9	1,043	20,2
1,2	1	95	67,9	1,082	22,1

Если решить уравнение (1.3.59) относительно расхода теплоносителя при заданных по температурному графику τ_1 при $f > 1$ и $q_{i\dot{a}} = 1$, то g окажется существенно меньше 1 (см. таблицу 1.3.3).

Таблица 3

f	$q_{i\dot{a}}$	τ_1	τ_2	g	$t_{\dot{a}}$
1	1	95	70	1	18
1,1	1	95	60,4	0,72	18
1,2	1	95	52,9	0,6	18

Пропуск столь малых расходов теплоносителя $g < 0.7$ в систему отопления путем изменения диаметра отверстия дроссельной диафрагмы не приемлем, так как существенно нарушается распределение теплоносителя по стоякам системы отопления.

Для таких зданий с системами отопления, имеющими $f > 1$, при условии пропорционального увеличения поверхностей всех нагревательных приборов, требуются индивидуальные температурные графики, которые могут быть сформированы непосредственно в узлах управления путем организации подмеса теплоносителя из обратного трубопровода в подающий. Подмес может быть выполнен известными способами: с помощью элеваторов либо смесительных насосов.

В таблице 1.3.4 приведены значения расчетных температурных графиков в зависимости от параметра f необходимых коэффициентов смешения для формирования этих графиков из графика на источнике тепла 95/70 °С.

Таблица 1.3.4

f	g	τ_1	τ_2	Коэффициент смешения	$q_{i\dot{a}}$
1	1	95	70	0	1
1,1	1	90,3	65,3	0,19...0,26	1
1,2	1	86,3	61,3	0,35...0,41	1

Коэффициент смешения не является постоянным в течение отопительного сезона и изменяется от меньшего значения при расчетной температуре наружного воздуха до большего при $t_n = +8^\circ\text{C}$.

При недостатке суммарной поверхности установленных нагревательных приборов ($f < 1$) возможности обеспечения $q_{i\dot{a}} = 1$ с помощью увеличения расхода $g > 1$ весьма ограничены. Так при недостатке поверхностей нагрева на 5% ($f = 0,95$) необходимый расход для обеспечения 100% тепловой нагрузки составляет 128% ($g = 1,28$), а при $f = 0,9$ $g = 1,83$.

Параметр p принимает значения $p > 1$ в случае некачественного выполнения ограждающих конструкций зданий в процессе строительства. Здания при $p > 1$ испытывают дефицит тепла $q_{i\dot{a}} < 1$ при $f = 1$ и $g = 1$.

Возможности обеспечения $q_{i\dot{a}} = 1$ путем увеличения расхода $g > 1$ также ограничены, как и в случае недостатка поверхности $f < 1$.

При $f = 1$ и $q_{i\dot{a}} = 1$ расход g в зависимости от p должен составлять: $p = 1,05 \sim g = 1,32$; а при $p = 1,1 \sim g = 1,86$.

Параметр p в отличие от f и g доступными средствами измерить не возможно, однако, его можно вычислить проведя два цикла измерения в разное время при существенно различных температурах наружного воздуха. Предварительно определяется $q_{i\dot{a}}$ по результатам двух измерений, имеющих индексы 1 и 2:

$$q_{i\dot{a}} = \frac{\tau_{n\dot{d}1} - t_{i1} - \dot{a} \cdot (\tau_{n\dot{d}2} - t_{i2})}{\Delta t_{\dot{\delta}} \cdot (q_{\dot{\delta}\dot{a}\dot{e}1} - \dot{a} \cdot q_{\dot{\delta}\dot{a}\dot{e}2})} \quad (1.3.73)$$

где:

$$\dot{a} = \left(\frac{q_{\delta \text{ \acute{a}e}1}}{q_{\delta \text{ \acute{a}e}2}} \right)^{\frac{1}{n+1}}$$

Затем определяется параметр p :

$$p = \frac{f}{(q_{\delta \text{ \acute{a}e}1} \cdot q_{i \acute{a}})} \cdot \left(\frac{\tau_{\text{н\ddot{o}1}} - t_i - q_{\delta \text{ \acute{a}e}1} \cdot q_{i \acute{a}} \cdot \Delta t_{\delta}}{\Theta_{\delta}} \right) \quad (1.3.74)$$

При измерении параметров теплоносителя должен быть соблюден ряд условий:

- измерения должны проводиться поверенными приборами;
- при косвенном измерении, через определение температуры стенки трубопровода, состояние поверхности трубопровода должно соответствовать требованиям измерительного прибора;
- измерения должны производиться одновременно и в стационарном режиме работы системы теплоснабжения.

При определении для конкретного здания параметра $p > 1$ необходимо принимать меры по восстановлению полноценного отопления либо путем дополнительной теплоизоляции здания либо «переаттестации» на повышенную тепловую нагрузку с увеличением суммарной поверхности нагрева до величины $f = p$.

Предлагаемые в ряде работ и руководящих материалах методы определения тепловых нагрузок здания по поверхности установленных нагревательных приборов могут быть справедливы только для частного случая, когда имеет место равенство параметров $f = p$ (полное соответствие установленных поверхностей нагрева отопительных приборов тепловой нагрузке отопления), что без детального обследования объекта не очевидно.

Правильный алгоритм определения расчетной тепловой нагрузки по мнению автора, заключается в определении расчетных тепловых потерь через ограждающие конструкции ($p = 1$) и определении суммарной поверхности нагревательных приборов. Если $f = p$, то расчетные тепловые потери, определенные через поверхности нагрева принимаются за расчетную тепловую нагрузку. При $f \neq p$ за расчетную тепловую нагрузку должна приниматься $q_{i \acute{a}}$, определенная по уравнению (1.3.65), умноженная на Q_p

Проведение контроля наладочных мероприятий

Контроль наладочных мероприятий целесообразно проводить с помощью ведомости, фрагмент которой приведен в таблице 1.3.5.

Таблица 1.3.5

№ п/п	Характеристика системы отопления					Температура наружного воздуха t_i	Температура теплоносителя			Результаты расчёта				
	Q_p	G_p	p	f	$d_{отд}$		τ_1	τ_2	$\tau_{н\ddot{o}}$	$q_{\ddot{o} \hat{a} \hat{e} 1}$	$q_{i \hat{a}}$	g	$t_{\hat{a}}$	$d_{\hat{e} i \ddot{o}}$
1	230	7,91	1	1	16,7	-12	68	53	60,5	0,6	0,994	0,994	17,8	16,7
2	230	7,91	1	1	16,7	-12	68	50	59	0,6	0,968	0,807	17	18,6
3	230	7,91	1	1	18,1	-12	66	51	58,5	0,6	0,96	0,96	16,8	18,5
4	230	7,91	1	1	16,7	-12	68	50	59	0,6	0,968	0,802	17	18,6
5	230	10,32	1	1	-	-12	67	60	63,5	0,6	1,045	2,240	19,1	-

Расчетные температуры теплоносителя по температурному графику при $t_n = -12^\circ\text{C}$ составляют; $\tau_1 = 68^\circ\text{C}$; $\tau_2 = 53,4^\circ\text{C}$.

Фактический расход теплоносителя у потребителя №2 составил после первоначальной установки ограничительной диафрагмы $g = 0,807$. После увеличения диаметра отверстия диафрагмы с $d_{уст} = 16,7$ мм до $d_{кор} = 18,6$ мм расход составит $g = 1$; $q_{i \hat{a}} = 1$; $\tau_2 = 53^\circ\text{C}$.

Потребитель №3 находится в конце теплотрассы, поэтому температура теплоносителя на входе в узел управления из-за тепловых потерь в тепловых сетях ниже, чем по температурному графику при $t_n = 12^\circ\text{C}$.

У потребителя №4 ограничительная диафрагма $d_{уст} = 16,7$ мм была установлена в предположении $f = 1$, аналогично потребителю №1. Однако, выяснилось, что фактическая поверхность нагрева отопительных приборов составляет $f = 1,1$. При $f = 1,1$ расчетный расход должен быть $G_p = 5,74$ т/ч, а диаметр ограничительной диафрагмы $d_{кор} = 14,2$ мм, тогда температура теплоносителя после системы отопления составит $47,3^\circ\text{C}$ вместо $53,4^\circ\text{C}$ по отопительному температурному графику, а $q_{i \hat{a}} = 0,999$, $g = 0,998$.

У потребителя №5 к моменту измерения ограничительная диафрагма ($d_{уст} = 19,1$ мм) была самовольно демонтирована. Это привело более чем к двукратному увеличению расхода теплоносителя и завышению температуры теплоносителя после системы отопления с перегоном только на 4,5%. Естественно, что увеличение расхода произошло за счет других потребителей.

Выводы

1. Предлагается метод контроля качества наладочных мероприятий в системах отопления, содержащий обобщенные критерии обеспечения тепловых нагрузок и расходов теплоносителя, которые можно получить, используя результаты измерения двух температур теплоносителя до и после системы отопления.

На основании критериев возможно определить:

- текущее фактическое теплотребление отдельного здания;
- расход теплоносителя в системе отопления;
- величину коррекции сужающего устройства;
- определить расчетным путем истинную тепловую нагрузку здания.

2. Предлагается для систем отопления, не прошедших наладочных мероприятий или находящихся в стадии наладки, поддерживать на источнике тепла среднюю температуру теплоносителя по отопительному температурному графику вместо температуры в подающем трубопроводе.

3. Отклонения значений температур теплоносителя после систем отопления от значений по температурному графику не могут являться в полной мере показателями нарушения расчетного режима.

1.3.3 Диагностирование разбалансированности теплогидравлических режимов [11]

Основные критерии оценки качества систем отопления:

1. Соблюдение температурных режимов в отапливаемых помещениях в течение отопительного периода характеризует величина и период отклонений фактических значений температуры воздуха от оптимальных значений и оценивается коэффициентом температурных отклонений (аварийности) за отопительный период:

$$\sigma_{i\bar{i}} = 1 - \left(0,5 \cdot \sum_{j=1}^m \frac{A_j \cdot T_j}{t_A^i \cdot \tau} \right), \quad (1.3.75)$$

где:

$A_j = (t_B^H - t_B^{\hat{A}\hat{E}\hat{D}})$ - амплитуда j отклонения;

T – продолжительность (время) отклонения;

τ - продолжительность отопительного периода;

m – число эпизодических отклонений;

t_B^H - нормативное значение внутренней температуры.

Здесь характер отклонений может классифицироваться отказами I, II и III родов.

Отказом I рода считается отклонение отопительных параметров в зону допустимых значений. В случае отклонения параметров за пределы зоны допустимых значений, но не настолько, чтобы в системе здания (или зданий) наступили необратимые процессы - размораживание элементов, значительный технологический ущерб и др., считается, что произошел отказ II рода. При аварийных ситуациях, наступивших в результате несоблюдения параметров и повлекших за собой конкретные издержки (последующие ремонтные работы, технологические ущербы и др.), имеет место отказ III степени.

Коэффициент аварийности может определяться по вышеприведенной формуле отдельно для отказов I, II и III родов.

В ходе мониторинга (единовременного наблюдения) качество соблюдения температурных режимов в отапливаемых помещениях характеризуется коэффициентом рассогласования значений внутренней температуры воздуха в отапливаемых помещениях:

$$\sigma_i = \frac{t_{\hat{A}\hat{N}\hat{D}}^{\hat{O}\hat{\lambda}\hat{E}\hat{D}} - t_{\hat{A}}^{\hat{I}\hat{I}\hat{D}\hat{I}}}{t_{\hat{A}}^{\hat{I}\hat{I}\hat{D}\hat{I}}}, \quad (1.3.76)$$

где:

$t_{\hat{A}\hat{N}\hat{D}}^{\hat{O}\hat{\lambda}\hat{E}\hat{D}}$ - фактическая средняя температура в здании, измеряемая или опосредованно вычисляемая на основе косвенных параметров;

$t_{\hat{A}}^{\hat{I}\hat{I}\hat{D}\hat{I}}$ - средняя нормативная температура внутреннего воздуха в здании.

2. Эффективность использования энергоресурсов системой отопления за отопительный период можно оценивать коэффициентом эффективности СО:

$$\varepsilon_{\tilde{N}\tilde{I}} = \frac{q'_{\tilde{O}\tilde{A}}}{q_{\tilde{O}\tilde{A}}} \quad (1.3.77)$$

где:

$$q'_{\tilde{O}\tilde{A}} = \frac{W_j^{\tilde{A}\tilde{I}\tilde{A}'}}{\tilde{A} \cdot \tilde{A}\tilde{N}\tilde{I}\tilde{I}'},$$

$q'_{\tilde{O}\tilde{A}}$ - расчетное, нормативное или базовое значение удельного расхода тепла на отопление здания;

$q_{\tilde{O}\tilde{A}}$ - реальное или фактическое значение удельного расхода тепла на 1 м² жилой (полезной) площади здания;

$W_j^{\tilde{A}\tilde{I}\tilde{A}'}$ - расчетный (паспортный) годовой расход тепла на отопление здания (за отопительный период);

\tilde{A} - общая жилая или полезная площадь здания;

$GCOI'$ - расчетное значение градусо-суток отопительного периода для данной местности.

При проведении мониторинга единовременная эффективность использования энергоресурсов в СО оценивается коэффициентом единовременной эффективности СО:

$$\varepsilon_{\tilde{N}\tilde{I}} = \frac{Q_{\tilde{I}\tilde{I}\tilde{D}\tilde{I}}}{Q_{\tilde{O}\tilde{A}\tilde{E}\tilde{O}}}, \quad (1.3.78)$$

где:

$Q_{\tilde{I}\tilde{I}\tilde{D}\tilde{I}}$ - нормативное значение расхода тепла на отопление здания при текущей температуре наружного воздуха;

$Q_{\tilde{O}\tilde{A}\tilde{E}\tilde{O}}$ - фактический расход тепла на СО.

При определении основных критериев в ходе мониторинга или периодического обследования здания может быть предложена следующая градация оценок состояния СО.

1. *Коэффициент температурных отклонений (аварийности).*

$\sigma_{\tilde{I}\tilde{I}} \geq 0,975$ для отказов I рода и при отсутствии отказов II и III родов - техническое состояние системы отопления хорошее.

При $0,9 \leq \sigma_{\tilde{I}\tilde{I}} < 0,975$ для отказов II рода, при отсутствии отказов III рода - техническое состояние системы отопления удовлетворительное.

При $\sigma_{\tilde{I}\tilde{I}} < 0,9$ для отказов II рода или наличии отказов III рода - техническое состояние системы отопления неудовлетворительное.

При $\sigma_{ji} < 0,7$ для отказов II рода - необходимо назначение энергетического обследования.

2. *Коэффициент эффективности системы отопления.*

При $\varepsilon_{\bar{N}i} \geq 0,95$ - система отопления эффективна, функционирует хорошо.

При $0,85 \leq \varepsilon_{\bar{N}i} < 0,95$ - система отопления малоэффективна, функционирует удовлетворительно.

При $\varepsilon_{\bar{N}i} < 0,8$ - система отопления неэффективна, функционирует неудовлетворительно.

При $\varepsilon_{\bar{N}i} < 0,7$ - необходимо назначение энергоаудита.

Вычисление критериев состояния СО упирается в проблему определения средней температуры воздуха в помещениях здания. Современное состояние жилищно-коммунального сектора таково, что наличие системы мониторинга температуры внутри здания является редким исключением из общего правила. Однако следует учитывать, что тепловой ввод оснащается приборами контроля параметров теплоносителя (воды) в СО - его температур и расхода. Исходя из этого, средняя температура воздуха в здании может быть опосредованно оценена на основе, например, решения обратной задачи регулирования:

$$t_1 = t_B + \Delta t'_{CO} \cdot \bar{Q}_O^{\frac{1}{1+n}} + 0,5 \cdot \delta t'_{CO} \cdot \frac{\bar{Q}_O}{G}, \quad (1.3.79)$$

$$t_2 = t_B + \Delta t'_{CO} \cdot \bar{Q}_O^{\frac{1}{1+n}} - 0,5 \cdot \delta t'_{CO} \cdot \frac{\bar{Q}_O}{G}. \quad (1.3.80)$$

В этих формулах t_1 и t_2 - температуры теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах СО соответственно:

$$\Delta t'_{CO} = \frac{t'_1 + t'_2}{2} - t'_B, \quad (1.3.81)$$

где:

$\Delta t'_{CO}$ - расчетный средний температурный напор в СО;

$\delta t'_{CO} = t'_1 - t'_2$ - расчетная разность температур в СО;

n - коэффициент, определяемый видом отопительного прибора и типом СО. При кусочной линеаризации этих уравнений и исключении из них температуры наружного воздуха, получаются достаточно простые для использования обслуживающим персоналом (хотя и обладающие известной погрешностью) зависимости для оценки температуры внутреннего воздуха:

$$t_B = \frac{t_1 + t_2}{2} - C_1 \cdot \bar{G} \cdot (t_1 - t_2) - C_2, \quad (1.3.82)$$

где:

t_1 и t_2 - текущие значения температур воды на входе и выходе из СО

соответственно;

$\bar{G} = \frac{G}{G'}$ - относительный расход теплоносителя в СО - отношение текущего расхода теплоносителя к его расчетному значению;

C_1 и C_2 - коэффициенты, неизменные для некоторой области температур наружного воздуха.

Уравнения регулирования основаны на модели СО, в которой она представляется в виде единого сосредоточенного отопительного прибора. Основанные на этой модели зависимости могут применяться с приемлемой погрешностью при диагностике состояния двухтрубных СО в широком диапазоне изменяемых параметров.

Для однотрубных СО меньшей погрешностью обладают уравнения, полученные на основе представления СО в виде протяженного линейного отопительного прибора. При использовании этой модели параметры теплоносителя в СО связаны между собой известной зависимостью:

$$\frac{1}{(t_2 - t_B)^n} - \frac{1}{(t_1 - t_B)^n} = \frac{A_1}{\bar{G}}, \quad (1.3.83)$$

где:

A_1 - коэффициент, определяемый расчетными параметрами СО.

На основе вышеприведенного уравнения для однотрубных СО может быть предложена следующая формула для оценки средней температуры внутреннего воздуха в здании:

$$t_B = \frac{t_2 \cdot C_t - t_1}{C_t - 1}, \quad (1.3.84)$$

где:

$$C_t = \left(B_t \frac{\bar{Q}_o}{\bar{G}} + 1 \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (1.3.84)$$

где:

B_t - коэффициент, определяемый расчетными параметрами СО.

Таким образом, при развитии систем мониторинга СО и энергетического аудита зданий различного назначения весьма важным становится количественная оценка показателей функционирования технических систем.

Критерии оценки состояния элементов системы отопления:

1. Состояние ограждающих конструкций с точки зрения их теплотехнических характеристик оценивается коэффициентом эффективности теплозащиты здания $\varphi_{огр}$. Коэффициент $\varphi_{огр}$ представляет собой отношение расчетных (проектных, паспортных) ($\varphi_{огр}^p$) или нормативных ($\varphi_{огр}^н$) значений тепловых потерь к их действительным значениям (с учетом инфильтрации через ограждающие конструкции наружного воздуха), пересчитанных на текущие условия эксплуатации:

$$\varphi_{i\bar{\omega}} = \frac{Q'_{\delta} + Q'_{ei\delta}}{Q_{\delta} + Q_{ei\delta}} \bar{Q}, \quad (1.3.85)$$

где:

$Q'_{тп}$ и $Q'_{инф}$ - расчетные (нормативные или базовые) значения тепловых потерь через наружные ограждения и расходов тепла на инфильтрацию наружного воздуха, соответственно, при текущих значениях температур внутреннего и наружного воздуха;

$Q_{тп}$ и $Q_{инф}$ - фактические значения тепловых потерь через наружные ограждения и расходов тепла на инфильтрацию наружного воздуха соответственно;

\bar{Q} - коэффициент пересчета на текущие условия эксплуатации. Рассчитывается по формуле:

$$\bar{Q} = \frac{t_{\hat{A}f} - t_f}{t'_{\hat{A}f} - t'_f}, \quad (1.3.86)$$

где:

$t_{\hat{A}f}$ è t_f - фактические значения температур внутреннего и наружного воздуха соответственно;

$t'_{\hat{A}f}$ è t'_f - расчетные значения температур внутреннего и наружного воздуха соответственно.

Для здания в целом значения коэффициента эффективности теплозащиты здания может быть оценено по приближенной зависимости:

$$\Phi_{i\hat{a}\hat{b}}^{\hat{a}\hat{a}} = \frac{q'_{i\hat{d}}}{q_{i\hat{d}}}, \quad (1.3.87)$$

где:

q'_{OT} - расчетное (паспортное), нормативное или базовое значение удельной отопительной характеристики здания;

q_{OT} - фактическое значение удельной отопительной характеристики здания. Рассчитывается по формуле:

$$q = \frac{Q_{\hat{d}\hat{a}\hat{e}\hat{d}}}{V_0 \cdot (t_{\hat{A}} - t_f)}, \quad (1.3.88)$$

где:

$Q_{\hat{d}\hat{a}\hat{e}\hat{d}}$ - фактический расход тепла на систему отопления здания;

V_Q - паспортный объем здания.

При этом следует помнить, что недоучет дополнительных теплопоступлений, например, солнечной радиации, может привести к значительным погрешностям вычислений. Во-вторых, тепловая характеристика здания при изменении внешних погодных условий (направления и средней скорости ветра ит. д.) переменна. И, в-третьих, здание

обладает тепловой инерцией. Происходит некоторое запаздывание изменения тепловых потерь здания на соответствующее изменение температуры наружного воздуха.

Для отдельного участка наружного ограждения значение коэффициента $\alpha_{огр}$ может быть вычислено по формуле:

$$\Phi_{i\bar{\omega}}^{\dot{\omega}} = \frac{R}{R'}, \quad (1.3.89)$$

где:

R - фактическое приведенное термическое сопротивление участка ограждения, определяемое по результатам тепловизионной диагностики или иными способами;

R' - проектное (паспортное) или нормативное значение термического сопротивления наружного ограждения.

2. Фактическое состояние системы отопления (степень внутреннего загрязнения, наличие воздуха и отложений), способность СО компенсировать тепловые потери помещений предлагается оценивать с помощью коэффициента $\varphi_{со}$ - коэффициента теплотехнического качества системы отопления, представляющего собой отношение действительного значения удельной теплопроизводительности СО к его расчетному (базовому) значению:

$$\Phi_{Ni} = \frac{(k_0 F)}{(k_0 F)',} \quad (1.3.90)$$

где:

$(k_0 F)$ - действительное, пересчитанное на расчетные условия значение удельной теплопроизводительности СО;

$(k_0 F)'$ - расчетное или базовое значение удельной теплопроизводительности СО.

Расчетное значение удельной теплопроизводительности СО рассчитывается по формуле:

$$(k_0 F)' = \frac{Q'_0}{0,5(t'_i + t'_i) - t'_{Ai}}, \quad (1.3.91)$$

где:

Q'_0 - расчетная мощность СО;

$t'_i, t'_j, t'_{\Delta i}$ - расчетные значения температур воды в подающей и обратной магистралях СО и внутреннего воздуха в здании (помещениях) соответственно.

Уменьшение этого коэффициента в период эксплуатации свидетельствует о возникновении неполадки в СО, связанной с нарушением ее нормальной работы, например, с разрегулированием, засорением или завоздушиванием. В свою очередь, возрастание значения (k_0F) против ожидаемой величины свидетельствует, скорее всего, об установке в СО дополнительных площадей отопительных приборов.

3. Состояние отопительных приборов (степень внутреннего загрязнения, наличие в них воздуха и отложений) характеризуется коэффициентом качества отопительных приборов

$$\varepsilon_i = \frac{Q_{\hat{\sigma} \hat{\alpha} \hat{\delta} i}}{Q_{\hat{\sigma} \hat{\alpha} \hat{\delta} i}}, \quad (1.3.92)$$

а для всей СО:

$$\varepsilon_i = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{\hat{\sigma} \hat{\alpha} \hat{\delta} i}}{\sum_{i=1}^n Q_{\hat{\sigma} \hat{\alpha} \hat{\delta} i}} \quad (1.3.93)$$

где:

$Q_{\hat{\sigma} \hat{\alpha} \hat{\delta} i}$ - фактическая теплоотдача i -го отопительного прибора, определяемая по результатам тепло-визионной диагностики или иными способами;

$Q_{\hat{\sigma} \hat{\alpha} \hat{\delta} i}$ - теоретическая теплоотдача i -го отопительного прибора, вычисленная на основе паспортных (справочных) данных;

n - число установленных отопительных приборов.

4. Качество наладки СО оценивается коэффициентом разналадки СО:

$$\varphi_i^{\delta i} = 1 - 2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n |t_{cp} - t_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}\hat{o}}| \cdot V_i}{t_{cp} \cdot V_i}, \quad (1.3.94)$$

где:

t_{cp} - средняя температура воздуха в помещениях здания в период мониторинга;

V_i - объем /-го отапливаемого помещения.

5. Величина перерасхода (недопоставки при недотопе) тепла характеризуется коэффициентом перетопа (недотопы) здания:

$$\varphi_{\Delta Q} = \frac{|Q_{i\hat{i}\hat{\delta}i} - Q_{\hat{o}\hat{a}\hat{e}\hat{e}\hat{o}i}|}{Q_{i\hat{i}\hat{\delta}i}} \cdot 100, \quad (1.3.95)$$

где:

$Q_{i\hat{i}\hat{\delta}i}$ - нормативное значение теплопотребления отапливаемого здания или помещения при данной температуре наружного воздуха;

$Q_{\hat{o}\hat{a}\hat{e}\hat{e}\hat{o}i}$ - фактический расход тепла на отопление здания.

При определении вышеперечисленного набора критериев в ходе мониторинга или периодического обследования здания может быть предложена следующая градация оценок состояния элементов системы отопления.

1. Коэффициент эффективности теплозащиты здания

При $\varphi_{огр} \geq 0,95$ - теплозащита здания эффективна, в хорошем техническом состоянии.

При $0,9 < \varphi_{огр} < 0,95$ - теплозащита низкоэффективна, необходимо рассмотреть вопрос о дополнительном утеплении или назначении ремонтных работ в плановые сроки.

При $\varphi_{огр} < 0,9$ или при значении $R_{факт}$, не удовлетворяющем гигиеническим требованиям, - теплозащита неэффективна, ограждающие конструкции нуждаются в обследовании с рассмотрением вопроса о внеплановом проведении ремонтно-восстановительных работ.

2. Коэффициент теплотехнического качества системы отопления При $\varphi_{\text{co}} > 0,95$ - техническое состояние СО хорошее.

При $0,85 < \varphi_{\text{co}} < 0,95$ - техническое состояние СО удовлетворительное, система нуждается в обследовании и выявлении причин, способствующих снижению ее теплотехнического качества, и проведении регламентных работ.

При $\varphi_{\text{co}} < 0,85$ - техническое состояние СО неудовлетворительное, обязательное проведение обследования и внеплановых регламентных работ, при отсутствии положительных результатов принятие решения о реконструкции системы.

При $\varphi_{\text{co}} > 1,03$ - в СО установлено дополнительное отопительное оборудование (приборы), необходимость проведения работ по выявлению дополнительного оборудования (приборов).

3. Коэффициент качества отопительных приборов ε_i . При $\varepsilon_i > 0,95$ - техническое состояние отопительного прибора хорошее.

При $0,9 < \varepsilon_i < 0,95$ - техническое состояние отопительного прибора удовлетворительное, необходимость проведения регламентных работ в плановые сроки.

При $\varepsilon_i < 0,9$ - техническое состояние отопительного прибора неудовлетворительное, необходимость проведения регламентных работ, при отсутствии положительных результатов принятие решения о замене отопительного прибора.

4. Коэффициент разналадки СО

При $\varphi_t^{\delta t} > 0,95$ - состояние наладки СО хорошее, не требует вмешательства.

При $0,9 < \varphi_t^{\delta t} < 0,95$ - состояние наладки СО удовлетворительное, необходимо включить в план очередных регламентных работ корректировку наладки системы.

При $\varphi_t^{\delta t} < 0,9$ - состояние наладки СО неудовлетворительное, необходимо провести внеочередные регламентные работы с корректировкой наладки СО.

5. Коэффициент перетопа (недотопа) здания

При $\varphi_{\Delta Q} < \pm 5 \%$ - СО функционирует удовлетворительно.

При $\varphi_{\Delta Q} > \pm 5 \%$ - СО функционирует неудовлетворительно, необходимость проведения работ по определению причин недотопа (перетопа).

Предлагаемая система критериев базируется в основном на традиционных показателях. Используемый при вычислении коэффициента теплотехнического качества параметр «действительная, пересчитанная на расчетные условия удельная теплопроизводительность СО» есть величина:

$$(k_0F) = Q_0 \frac{\Delta t_{\bar{m}}^n}{\Delta t_{\bar{m}}^{n+1}} \quad (1.3.96)$$

где:

$$\Delta t_{ci} = \frac{t_1 + t_2}{2} - t_a - \text{действительный средний температурный напор в СО};$$

t_1 и t_2 - текущие значения температур воды на входе и выходе из СО соответственно;

t_B - текущее значение средней температуры внутреннего воздуха в здании;

n - коэффициент, определяемый видом отопительного прибора и типом СО.

Как показывает обработка месячных статистических данных функционирования экспериментального здания, представленные в статье зависимости, позволяют достаточно адекватно оценивать величину (k_0F) и др.

Предлагаемый в статьях в порядке дискуссии набор критериев позволяет более системно подходить к оценке функционирования СО и ее элементов.

1.4 Разработка математических моделей, моделирование режимов работы систем тепло- и водоснабжения

1.4.1 Математическая модель гидравлического распределителя

Термогидравлический распределитель (ТГР) – устройство, предназначенное для улучшения процесса регулирования отпуска тепловой энергии.

С 80-х годов во Франции и Германии в тепловых схемах котельных начинает широко использоваться ТГР. Как известно, *тепловая схема котельной* состоит из контура источника и контура (контуров) потребителя. *Применение ТГР в этих схемах обеспечивает за счет независимости контуров источника и потребителей оптимальный отпуск тепловой энергии различным потребителям с различными параметрами с минимальными энергозатратами.*

Существуют различные типы ТГР – вертикальные с подключением до 3-х потребителей, коллекторные (вертикальные и горизонтальные) с возможностью неограниченного подключения потребителей, коллекторные, соединенные короткой U-образной трубой и др.

Теплогидравлическая схема водогрейных котельных представляет собой сложный комплекс функционально взаимосвязанного оборудования, согласующего режим выработки теплоты на источнике и режим потребления теплоты.

Режим работы котельных установок должен обеспечивать постоянный, не менее минимального, расход теплоносителя с температурой выше точки росы (кроме конденсационных котлов) при резко изменяемой тепловой нагрузке у потребителей

Существуют многочисленные тепловые схемы котельных. Применение простейших схем переносит непосредственно процесс изменения расхода теплоносителя в контуре потребителя на расход теплоносителя в контуре источника. При использовании современных котлов обеспечение постоянства расхода теплоносителя через котел и ограничения на минимально допустимую температуру теплоносителя в обратной линии перед котлом являются требованиями завода изготовителя. Поэтому все более широкое применение в котельных, особенно при их реконструкции, находят схемы с использованием термогидравлического распределителя (ТГР).

Как обычно тепловые схемы котельных имеют вторичный контур, включающий в себя несколько отопительных контуров, контур теплых полов, контур ГВС, контур системы вентиляции и т.п. При различных режимах работы котельной расходы в первичном и вторичном контурах не совпадают (номинальный режим, режим снижения нагрузки по-

требителей, режим пуска-останов и др.), что обуславливает необходимость гидравлической развязки контуров. При полной гидравлической развязке изменение расхода теплоносителя во вторичном контуре (из-за изменения нагрузки многочисленных потребителей) не влияет на величину расхода первичного контура.

Подключение потребителей через ТГР имеет и другие преимущества: *потребителям будет отпущаться столько теплоты, сколько им необходимо для компенсации тепловых потерь зданием в данный момент. Невостребованное количество тепловой энергии через ТГР возвращается источнику.*

Система централизованного теплоснабжения состоит из контура источника тепловой энергии (ТЭЦ, паровая или водогрейная котельная), распределительного контура (магистральные и квартальные тепловые сети и пр.) и контуров потребителей тепловой энергии. В основном применяется зависимая система теплоснабжения потребителей (с элеватором) и открытым водоразбором. Для работы элеватора располагаемый перепад на входе в ИТП (индивидуальный тепловой пункт здания) должен быть не менее 15 м вод. ст. Для надежной работы системы отопления здания с элеватором лучше иметь перепад 30-40 м. вод. ст., т.е. если принять в обратном трубопроводе давление 50 м. вод.ст., то в прямом трубопроводе давление будет 90-95 м. вод. ст. (9-9,5 ата). Для этого, чтобы подвести необходимое количество теплоты к потребителям, в распределительной сети должен работать высоконапорный сетевой насос (с увеличением напора растет потребление электрической энергии). Кроме того, в современных городских тепловых сетях остро стоит вопрос о *наладке гидравлического режима тепловой сети*, располагаемый напор у каждого потребителя должен быть не менее минимально требуемого – иначе становится невозможным поддерживать температурный режим в зданиях на требуемом уровне. Присоединение каждого нового потребителя требует *проведения нового наладочного гидравлического расчета* тепловой сети. Сеть потребителя можно гидравлически отделить от подводящих сетей, установив теплообменник (так называемая независимая схема). Но это дорогое удовольствие – теплообменники стоят дорого, загрязняются, требуют установки фильтров и проведения периодической чистки поверхности теплообмена (механической или химической). Располагаемый перепад на входе для пластинчатого теплообменника должен составлять около 3-5 м вод. ст.

Рассмотрим вопрос установки ТГР в ЦТП (ИТП). Как уже указано ранее, установка ТГР обеспечивает *независимость контуров*: режим работы системы отопления любого потребителя не оказывает влияния на гидравлический режим работы распределительной сети. Независимость контуров облегчает также и проектные расчеты, сводя их к *простым практическим рекомендациям*. Циркуляция теплоносителя в системе отопления здания

осуществляется за счет работы *собственного низконапорного насоса малой мощности*. Сетевой циркуляционный насос не будет создавать циркуляцию в отопительной системе здания, потому что ТГР является участком с малым гидравлическим сопротивлением. При включении насоса системы отопления последний начинает отбирать воду в нужном количестве из распределительного контура через ТГР, обеспечивая ее циркуляцию; избыток теплоносителя через ТГР возвращается в распределительный контур. Это происходит потому, что разность давлений между прямым и обратным трубопроводами в ТГР практически равна нулю.

Теоретическое рассмотрение данного вопроса показало, что использование в качестве ТГР байпаса большого диаметра с малым гидравлическим сопротивлением позволяет *обеспечить независимость контуров, повысить надежность теплоснабжения потребителей и снизить затраты энергоресурсов*.

Тепловая схема котельной с использованием термогидравлического распределителя представлена на рисунке 1.4.1. Данная схема используется для подключения первичного контура котла через ТГР нескольких отопительных контуров (В и С), контура системы вентиляции (А) и контура ГВС.

Надежный гидравлический принцип работы ТГР, не требующий регулирования расходов, обеспечивает независимость и бесперебойное функционирование подключенных контуров.

Эффективная работа требует поддержания постоянным расхода сетевой воды через котлоагрегаты, а также разработку сбалансированных тепловых и гидравлических режимов нескольких самостоятельных контуров, подключённых к источнику.

Одним из способов решения этой задачи является применение гидравлического распределителя, рисунок 1.4.1.

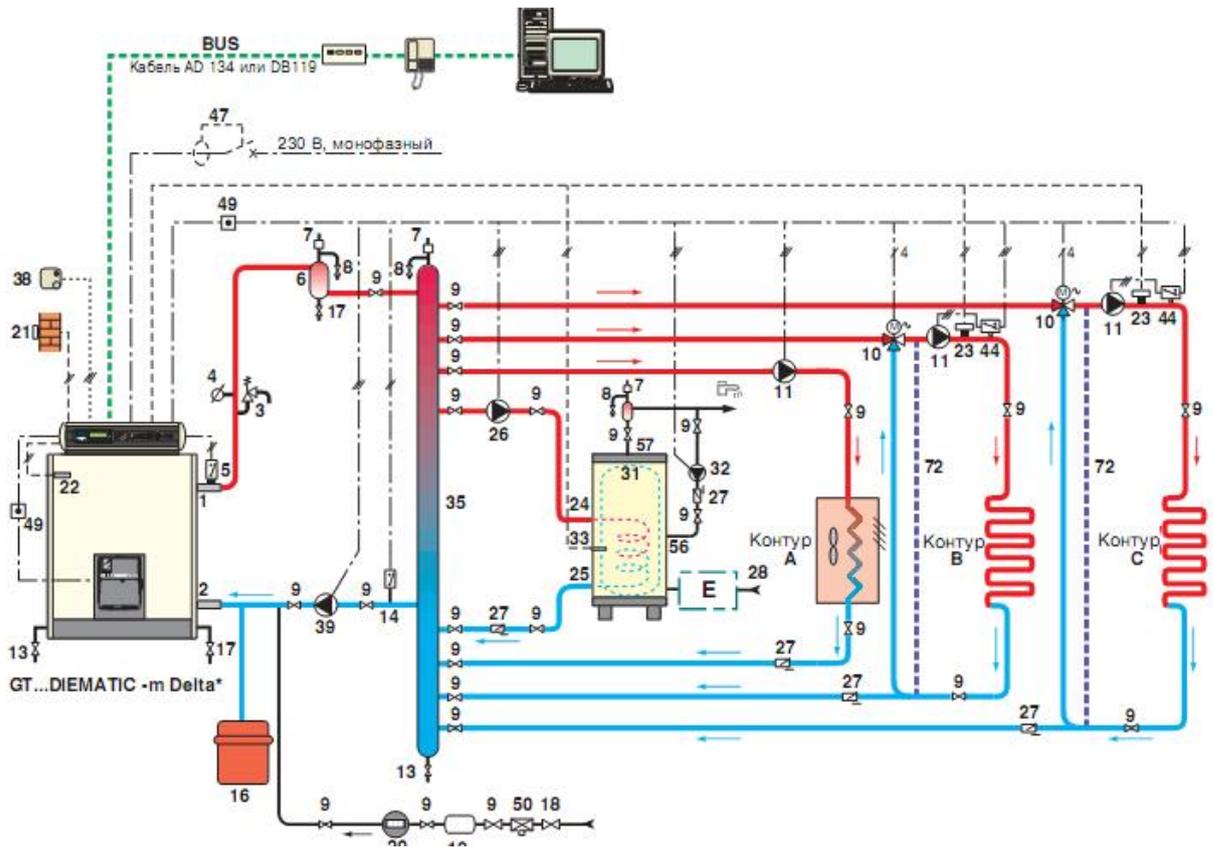


Рисунок 1.4.1

1. Подающая линия системы отопления
2. Обратная линия системы отопления
3. Предохранительный клапан
4. Манометр
5. Реле контроля потока воды
6. Воздухоотделитель
7. Автоматический воздушный вентиль
8. Ручной воздушный вентиль
9. Секционный вентиль
10. Трёхходовой смесительный вентиль
11. Циркуляционный насос
13. Вентиль для удаления шлама
14. Реле давления воды
16. Расширительный бак
17. Сливной вентиль
18. Заполнение системы отопления (с обратным клапаном)
19. Водоподготовка

20. Счётчик воды
21. Датчик наружной температуры
22. Датчик котла или прямого контура (до вентиля)
23. Датчик температуры в подающей линии после смесительного вентиля
24. Первичный вход теплообменника водонагревателя
25. Первичный выход теплообменника водонагревателя
26. Подпиточный насос водонагревателя
27. Обратный клапан
28. Вход холодной воды для системы ГВС
31. Автономный водонагреватель
32. Насос контура водонагревателя (контур необязателен)
33. Датчик температуры водонагревателя
35. Термогидравлический распределитель (если распределитель расположен не в вертикальном положении, то между ним и обратной котла следует установить отстойник для шлама)
38. Блок дистанционного управления с датчиком температуры помещения или без
39. Циркуляционный насос котла
44. Ограничительное термореле
47. Дифференциальный выключатель
49. Контакттор
50. Обратный клапан
56. Обратка рециркуляционного контура ГВС
57. Выход горячей воды
72. Гидравлический байпас в системе с контуром для подогрева пола (необязателен)

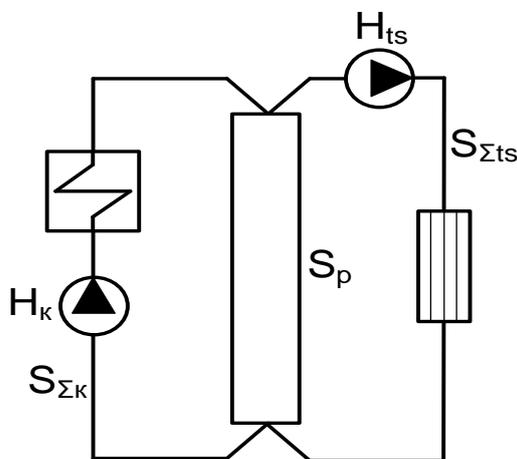


Рисунок 1.4.2

Схема гидравлического распределителя состоит из двух циркуляционных насосов и переключки с малым гидравлическим сопротивлением.

Во внешней тепловой сети при применении количественного регулирования изменяется расход сетевой воды. В контуре котла необходимо обеспечить постоянство расхода.

Рассмотрим математический аппарат режима работы гидравлического распределителя.

Уравнение характеристики насоса в контуре котла имеет вид:

$$H_k = H_{k0} - s_k \cdot Q_k^2 \quad (1.4.1)$$

где:

H_{k0} - напор насоса котельной при нулевой подаче, м.в.ст.;

s_k - сопротивление проточной части насоса, м²/час²/м⁶;

Q_k - подача насоса, м³/час.

Уравнение характеристики насоса в контуре тепловой сети имеет вид:

$$H_{ts} = H_{ts0} - s_{ts} \cdot Q_{ts}^2 \quad (1.4.2)$$

где:

H_{ts0} - напор сетевого насоса при нулевой подаче, м.в.ст.;

s_{ts} - сопротивление проточной части сетевого насоса, м²/час²/м⁶;

Q_{ts} - подача сетевого насоса, м³/час.

Сопротивление гидравлической ветви котла:

$$s_{\Sigma k} = s_k + s_{ka} + s_{tk} \quad (1.4.3)$$

где:

s_k - сопротивление проточной части насоса, м²/час²/м⁶;

s_{ka} - сопротивление котельного агрегата, м³·час²/м⁶;

s_{tk} - сопротивление трубопроводов обвязки котла, м³·час²/м⁶.

Сопротивление гидравлической перемычки s_p , м³·час²/м⁶.

Сопротивление гидравлической ветви с сетевым насосом:

$$s_{\Sigma ts} = s_{ts} + s_{ns} \quad (1.4.4)$$

где:

s_{ts} - сопротивление проточной части насоса, м³·час²/м⁶;

s_{ns} - суммарное сопротивление трубопроводов тепловой сети и потребителей.

Схема рисунок 1.4.1 состоит из двух контуров и двух узлов. Ее математическая модель на основании 1 и 2 законов Кирхгофа содержит два уравнения потерь напора и одно уравнение баланса расходов.

$$\left. \begin{aligned} s_{\Sigma k} \cdot Q_k \cdot |Q_k| + s_p \cdot Q_p \cdot |Q_p| - H_{k0} &= 0 \\ s_{\Sigma ts} \cdot Q_{ts} \cdot |Q_{ts}| - s_p \cdot Q_p \cdot |Q_p| - H_{ts0} &= 0 \\ Q_k - Q_{ts} - Q_p &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.4.5)$$

Рассмотрим условие реверса (изменения направления расхода по перемычке на противоположное).

При рабочем режиме распределителя направления расходов в ветвях котла и потребителя совпадают с направлением действия насосов. Расход по перемычке направлен со стороны напора в сторону всасывания насоса котла. При этом (то есть известно заранее направление расходов), в системе уравнений (1.4.5) можно опустить знаки модуля и подставить значение расхода через котёл из третьего уравнения в первые два.

$$\left. \begin{aligned} s_{\Sigma k} \cdot (Q_{ts} + Q_p)^2 + s_p \cdot Q_p^2 - H_{k0} &= 0 \\ s_{\Sigma ts} \cdot Q_{ts}^2 - s_p \cdot Q_p^2 - H_{ts0} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.4.6)$$

Из системы уравнений (1.4.6) с помощью результата можно исключить неизвестный расход Q_{ts} .

$$\begin{aligned}
 & -2 \cdot s_{\Sigma ts} \cdot H_{k0} \cdot s_{\Sigma k} \cdot H_{ts0} + s_{\Sigma k}^2 \cdot H_{ts0}^2 + s_{\Sigma ts}^2 \cdot H_{k0}^2 + \\
 & + \left(-2 \cdot s_{\Sigma ts} \cdot s_{\Sigma k}^2 \cdot s_p + s_{\Sigma ts}^2 \cdot s_{\Sigma k}^2 + s_{\Sigma ts}^2 \cdot s_p^2 + 2 \cdot s_{\Sigma ts}^2 \cdot s_{\Sigma k} \cdot s_p + s_{\Sigma k}^2 \cdot s_p^2 + \right. \\
 & \left. + 2 \cdot s_{\Sigma ts} \cdot s_p^2 \cdot s_{\Sigma k} \right) \cdot Q_p^4 + \quad (1.4.7) \\
 & + 2 \cdot \left(-s_{\Sigma ts} \cdot s_{\Sigma k}^2 \cdot H_{ts0} - s_{\Sigma ts}^2 \cdot s_{\Sigma k} \cdot H_{k0} - s_{\Sigma ts}^2 \cdot s_p \cdot H_{k0} + s_{\Sigma ts} \cdot s_p \cdot s_{\Sigma k} \cdot H_{ts0} - \right. \\
 & \left. - s_{\Sigma ts} \cdot H_{k0} \cdot s_{\Sigma k} \cdot s_p + s_{\Sigma k}^2 \cdot s_p \cdot H_{ts0} \right) \cdot Q_p^2 = 0
 \end{aligned}$$

Очевидно, предельным значением расхода является $Q_p = 0$, после которого изменяется направление расхода на противоположное. Следовательно, уравнение (1.4.7) принимает вид.

$$-2 \cdot s_{\Sigma ts} \cdot H_{k0} \cdot s_{\Sigma k} \cdot H_{ts0} + s_{\Sigma k}^2 \cdot H_{ts0}^2 + s_{\Sigma ts}^2 \cdot H_{k0}^2 = 0 \quad (1.4.8)$$

или

$$\frac{s_{\Sigma k}}{s_{\Sigma ts}} = \frac{H_{k0}}{H_{ts0}} \quad (1.4.9)$$

Анализ показывает, что реверс будет происходить, если

$$\frac{s_{\Sigma k}}{s_{\Sigma ts}} > \frac{H_{k0}}{H_{ts0}} \quad (1.4.10)$$

Как видно из (1.4.10) на условие реверса не влияет величина сопротивления перемычки.

Рассмотрим методику определения величины сопротивления перемычки.

Анализ расчётных данных показывает, что в реальных условиях работы гидравлического распределителя, режим движения жидкости в перемычке соответствует числу Рейнольдса значительно превышающее 2320. По данным [2] в этом случае хорошие результаты даёт универсальная формула А.Д. Альтшуля по определению коэффициента гидравлического трения.

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{k_s}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} \quad (1.4.11)$$

где:

k_s - коэффициент абсолютной шероховатости, м;

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad - \text{число Рейнольдса}; \quad (1.4.12)$$

w - скорость жидкости, м/с;

d - внутренний диаметр трубопровода, м;

ν - коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

Потери напора на участке трубопровода складываются из местных и потерь по длине, определяются по формуле Дарси-Вейсбаха.

$$h = h_{mp} + h_m = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g} + \Sigma \zeta \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g} \quad (1.4.13)$$

где:

l - длина трубопровода, м;

$\Sigma \zeta$ - сумма коэффициентов местных сопротивлений на участке трубопровода;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - ускорение свободного падения.

Скорость жидкости в трубопроводе.

$$w = \frac{4 \cdot Q}{3600 \cdot \pi \cdot d^2} \quad (1.4.14)$$

где:

Q - расход жидкости, м³/ч;

$\pi = 3,141593$.

Сопротивление участка трубопровода.

$$s = \left(\frac{\lambda \cdot l}{d} + \Sigma \zeta \right) \cdot \frac{8}{(3600 \cdot \pi \cdot d^2)^2 \cdot g} \quad (1.4.15)$$

Суммарная потеря напора на участке трубопровода.

$$h = s \cdot Q^2 \quad (1.4.16)$$

Пример 1.

$$H_{k0} = 30; H_{is0} = 60; s_k = 0,0002; s_{ka} = 0,0008; s_{\Sigma k} = 0,001;$$

$$s_{is} = 0,01; s_{is} = 0,005; s_a = 0,004; s_{\Sigma is} = 0,019;$$

Величина сопротивления в ветви потребителя $s_{\Sigma is} = 0,019$ соответствует расчётному режиму и может изменяться в широком диапазоне.

Результаты расчётов по системе уравнений (1.4.5). (Расчёты выполнены при регулировании расхода сетевой воды в тепловую сеть изменением сопротивления $s_{\Sigma is}$.)

$$s_p = 0,00001$$

Таблица 1.4.1

$s_{\Sigma is}$	Q_{is}	Q_k	Q_p
0,01	77,51842145	172,9420231	95,42360168
0,011	73,91519909	172,9218805	99,00668145
0,012	70,77211587	172,9037055	102,1315897
0,013	67,99887760	172,8872014	104,8883238
0,014	65,52819851	172,8721285	107,3439300
0,015	63,30877294	172,8582918	109,5495188
0,016	61,30070477	172,8455308	111,5448260
0,017	59,47243938	172,8337126	113,3612732
0,018	57,79864732	172,8227260	115,0240786
0,019	56,25872927	172,8124771	116,5537478
0,020	54,83573765	172,8028863	117,9671487
0,021	53,51558435	172,7938855	119,2783012
0,022	52,2864488	172,7854160	120,4989672
0,023	51,13832932	172,7774271	121,6390977
0,024	50,06269840	172,7698744	122,7071760
0,025	49,05223454	172,7627192	123,7104847
0,026	48,10061149	172,7559276	124,6553161
0,027	47,20233078	172,7494693	125,5471386
0,028	46,35258745	172,7433178	126,3907303
0,029	45,54716150	172,7374491	127,1902876
0,030	44,78232939	172,7318419	127,9495126

В таблице 1.4.2 приведены расчётные данные при $s_p = 0,001$.

Таблица 1.4.2

$s_{\Sigma is}$	Q_{is}	Q_k	Q_p
0,01	86,64538415	157,8789854	71,23360129
0,011	82,82175126	156,6720546	73,85030335
0,012	79,47381255	155,5858522	76,11203968
0,013	76,50960467	154,6015689	78,09196427
0,014	73,86040283	153,7041721	79,84376924
0,015	71,47365066	152,8815193	81,40786860

Продолжение таблицы 1.4.2

0,016	69,30836003	152,1236986	82,81533862
0,017	67,33201981	151,4225374	84,09051763
0,018	65,51846020	150,7712331	85,25277286
0,019	63,84634142	150,1640738	86,31773242
0,020	62,29806152	149,5962253	87,29816373
0,021	60,85895233	149,0635648	88,20461244
0,022	59,51667753	148,5625528	89,04587527
0,023	58,26077549	148,0901310	89,82935548
0,024	57,08230724	147,6436412	90,56133397
0,025	55,97358220	147,2207608	91,24717857
0,026	54,92794202	146,8194497	91,89150769
0,027	53,93958867	146,4379080	92,49831938
0,028	53,00344618	146,0745405	93,07109436
0,029	52,11504882	145,7279277	93,61287887
0,030	51,27044962	145,3968015	94,12635187

В таблице 1.4.3 приведены расчётные данные при $s_p = 0,1$.

Таблица 1.4.3

$s_{\Sigma rs}$	Q_{rs}	Q_k	Q_p
0,01	94,03252962	107,6049893	13,57245971
0,011	90,05192690	103,9093599	13,85743300
0,012	86,54095289	100,6377746	14,09682174
0,013	83,41363593	97,71463260	14,30099667
0,014	80,60459907	95,08196743	14,47736836
0,015	78,06310768	92,69448893	14,63138125
0,016	75,74909759	90,51622749	14,76712990
0,017	73,63044753	88,51820346	14,88775593
0,018	71,68105953	86,67677135	14,99571182
0,019	69,87947817	84,97241954	15,09294137
0,020	68,20787856	83,38888444	15,18100588
0,021	66,65131178	81,91248624	15,26117446
0,022	65,19713379	80,53162355	15,33448976
0,023	63,83456726	79,23638386	15,40181660
0,024	62,55436111	78,01823976	15,46387864
0,025	61,34852318	76,86980934	15,52128616
0,026	60,21010791	75,78466552	15,57455761
0,027	59,13304636	74,75718270	15,62413634
0,028	58,11200872	73,78241254	15,67040382
0,029	57,14229239	72,85598254	15,71369015
0,030	56,21973008	71,97401252	15,75428244

Результаты расчётов, приведённые в таблицах 1.4.1-1.4.3 показывают, что увеличение сопротивления перемычки увеличивает диапазон изменения расхода через котёл, который требуется поддерживать постоянным.

Пример 2. Расчёт сопротивления перемычки.

Для расчёта приняты температура жидкости $t=95^{\circ}\text{C}$, эквивалентная шероховатость $k_y=0,5$ мм, $\Sigma\xi=1,5$.

По формулам (1.4.13) – (1.4.15) выполнены расчёты скорости жидкости, числа Рейнольдса, коэффициента гидравлического трения и сопротивления перемычки в зависимости от диаметра, длины и расхода жидкости, таблицы 1.4.4

Таблица 1.4.4 (расчёты для $Q=50$ и $Q=100$)

		Q=50 м ³ /ч				Q=100 м ³ /ч			
d,м	l,м	w,м/с	Re	λ	$S, \text{м}^2/\text{с}^2/\text{м}^6$	w,м/с	Re	λ	$S, \text{м}^2/\text{с}^2/\text{м}^6$
0.5	1	0.070736	117034.3	0.021934	1.57E-07	0.141471	234068.6	0.020849	1.57E-07
0.5	2	0.070736	117034.3	0.021934	1.62E-07	0.141471	234068.6	0.020849	1.62E-07
0.5	3	0.070736	117034.3	0.021934	1.66E-07	0.141471	234068.6	0.020849	1.66E-07
0.5	4	0.070736	117034.3	0.021934	1.71E-07	0.141471	234068.6	0.020849	1.7E-07
0.5	5	0.070736	117034.3	0.021934	1.75E-07	0.141471	234068.6	0.020849	1.74E-07
0.5	6	0.070736	117034.3	0.021934	1.8E-07	0.141471	234068.6	0.020849	1.79E-07
0.5	7	0.070736	117034.3	0.021934	1.84E-07	0.141471	234068.6	0.020849	1.83E-07
0.5	8	0.070736	117034.3	0.021934	1.89E-07	0.141471	234068.6	0.020849	1.87E-07
0.5	9	0.070736	117034.3	0.021934	1.93E-07	0.141471	234068.6	0.020849	1.91E-07
0.5	10	0.070736	117034.3	0.021934	1.98E-07	0.141471	234068.6	0.020849	1.96E-07
1	1	0.017684	58517.14	0.02221	9.7E-09	0.035368	117034.3	0.019946	9.69E-09
1	2	0.017684	58517.14	0.02221	9.85E-09	0.035368	117034.3	0.019946	9.82E-09
1	3	0.017684	58517.14	0.02221	9.99E-09	0.035368	117034.3	0.019946	9.94E-09
1	4	0.017684	58517.14	0.02221	1.01E-08	0.035368	117034.3	0.019946	1.01E-08
1	5	0.017684	58517.14	0.02221	1.03E-08	0.035368	117034.3	0.019946	1.02E-08
1	6	0.017684	58517.14	0.02221	1.04E-08	0.035368	117034.3	0.019946	1.03E-08
1	7	0.017684	58517.14	0.02221	1.06E-08	0.035368	117034.3	0.019946	1.05E-08
1	8	0.017684	58517.14	0.02221	1.07E-08	0.035368	117034.3	0.019946	1.06E-08
1	9	0.017684	58517.14	0.02221	1.08E-08	0.035368	117034.3	0.019946	1.07E-08
1	10	0.017684	58517.14	0.02221	1.1E-08	0.035368	117034.3	0.019946	1.08E-08
1.5	1	0.00786	39011.43	0.023481	1.91E-09	0.015719	78022.86	0.020494	1.91E-09
1.5	2	0.00786	39011.43	0.023481	1.93E-09	0.015719	78022.86	0.020494	1.92E-09
1.5	3	0.00786	39011.43	0.023481	1.95E-09	0.015719	78022.86	0.020494	1.94E-09
1.5	4	0.00786	39011.43	0.023481	1.97E-09	0.015719	78022.86	0.020494	1.96E-09
1.5	5	0.00786	39011.43	0.023481	1.99E-09	0.015719	78022.86	0.020494	1.98E-09
1.5	6	0.00786	39011.43	0.023481	2.01E-09	0.015719	78022.86	0.020494	1.99E-09
1.5	7	0.00786	39011.43	0.023481	2.03E-09	0.015719	78022.86	0.020494	2.01E-09
1.5	8	0.00786	39011.43	0.023481	2.05E-09	0.015719	78022.86	0.020494	2.03E-09
1.5	9	0.00786	39011.43	0.023481	2.07E-09	0.015719	78022.86	0.020494	2.04E-09
1.5	10	0.00786	39011.43	0.023481	2.09E-09	0.015719	78022.86	0.020494	2.06E-09
2	1	0.004421	29258.57	0.024777	6.03E-10	0.008842	58517.14	0.021323	6.02E-10

Продолжение таблицы 1.4.4 (расчёты для Q=50 и Q=100)

2	2	0.004421	29258.57	0.024777	6.08E-10	0.008842	58517.14	0.021323	6.06E-10
2	3	0.004421	29258.57	0.024777	6.13E-10	0.008842	58517.14	0.021323	6.1E-10
2	4	0.004421	29258.57	0.024777	6.17E-10	0.008842	58517.14	0.021323	6.15E-10
2	5	0.004421	29258.57	0.024777	6.22E-10	0.008842	58517.14	0.021323	6.19E-10
2	6	0.004421	29258.57	0.024777	6.27E-10	0.008842	58517.14	0.021323	6.23E-10
2	7	0.004421	29258.57	0.024777	6.32E-10	0.008842	58517.14	0.021323	6.27E-10
2	8	0.004421	29258.57	0.024777	6.37E-10	0.008842	58517.14	0.021323	6.32E-10
2	9	0.004421	29258.57	0.024777	6.42E-10	0.008842	58517.14	0.021323	6.36E-10
2	10	0.004421	29258.57	0.024777	6.47E-10	0.008842	58517.14	0.021323	6.4E-10
2.5	1	0.002829	23406.86	0.025966	2.47E-10	0.005659	46813.71	0.022179	2.46E-10
2.5	2	0.002829	23406.86	0.025966	2.48E-10	0.005659	46813.71	0.022179	2.48E-10
2.5	3	0.002829	23406.86	0.025966	2.5E-10	0.005659	46813.71	0.022179	2.49E-10
2.5	4	0.002829	23406.86	0.025966	2.52E-10	0.005659	46813.71	0.022179	2.51E-10
2.5	5	0.002829	23406.86	0.025966	2.53E-10	0.005659	46813.71	0.022179	2.52E-10
2.5	6	0.002829	23406.86	0.025966	2.55E-10	0.005659	46813.71	0.022179	2.54E-10
2.5	7	0.002829	23406.86	0.025966	2.57E-10	0.005659	46813.71	0.022179	2.55E-10
2.5	8	0.002829	23406.86	0.025966	2.58E-10	0.005659	46813.71	0.022179	2.56E-10
2.5	9	0.002829	23406.86	0.025966	2.6E-10	0.005659	46813.71	0.022179	2.58E-10
2.5	10	0.002829	23406.86	0.025966	2.62E-10	0.005659	46813.71	0.022179	2.59E-10
3	1	0.001965	19505.71	0.027043	1.19E-10	0.00393	39011.43	0.022995	1.19E-10
3	2	0.001965	19505.71	0.027043	1.19E-10	0.00393	39011.43	0.022995	1.19E-10
3	3	0.001965	19505.71	0.027043	1.2E-10	0.00393	39011.43	0.022995	1.2E-10
3	4	0.001965	19505.71	0.027043	1.21E-10	0.00393	39011.43	0.022995	1.2E-10
3	5	0.001965	19505.71	0.027043	1.22E-10	0.00393	39011.43	0.022995	1.21E-10
3	6	0.001965	19505.71	0.027043	1.22E-10	0.00393	39011.43	0.022995	1.22E-10
3	7	0.001965	19505.71	0.027043	1.23E-10	0.00393	39011.43	0.022995	1.22E-10
3	8	0.001965	19505.71	0.027043	1.24E-10	0.00393	39011.43	0.022995	1.23E-10
3	9	0.001965	19505.71	0.027043	1.24E-10	0.00393	39011.43	0.022995	1.23E-10
3	10	0.001965	19505.71	0.027043	1.25E-10	0.00393	39011.43	0.022995	1.24E-10
3.5	1	0.001444	16719.18	0.02802	6.41E-11	0.002887	33438.37	0.023759	6.4E-11
3.5	2	0.001444	16719.18	0.02802	6.44E-11	0.002887	33438.37	0.023759	6.43E-11
3.5	3	0.001444	16719.18	0.02802	6.47E-11	0.002887	33438.37	0.023759	6.46E-11
3.5	4	0.001444	16719.18	0.02802	6.51E-11	0.002887	33438.37	0.023759	6.49E-11
3.5	5	0.001444	16719.18	0.02802	6.54E-11	0.002887	33438.37	0.023759	6.52E-11
3.5	6	0.001444	16719.18	0.02802	6.58E-11	0.002887	33438.37	0.023759	6.55E-11
3.5	7	0.001444	16719.18	0.02802	6.61E-11	0.002887	33438.37	0.023759	6.57E-11
3.5	8	0.001444	16719.18	0.02802	6.64E-11	0.002887	33438.37	0.023759	6.6E-11
3.5	9	0.001444	16719.18	0.02802	6.68E-11	0.002887	33438.37	0.023759	6.63E-11
3.5	10	0.001444	16719.18	0.02802	6.71E-11	0.002887	33438.37	0.023759	6.66E-11
4	1	0.001105	14629.29	0.028913	3.75E-11	0.00221	29258.57	0.024471	3.75E-11
4	2	0.001105	14629.29	0.028913	3.77E-11	0.00221	29258.57	0.024471	3.77E-11
4	3	0.001105	14629.29	0.028913	3.79E-11	0.00221	29258.57	0.024471	3.78E-11
4	4	0.001105	14629.29	0.028913	3.81E-11	0.00221	29258.57	0.024471	3.8E-11
4	5	0.001105	14629.29	0.028913	3.83E-11	0.00221	29258.57	0.024471	3.81E-11
4	6	0.001105	14629.29	0.028913	3.84E-11	0.00221	29258.57	0.024471	3.83E-11
4	7	0.001105	14629.29	0.028913	3.86E-11	0.00221	29258.57	0.024471	3.84E-11
4	8	0.001105	14629.29	0.028913	3.88E-11	0.00221	29258.57	0.024471	3.86E-11

Продолжение таблицы 1.4.4 (расчёты для Q=50 и Q=100)

4	9	0.001105	14629.29	0.028913	3.9E-11	0.00221	29258.57	0.024471	3.87E-11
4	10	0.001105	14629.29	0.028913	3.92E-11	0.00221	29258.57	0.024471	3.89E-11
4.5	1	0.000873	13003.81	0.029736	2.34E-11	0.001747	26007.62	0.025134	2.34E-11
4.5	2	0.000873	13003.81	0.029736	2.35E-11	0.001747	26007.62	0.025134	2.35E-11
4.5	3	0.000873	13003.81	0.029736	2.36E-11	0.001747	26007.62	0.025134	2.36E-11
4.5	4	0.000873	13003.81	0.029736	2.37E-11	0.001747	26007.62	0.025134	2.37E-11
4.5	5	0.000873	13003.81	0.029736	2.38E-11	0.001747	26007.62	0.025134	2.38E-11
4.5	6	0.000873	13003.81	0.029736	2.39E-11	0.001747	26007.62	0.025134	2.38E-11
4.5	7	0.000873	13003.81	0.029736	2.4E-11	0.001747	26007.62	0.025134	2.39E-11
4.5	8	0.000873	13003.81	0.029736	2.41E-11	0.001747	26007.62	0.025134	2.4E-11
4.5	9	0.000873	13003.81	0.029736	2.42E-11	0.001747	26007.62	0.025134	2.41E-11
4.5	10	0.000873	13003.81	0.029736	2.43E-11	0.001747	26007.62	0.025134	2.42E-11
5	1	0.000707	11703.43	0.0305	1.54E-11	0.001415	23406.86	0.025755	1.54E-11
5	2	0.000707	11703.43	0.0305	1.54E-11	0.001415	23406.86	0.025755	1.54E-11
5	3	0.000707	11703.43	0.0305	1.55E-11	0.001415	23406.86	0.025755	1.55E-11
5	4	0.000707	11703.43	0.0305	1.56E-11	0.001415	23406.86	0.025755	1.55E-11
5	5	0.000707	11703.43	0.0305	1.56E-11	0.001415	23406.86	0.025755	1.56E-11
5	6	0.000707	11703.43	0.0305	1.57E-11	0.001415	23406.86	0.025755	1.56E-11
5	7	0.000707	11703.43	0.0305	1.57E-11	0.001415	23406.86	0.025755	1.57E-11
5	8	0.000707	11703.43	0.0305	1.58E-11	0.001415	23406.86	0.025755	1.57E-11
5	9	0.000707	11703.43	0.0305	1.59E-11	0.001415	23406.86	0.025755	1.58E-11
5	10	0.000707	11703.43	0.0305	1.59E-11	0.001415	23406.86	0.025755	1.58E-11

Таблица 1.4.4 (расчёты для Q=150 и Q=200)

		Q=150 м ³ /ч				Q=200 м ³ /ч			
d,м	l,м	w,м/с	Re	λ	S _м *с ² /м ⁶	w,м/с	Re	λ	S _м *с ² /м ⁶
0.5	1	0.212207	351102.9	0.020446	1.57E-07	0.282942	468137.1	0.020236	1.57E-07
0.5	2	0.212207	351102.9	0.020446	1.61E-07	0.282942	468137.1	0.020236	1.61E-07
0.5	3	0.212207	351102.9	0.020446	1.66E-07	0.282942	468137.1	0.020236	1.65E-07
0.5	4	0.212207	351102.9	0.020446	1.7E-07	0.282942	468137.1	0.020236	1.7E-07
0.5	5	0.212207	351102.9	0.020446	1.74E-07	0.282942	468137.1	0.020236	1.74E-07
0.5	6	0.212207	351102.9	0.020446	1.78E-07	0.282942	468137.1	0.020236	1.78E-07
0.5	7	0.212207	351102.9	0.020446	1.82E-07	0.282942	468137.1	0.020236	1.82E-07
0.5	8	0.212207	351102.9	0.020446	1.86E-07	0.282942	468137.1	0.020236	1.86E-07
0.5	9	0.212207	351102.9	0.020446	1.91E-07	0.282942	468137.1	0.020236	1.9E-07
0.5	10	0.212207	351102.9	0.020446	1.95E-07	0.282942	468137.1	0.020236	1.94E-07
1	1	0.053052	175551.4	0.018985	9.68E-09	0.070736	234068.6	0.018445	9.68E-09
1	2	0.053052	175551.4	0.018985	9.81E-09	0.070736	234068.6	0.018445	9.8E-09
1	3	0.053052	175551.4	0.018985	9.93E-09	0.070736	234068.6	0.018445	9.92E-09
1	4	0.053052	175551.4	0.018985	1E-08	0.070736	234068.6	0.018445	1E-08
1	5	0.053052	175551.4	0.018985	1.02E-08	0.070736	234068.6	0.018445	1.02E-08
1	6	0.053052	175551.4	0.018985	1.03E-08	0.070736	234068.6	0.018445	1.03E-08
1	7	0.053052	175551.4	0.018985	1.04E-08	0.070736	234068.6	0.018445	1.04E-08
1	8	0.053052	175551.4	0.018985	1.05E-08	0.070736	234068.6	0.018445	1.05E-08
1	9	0.053052	175551.4	0.018985	1.07E-08	0.070736	234068.6	0.018445	1.06E-08

Продолжение таблицы 1.4.4 (расчёты для Q=150 и Q=200)

1	10	0.053052	175551.4	0.018985	1.08E-08	0.070736	234068.6	0.018445	1.07E-08
1.5	1	0.023579	117034.3	0.019128	1.91E-09	0.031438	156045.7	0.018318	1.9E-09
1.5	2	0.023579	117034.3	0.019128	1.92E-09	0.031438	156045.7	0.018318	1.92E-09
1.5	3	0.023579	117034.3	0.019128	1.94E-09	0.031438	156045.7	0.018318	1.94E-09
1.5	4	0.023579	117034.3	0.019128	1.95E-09	0.031438	156045.7	0.018318	1.95E-09
1.5	5	0.023579	117034.3	0.019128	1.97E-09	0.031438	156045.7	0.018318	1.97E-09
1.5	6	0.023579	117034.3	0.019128	1.99E-09	0.031438	156045.7	0.018318	1.98E-09
1.5	7	0.023579	117034.3	0.019128	2E-09	0.031438	156045.7	0.018318	2E-09
1.5	8	0.023579	117034.3	0.019128	2.02E-09	0.031438	156045.7	0.018318	2.01E-09
1.5	9	0.023579	117034.3	0.019128	2.03E-09	0.031438	156045.7	0.018318	2.03E-09
1.5	10	0.023579	117034.3	0.019128	2.05E-09	0.031438	156045.7	0.018318	2.04E-09
2	1	0.013263	87775.71	0.019681	6.02E-10	0.017684	117034.3	0.018677	6.01E-10
2	2	0.013263	87775.71	0.019681	6.06E-10	0.017684	117034.3	0.018677	6.05E-10
2	3	0.013263	87775.71	0.019681	6.09E-10	0.017684	117034.3	0.018677	6.09E-10
2	4	0.013263	87775.71	0.019681	6.13E-10	0.017684	117034.3	0.018677	6.13E-10
2	5	0.013263	87775.71	0.019681	6.17E-10	0.017684	117034.3	0.018677	6.16E-10
2	6	0.013263	87775.71	0.019681	6.21E-10	0.017684	117034.3	0.018677	6.2E-10
2	7	0.013263	87775.71	0.019681	6.25E-10	0.017684	117034.3	0.018677	6.24E-10
2	8	0.013263	87775.71	0.019681	6.29E-10	0.017684	117034.3	0.018677	6.27E-10
2	9	0.013263	87775.71	0.019681	6.33E-10	0.017684	117034.3	0.018677	6.31E-10
2	10	0.013263	87775.71	0.019681	6.37E-10	0.017684	117034.3	0.018677	6.35E-10
2.5	1	0.008488	70220.57	0.020337	2.46E-10	0.011318	93627.43	0.01919	2.46E-10
2.5	2	0.008488	70220.57	0.020337	2.47E-10	0.011318	93627.43	0.01919	2.47E-10
2.5	3	0.008488	70220.57	0.020337	2.49E-10	0.011318	93627.43	0.01919	2.49E-10
2.5	4	0.008488	70220.57	0.020337	2.5E-10	0.011318	93627.43	0.01919	2.5E-10
2.5	5	0.008488	70220.57	0.020337	2.51E-10	0.011318	93627.43	0.01919	2.51E-10
2.5	6	0.008488	70220.57	0.020337	2.53E-10	0.011318	93627.43	0.01919	2.52E-10
2.5	7	0.008488	70220.57	0.020337	2.54E-10	0.011318	93627.43	0.01919	2.54E-10
2.5	8	0.008488	70220.57	0.020337	2.55E-10	0.011318	93627.43	0.01919	2.55E-10
2.5	9	0.008488	70220.57	0.020337	2.57E-10	0.011318	93627.43	0.01919	2.56E-10
2.5	10	0.008488	70220.57	0.020337	2.58E-10	0.011318	93627.43	0.01919	2.57E-10
3	1	0.005895	58517.14	0.021002	1.19E-10	0.00786	78022.86	0.019745	1.19E-10
3	2	0.005895	58517.14	0.021002	1.19E-10	0.00786	78022.86	0.019745	1.19E-10
3	3	0.005895	58517.14	0.021002	1.2E-10	0.00786	78022.86	0.019745	1.2E-10
3	4	0.005895	58517.14	0.021002	1.2E-10	0.00786	78022.86	0.019745	1.2E-10
3	5	0.005895	58517.14	0.021002	1.21E-10	0.00786	78022.86	0.019745	1.21E-10
3	6	0.005895	58517.14	0.021002	1.21E-10	0.00786	78022.86	0.019745	1.21E-10
3	7	0.005895	58517.14	0.021002	1.22E-10	0.00786	78022.86	0.019745	1.22E-10
3	8	0.005895	58517.14	0.021002	1.22E-10	0.00786	78022.86	0.019745	1.22E-10
3	9	0.005895	58517.14	0.021002	1.23E-10	0.00786	78022.86	0.019745	1.23E-10
3	10	0.005895	58517.14	0.021002	1.24E-10	0.00786	78022.86	0.019745	1.23E-10
3.5	1	0.004331	50157.55	0.021643	6.4E-11	0.005774	66876.73	0.020299	6.4E-11
3.5	2	0.004331	50157.55	0.021643	6.43E-11	0.005774	66876.73	0.020299	6.42E-11
3.5	3	0.004331	50157.55	0.021643	6.45E-11	0.005774	66876.73	0.020299	6.45E-11
3.5	4	0.004331	50157.55	0.021643	6.48E-11	0.005774	66876.73	0.020299	6.47E-11
3.5	5	0.004331	50157.55	0.021643	6.5E-11	0.005774	66876.73	0.020299	6.5E-11
3.5	6	0.004331	50157.55	0.021643	6.53E-11	0.005774	66876.73	0.020299	6.52E-11

Продолжение таблицы 1.4.4 (расчёты для Q=150 и Q=200)

3.5	7	0.004331	50157.55	0.021643	6.56E-11	0.005774	66876.73	0.020299	6.55E-11
3.5	8	0.004331	50157.55	0.021643	6.58E-11	0.005774	66876.73	0.020299	6.57E-11
3.5	9	0.004331	50157.55	0.021643	6.61E-11	0.005774	66876.73	0.020299	6.59E-11
3.5	10	0.004331	50157.55	0.021643	6.64E-11	0.005774	66876.73	0.020299	6.62E-11
4	1	0.003316	43887.86	0.022251	3.75E-11	0.004421	58517.14	0.020835	3.75E-11
4	2	0.003316	43887.86	0.022251	3.76E-11	0.004421	58517.14	0.020835	3.76E-11
4	3	0.003316	43887.86	0.022251	3.78E-11	0.004421	58517.14	0.020835	3.77E-11
4	4	0.003316	43887.86	0.022251	3.79E-11	0.004421	58517.14	0.020835	3.79E-11
4	5	0.003316	43887.86	0.022251	3.8E-11	0.004421	58517.14	0.020835	3.8E-11
4	6	0.003316	43887.86	0.022251	3.82E-11	0.004421	58517.14	0.020835	3.81E-11
4	7	0.003316	43887.86	0.022251	3.83E-11	0.004421	58517.14	0.020835	3.83E-11
4	8	0.003316	43887.86	0.022251	3.85E-11	0.004421	58517.14	0.020835	3.84E-11
4	9	0.003316	43887.86	0.022251	3.86E-11	0.004421	58517.14	0.020835	3.85E-11
4	10	0.003316	43887.86	0.022251	3.87E-11	0.004421	58517.14	0.020835	3.87E-11
4.5	1	0.00262	39011.43	0.022826	2.34E-11	0.003493	52015.24	0.021347	2.34E-11
4.5	2	0.00262	39011.43	0.022826	2.35E-11	0.003493	52015.24	0.021347	2.35E-11
4.5	3	0.00262	39011.43	0.022826	2.36E-11	0.003493	52015.24	0.021347	2.35E-11
4.5	4	0.00262	39011.43	0.022826	2.36E-11	0.003493	52015.24	0.021347	2.36E-11
4.5	5	0.00262	39011.43	0.022826	2.37E-11	0.003493	52015.24	0.021347	2.37E-11
4.5	6	0.00262	39011.43	0.022826	2.38E-11	0.003493	52015.24	0.021347	2.38E-11
4.5	7	0.00262	39011.43	0.022826	2.39E-11	0.003493	52015.24	0.021347	2.38E-11
4.5	8	0.00262	39011.43	0.022826	2.4E-11	0.003493	52015.24	0.021347	2.39E-11
4.5	9	0.00262	39011.43	0.022826	2.4E-11	0.003493	52015.24	0.021347	2.4E-11
4.5	10	0.00262	39011.43	0.022826	2.41E-11	0.003493	52015.24	0.021347	2.41E-11
5	1	0.002122	35110.29	0.023368	1.53E-11	0.002829	46813.71	0.021835	1.53E-11
5	2	0.002122	35110.29	0.023368	1.54E-11	0.002829	46813.71	0.021835	1.54E-11
5	3	0.002122	35110.29	0.023368	1.54E-11	0.002829	46813.71	0.021835	1.54E-11
5	4	0.002122	35110.29	0.023368	1.55E-11	0.002829	46813.71	0.021835	1.55E-11
5	5	0.002122	35110.29	0.023368	1.55E-11	0.002829	46813.71	0.021835	1.55E-11
5	6	0.002122	35110.29	0.023368	1.56E-11	0.002829	46813.71	0.021835	1.56E-11
5	7	0.002122	35110.29	0.023368	1.56E-11	0.002829	46813.71	0.021835	1.56E-11
5	8	0.002122	35110.29	0.023368	1.57E-11	0.002829	46813.71	0.021835	1.57E-11
5	9	0.002122	35110.29	0.023368	1.57E-11	0.002829	46813.71	0.021835	1.57E-11
5	10	0.002122	35110.29	0.023368	1.58E-11	0.002829	46813.71	0.021835	1.57E-11

Таблица 1.4.4 (расчёты для Q=500 и Q=1000)

d,м	l,м	Q=500 м ³ /ч				Q=1000 м ³ /ч			
		w,м/с	Re	λ	S,м ² *с ² /м ⁶	w,м/с	Re	λ	S,м ² *с ² /м ⁶
0.5	1	0.707355	1170343	0.019839	1.57E-07	1.41471	2340686	0.019702	1.57E-07
0.5	2	0.707355	1170343	0.019839	1.61E-07	1.41471	2340686	0.019702	1.61E-07
0.5	3	0.707355	1170343	0.019839	1.65E-07	1.41471	2340686	0.019702	1.65E-07
0.5	4	0.707355	1170343	0.019839	1.69E-07	1.41471	2340686	0.019702	1.69E-07
0.5	5	0.707355	1170343	0.019839	1.73E-07	1.41471	2340686	0.019702	1.73E-07
0.5	6	0.707355	1170343	0.019839	1.77E-07	1.41471	2340686	0.019702	1.77E-07
0.5	7	0.707355	1170343	0.019839	1.81E-07	1.41471	2340686	0.019702	1.81E-07

Продолжение таблицы 1.4.4 (расчёты для Q=500 и Q=1000)

0.5	8	0.707355	1170343	0.019839	1.85E-07	1.41471	2340686	0.019702	1.85E-07
0.5	9	0.707355	1170343	0.019839	1.89E-07	1.41471	2340686	0.019702	1.89E-07
0.5	10	0.707355	1170343	0.019839	1.93E-07	1.41471	2340686	0.019702	1.93E-07
1	1	0.176839	585171.4	0.017331	9.67E-09	0.353678	1170343	0.016907	9.67E-09
1	2	0.176839	585171.4	0.017331	9.78E-09	0.353678	1170343	0.016907	9.78E-09
1	3	0.176839	585171.4	0.017331	9.89E-09	0.353678	1170343	0.016907	9.89E-09
1	4	0.176839	585171.4	0.017331	1E-08	0.353678	1170343	0.016907	9.99E-09
1	5	0.176839	585171.4	0.017331	1.01E-08	0.353678	1170343	0.016907	1.01E-08
1	6	0.176839	585171.4	0.017331	1.02E-08	0.353678	1170343	0.016907	1.02E-08
1	7	0.176839	585171.4	0.017331	1.03E-08	0.353678	1170343	0.016907	1.03E-08
1	8	0.176839	585171.4	0.017331	1.04E-08	0.353678	1170343	0.016907	1.04E-08
1	9	0.176839	585171.4	0.017331	1.06E-08	0.353678	1170343	0.016907	1.05E-08
1	10	0.176839	585171.4	0.017331	1.07E-08	0.353678	1170343	0.016907	1.06E-08
1.5	1	0.078595	390114.3	0.016511	1.9E-09	0.15719	780228.6	0.015752	1.9E-09
1.5	2	0.078595	390114.3	0.016511	1.92E-09	0.15719	780228.6	0.015752	1.92E-09
1.5	3	0.078595	390114.3	0.016511	1.93E-09	0.15719	780228.6	0.015752	1.93E-09
1.5	4	0.078595	390114.3	0.016511	1.94E-09	0.15719	780228.6	0.015752	1.94E-09
1.5	5	0.078595	390114.3	0.016511	1.96E-09	0.15719	780228.6	0.015752	1.96E-09
1.5	6	0.078595	390114.3	0.016511	1.97E-09	0.15719	780228.6	0.015752	1.97E-09
1.5	7	0.078595	390114.3	0.016511	1.99E-09	0.15719	780228.6	0.015752	1.98E-09
1.5	8	0.078595	390114.3	0.016511	2E-09	0.15719	780228.6	0.015752	1.99E-09
1.5	9	0.078595	390114.3	0.016511	2.01E-09	0.15719	780228.6	0.015752	2.01E-09
1.5	10	0.078595	390114.3	0.016511	2.03E-09	0.15719	780228.6	0.015752	2.02E-09
2	1	0.04421	292585.7	0.016302	6.01E-10	0.088419	585171.4	0.015217	6.01E-10
2	2	0.04421	292585.7	0.016302	6.04E-10	0.088419	585171.4	0.015217	6.04E-10
2	3	0.04421	292585.7	0.016302	6.07E-10	0.088419	585171.4	0.015217	6.07E-10
2	4	0.04421	292585.7	0.016302	6.11E-10	0.088419	585171.4	0.015217	6.1E-10
2	5	0.04421	292585.7	0.016302	6.14E-10	0.088419	585171.4	0.015217	6.13E-10
2	6	0.04421	292585.7	0.016302	6.17E-10	0.088419	585171.4	0.015217	6.16E-10
2	7	0.04421	292585.7	0.016302	6.2E-10	0.088419	585171.4	0.015217	6.19E-10
2	8	0.04421	292585.7	0.016302	6.24E-10	0.088419	585171.4	0.015217	6.22E-10
2	9	0.04421	292585.7	0.016302	6.27E-10	0.088419	585171.4	0.015217	6.25E-10
2	10	0.04421	292585.7	0.016302	6.3E-10	0.088419	585171.4	0.015217	6.28E-10
2.5	1	0.028294	234068.6	0.01637	2.46E-10	0.056588	468137.1	0.014994	2.46E-10
2.5	2	0.028294	234068.6	0.01637	2.47E-10	0.056588	468137.1	0.014994	2.47E-10
2.5	3	0.028294	234068.6	0.01637	2.48E-10	0.056588	468137.1	0.014994	2.48E-10
2.5	4	0.028294	234068.6	0.01637	2.49E-10	0.056588	468137.1	0.014994	2.49E-10
2.5	5	0.028294	234068.6	0.01637	2.5E-10	0.056588	468137.1	0.014994	2.5E-10
2.5	6	0.028294	234068.6	0.01637	2.51E-10	0.056588	468137.1	0.014994	2.51E-10
2.5	7	0.028294	234068.6	0.01637	2.52E-10	0.056588	468137.1	0.014994	2.52E-10
2.5	8	0.028294	234068.6	0.01637	2.53E-10	0.056588	468137.1	0.014994	2.53E-10
2.5	9	0.028294	234068.6	0.01637	2.54E-10	0.056588	468137.1	0.014994	2.54E-10
2.5	10	0.028294	234068.6	0.01637	2.56E-10	0.056588	468137.1	0.014994	2.55E-10
3	1	0.019649	195057.1	0.016573	1.19E-10	0.039298	390114.3	0.014948	1.18E-10
3	2	0.019649	195057.1	0.016573	1.19E-10	0.039298	390114.3	0.014948	1.19E-10
3	3	0.019649	195057.1	0.016573	1.19E-10	0.039298	390114.3	0.014948	1.19E-10
3	4	0.019649	195057.1	0.016573	1.2E-10	0.039298	390114.3	0.014948	1.2E-10

Продолжение таблицы 1.4.4 (расчёты для Q=500 и Q=1000)

3	5	0.019649	195057.1	0.016573	1.2E-10	0.039298	390114.3	0.014948	1.2E-10
3	6	0.019649	195057.1	0.016573	1.21E-10	0.039298	390114.3	0.014948	1.2E-10
3	7	0.019649	195057.1	0.016573	1.21E-10	0.039298	390114.3	0.014948	1.21E-10
3	8	0.019649	195057.1	0.016573	1.22E-10	0.039298	390114.3	0.014948	1.21E-10
3	9	0.019649	195057.1	0.016573	1.22E-10	0.039298	390114.3	0.014948	1.22E-10
3	10	0.019649	195057.1	0.016573	1.22E-10	0.039298	390114.3	0.014948	1.22E-10
3.5	1	0.014436	167191.8	0.016842	6.39E-11	0.028872	334383.7	0.015005	6.39E-11
3.5	2	0.014436	167191.8	0.016842	6.41E-11	0.028872	334383.7	0.015005	6.41E-11
3.5	3	0.014436	167191.8	0.016842	6.43E-11	0.028872	334383.7	0.015005	6.43E-11
3.5	4	0.014436	167191.8	0.016842	6.45E-11	0.028872	334383.7	0.015005	6.45E-11
3.5	5	0.014436	167191.8	0.016842	6.48E-11	0.028872	334383.7	0.015005	6.46E-11
3.5	6	0.014436	167191.8	0.016842	6.5E-11	0.028872	334383.7	0.015005	6.48E-11
3.5	7	0.014436	167191.8	0.016842	6.52E-11	0.028872	334383.7	0.015005	6.5E-11
3.5	8	0.014436	167191.8	0.016842	6.54E-11	0.028872	334383.7	0.015005	6.52E-11
3.5	9	0.014436	167191.8	0.016842	6.56E-11	0.028872	334383.7	0.015005	6.54E-11
3.5	10	0.014436	167191.8	0.016842	6.58E-11	0.028872	334383.7	0.015005	6.56E-11
4	1	0.011052	146292.9	0.017142	3.75E-11	0.022105	292585.7	0.015125	3.75E-11
4	2	0.011052	146292.9	0.017142	3.76E-11	0.022105	292585.7	0.015125	3.75E-11
4	3	0.011052	146292.9	0.017142	3.77E-11	0.022105	292585.7	0.015125	3.76E-11
4	4	0.011052	146292.9	0.017142	3.78E-11	0.022105	292585.7	0.015125	3.77E-11
4	5	0.011052	146292.9	0.017142	3.79E-11	0.022105	292585.7	0.015125	3.78E-11
4	6	0.011052	146292.9	0.017142	3.8E-11	0.022105	292585.7	0.015125	3.79E-11
4	7	0.011052	146292.9	0.017142	3.81E-11	0.022105	292585.7	0.015125	3.8E-11
4	8	0.011052	146292.9	0.017142	3.82E-11	0.022105	292585.7	0.015125	3.81E-11
4	9	0.011052	146292.9	0.017142	3.83E-11	0.022105	292585.7	0.015125	3.82E-11
4	10	0.011052	146292.9	0.017142	3.84E-11	0.022105	292585.7	0.015125	3.83E-11
4.5	1	0.008733	130038.1	0.017455	2.34E-11	0.017466	260076.2	0.015283	2.34E-11
4.5	2	0.008733	130038.1	0.017455	2.34E-11	0.017466	260076.2	0.015283	2.34E-11
4.5	3	0.008733	130038.1	0.017455	2.35E-11	0.017466	260076.2	0.015283	2.35E-11
4.5	4	0.008733	130038.1	0.017455	2.36E-11	0.017466	260076.2	0.015283	2.35E-11
4.5	5	0.008733	130038.1	0.017455	2.36E-11	0.017466	260076.2	0.015283	2.36E-11
4.5	6	0.008733	130038.1	0.017455	2.37E-11	0.017466	260076.2	0.015283	2.36E-11
4.5	7	0.008733	130038.1	0.017455	2.37E-11	0.017466	260076.2	0.015283	2.37E-11
4.5	8	0.008733	130038.1	0.017455	2.38E-11	0.017466	260076.2	0.015283	2.37E-11
4.5	9	0.008733	130038.1	0.017455	2.39E-11	0.017466	260076.2	0.015283	2.38E-11
4.5	10	0.008733	130038.1	0.017455	2.39E-11	0.017466	260076.2	0.015283	2.38E-11
5	1	0.007074	117034.3	0.01777	1.53E-11	0.014147	234068.6	0.015463	1.53E-11
5	2	0.007074	117034.3	0.01777	1.54E-11	0.014147	234068.6	0.015463	1.54E-11
5	3	0.007074	117034.3	0.01777	1.54E-11	0.014147	234068.6	0.015463	1.54E-11
5	4	0.007074	117034.3	0.01777	1.54E-11	0.014147	234068.6	0.015463	1.54E-11
5	5	0.007074	117034.3	0.01777	1.55E-11	0.014147	234068.6	0.015463	1.55E-11
5	6	0.007074	117034.3	0.01777	1.55E-11	0.014147	234068.6	0.015463	1.55E-11
5	7	0.007074	117034.3	0.01777	1.56E-11	0.014147	234068.6	0.015463	1.55E-11
5	8	0.007074	117034.3	0.01777	1.56E-11	0.014147	234068.6	0.015463	1.56E-11
5	9	0.007074	117034.3	0.01777	1.56E-11	0.014147	234068.6	0.015463	1.56E-11
5	10	0.007074	117034.3	0.01777	1.57E-11	0.014147	234068.6	0.015463	1.56E-11

Расчёты показывают, что даже при больших диаметрах трубопроводов, число Рейнольдса существенно больше критического.

Приведённые математические выкладки позволяют подобрать диаметр и длину перемычки для заданных конкретных условий. Как видно из приведённых зависимостей, величина отклонения стабилизируемого расхода через котёл определяет диаметр перемычки. То есть, чем меньше диапазон изменения суммарного сопротивления подключённой тепловой сети, тем меньший требуется диаметр трубопровода перемычки.

1.4.2 Математические модели эквивалентирования гидравлических сетей

Эксплуатация и наладка водяных, тепловых и газовых сетей требует проведения расчётов режимов работы и для коррекции параметров сетей. В тоже время, в связи с ростом городов, а соответственно протяжённости и сложности коммуникаций энергоснабжения, требуется достоверная инженерная методика расчёта многокольцевых сетей.

Расчёт потокораспределения производится и при проектировании сетей городов, и при проектировании и привязке сетей новых микрорайонов к существующим сетям, при наладке гидравлических режимов, а также для анализа аварийных и эксплуатационных ситуаций.

Существующие методы расчёта основаны на решении трансцендентной системы уравнений 1 и 2 законов Кирхгофа. При этом число нелинейных уравнений определяется числом независимых контуров. Например, в тепловых сетях это число примерно равно числу подключённых абонентов плюс число контуров в подающем и обратном трубопроводах. То есть число нелинейных уравнений настолько велико, что решение их существующими методами хотя теоретически и возможно с применением сверхбыстродействующих вычислительных машин с очень большой памятью, но практически бессмысленно, так как требует значительных затрат времени, что особенно важно при анализе эксплуатационных и аварийных режимов. Здесь особенно важно отметить, что наибольшее количество аварий происходит в пусковой период, когда ежедневно увеличивается число подключённых потребителей и диспетчерский персонал интуитивно, на основе своего личного опыта принимает ответственные решения.

В настоящее время существует несколько компьютерных программ, позволяющих выполнять теплогидравлические расчёты тепловых сетей большой размерности. Например: «ZULU», «ПОТОК», «БЕРНУЛЛИ».

При ограниченной пропускной способности тепловых сетей вопросы наладки гидравлических и тепловых режимов чрезвычайно актуальны.

Для тепловых сетей с открытым водоразбором указанные программы позволили выполнять расчёты режимов с максимальным водоразбором из подающей и обратной линий, что требуют Правила эксплуатации, а также выполнить паспортизацию сетей.

Программа «ZULU» позволяет выполнять наладочные расчёты с учётом увеличенных гидравлических сопротивлений отопительных систем абонентов и введет компенсацию на тепловые потери.

Опыт эксплуатации компьютерных программ показал их непригодность для расчёта режимов тепловых сетей в период пуска, так как время полного эксплуатационного теплогидравлического расчёта сетей крупного города достигает нескольких часов, когда потребители включаются постепенно, по мере готовности. Для расчёта пусковых режимов, особенно сложных, необходима разработка экстренных методов расчёта.

Ввиду того, что гидравлические сети относятся к сетям с существенной нелинейностью, применение методов эквивалентирования, используемых в линейных электрических сетях, невозможно. Поэтому возникает необходимость в разработке методов эквивалентирования (идентификации) для нелинейных гидравлических сетей.

Эквивалентирование позволяет уменьшить размерность сети до необходимых размеров, при которых остаётся возможность анализа работы источников, насосных станций, магистральных трубопроводов, осуществление подпитки и располагаемых гидравлических перепадов напоров у конечных потребителей.

1.4.2.1 Эквивалентирование участков гидравлической сети

Суть всех методов гидравлического расчета тепловых, водопроводных и других гидравлических сетей сводится к тому, что последовательно выполняются расчеты отдельных участков, количество которых в реальной конструкции сети может быть очень большим. Поэтому вполне естественно стремление к сокращению количества расчетных участков, которое достигается за счет их эквивалентирования.

Примером такого эквивалентирования является широко используемый метод [35], основанный на замене отдельных сосредоточенных отборов воды единым *путевым* расходом (непрерывная раздача расхода по пути). Реальная схема, состоящая из последовательности участков (рисунок 1.4.3), заменяется эквивалентной с одним участком (рисунок 1.4.4). Для соблюдения *баланса* расходов воды в сети эквивалентирование ведется с выполнением очевидного условия

$$q_i = \sum_{j=1}^{j=n+1} q_j, \quad (1.4.17)$$

где:

q_i - путевой расход на эквивалентном участке;

q_j - сосредоточенные отборы в реальной схеме.

Кроме того, для простоты расчетов предполагается, что:

$$S = \sum_{i=1}^{i=n} S_i \quad (1.4.18)$$

где:

S – сопротивление эквивалентного участка;

S_i – сопротивление реальных участков.

Для расчета потерь напора на участке с путевым расходом известно решение [36]

$$h = S_0 \cdot l \cdot \left(q_0^2 + q_i \cdot q_0 + \frac{q_i^2}{3} \right), \quad (1.4.19)$$

где:

S_0 – удельное сопротивление трубы;

l – длина участка;

q_T – транзитный расход через участок;

путевой и транзитный расходы связаны с общим входным расходом очевидным соотношением:

$$q_0 = q_i + q_0, \quad (1.4.20)$$

Можно показать, что расчет по (1.4.19) дает верное решение только в случае прямого транзита воды через участок, показанного на рисунке 1.4.4. Поэтому использование формулы (1.4.19) требует предварительного анализа на направление движения жидкости. Это создает дополнительные сложности, особенно при расчете кольцевых гидравлических сетей.

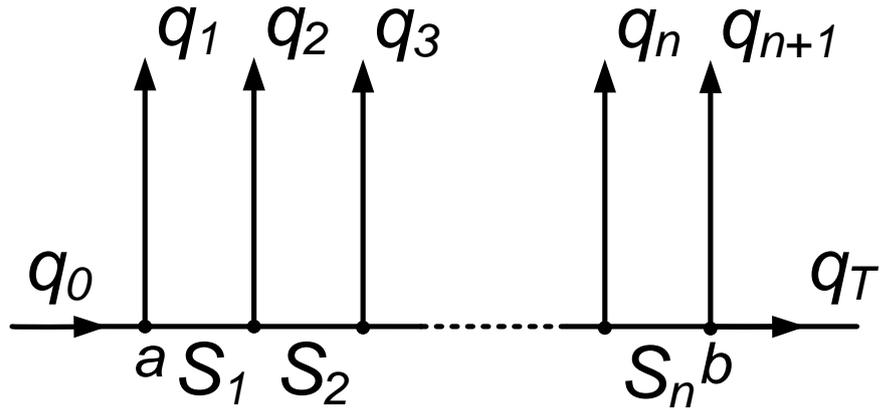


Рисунок 1.4.3 - Реальная схема участка гидравлической сети

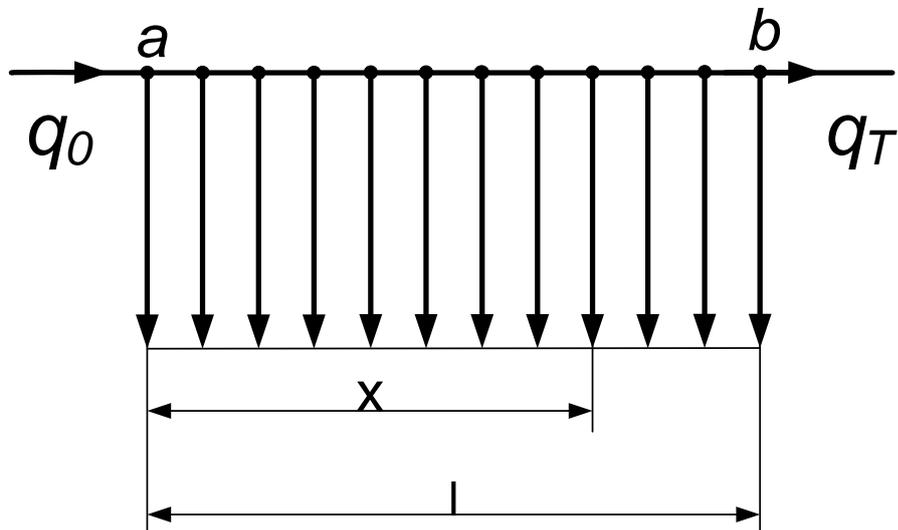


Рисунок 1.4.4 - Эквивалентная схема с путевым расходом

Рассмотрим формальное решение задачи. Будем считать во всех случаях расход положительным при движении от узла a к узлу b и отрицательным при обратном направлении движения. Будем также принимать за потери напора на участке разность напоров в узлах a и b , т. е.

$$h = H_a - H_b, \quad (1.4.21)$$

Расход в промежуточном сечении (рисунок 1.4.4), находящемся на расстоянии x от узла a :

$$q_x = q_0 - \frac{q_i}{l} x, \quad (1.4.22)$$

Потерю напора на элементарном участке dx запишем с учётом знака расхода

$$dh = S_0 \cdot dx \cdot q_x \cdot |q_x|. \quad (1.4.23)$$

Потеря напора на длине l от начала участка

$$h = \int_0^l dh = \int_0^l S_0 \left(q_0 - \frac{q_i}{l} x \right) \left| q_0 - \frac{q_i}{l} x \right| dx, \quad (1.4.24)$$

или

$$h = \frac{S_0 \cdot l}{3 \cdot q_i} \cdot \left[|q_i^3| - |(q_0 - q_0)^3| \right], \quad (1.4.25)$$

а с учётом (1.4.20)

$$h = \frac{S_0 \cdot l}{3 \cdot q_i} \cdot \left[|q_0^3| - |q_\delta^3| \right]. \quad (1.4.26)$$

Решения (1.4.25) и (1.4.26) справедливы для всех возможных режимов работы участка с путевым расходом. Можно показать, что уравнение (1.4.19) получается как частный случай общего решения (1.4.25).

При сопротивлениях и расходах, существенно различных по величине, эквивалентирование по методу путевого расхода приводит к значительным погрешностям. В настоящее время в таких случаях используется методика эквивалентирования, изложенная в [13]. Но она также требует знания направления движения жидкости и численное значение транзитного расхода, а это зачастую неизвестно.

Рассмотрим новый способ эквивалентирования узловых расходов. Суммарная потеря напора на всех участках исходной схемы (рисунок 1.4.3)

$$h = S_1 \cdot (q_0 - q_1)^2 + S_2 \cdot (q_0 - q_1 - q_2)^2 + S_3 \cdot (q_0 - q_1 - q_2 - q_3)^2 + \dots + S_n \cdot (q_0 - q_1 - q_2 - q_3 - q_4 - \dots - q_n)^2 \quad (1.4.27)$$

Представим величину потерь напора в виде

$$h = (\sqrt{h})^2. \quad (1.4.28)$$

Тогда уравнение (1.4.27) будет представлять квадратичную форму относительно переменных \sqrt{h} и q_0 . Можно показать, что квадратичная форма описывает гиперболу. Для нахождения уравнения асимптоты сделаем подстановку в (1.4.27)

$$\sqrt{h} = k \cdot q_0 + b. \quad (1.4.29)$$

Приравнивая к нулю суммы коэффициентов при старших степенях, получим систему уравнений для нахождения k и b .

$$k = \pm \sqrt{S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n}, \quad (1.4.30)$$

Или

$$k = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} S_i}; \quad (1.4.31)$$

$$b = -\frac{S_1 \cdot q_1 + S_2 \cdot (q_1 + q_2) + S_3 \cdot (q_1 + q_2 + q_3) + \dots + S_n \cdot (q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + \dots + q_n)}{\pm \sqrt{q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + \dots + q_n}}, \quad (1.4.32)$$

Или

$$b = -\frac{\sum_{i=1}^{i=n} S_i \sum_{j=1}^{j=n} q_j}{\pm \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} S_i}}. \quad (1.4.33)$$

После подстановки (1.4.31) и (1.4.33) в (1.4.29) получим уравнение асимптот

$$\sqrt{h} = \left(\pm \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} S_i} \right) \cdot \left(q_0 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} S_i \sum_{j=1}^{j=n} q_j}{\sum_{i=1}^{i=n} S_i} \right). \quad (1.4.34)$$

Возведём уравнение (1.4.34) в квадрат

$$h = \sum_{i=1}^{i=n} S_i \cdot \left(q_0 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} S_i \sum_{j=1}^{j=n} q_j}{\sum_{i=1}^{i=n} S_i} \right)^2. \quad (1.4.35)$$

Уравнение (1.4.35) описывает приближенную эквивалентную схему (рисунок 1.4.5), где $S_{\text{Э}}$ – сопротивление эквивалентного участка.

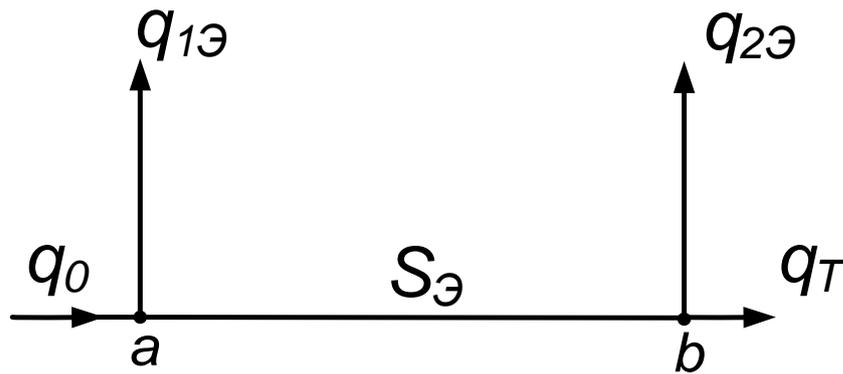


Рисунок 1.4.5 - Эквивалентная схема с узловыми расходами

$$S_{\text{Э}} = \sum_{i=1}^{i=n} S_i, \quad (1.4.36)$$

$q_{1\text{Э}}$ – эквивалентный узловый расход в начале участка,

$$q_{1\text{Э}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} S_i \sum_{j=1}^{j=n} q_j}{\sum_{i=1}^{i=n} S_i}; \quad (1.4.37)$$

$q_{2\text{Э}}$ – эквивалентный узловый расход в начале участка,

$$q_{2\text{Э}} = \sum_{i=1}^{i=n+1} q_i - q_{1\text{Э}}. \quad (1.4.38)$$

Замена гиперболической зависимости в уравнении потерь напора на асимптотическую не приводит к значительным погрешностям, так как при больших расходах q_0 имеем большие потери напора и ветвь гиперболы очень близко расположена от асимптоты, а при малых q_0 – как правило, малые потери напора и поэтому также вполне достаточно такой точности в технических расчётах.

1.4.2.2 Эквивалентирование и расчёт последовательно-паралельных и разветвлённых схем

Последовательно-параллельные схемы имеют наибольшее распространение в тепловых сетях.

Схемы, состоящие из последовательно-параллельных участков, являются кольцевыми и их расчёт и эквивалентирование представляет значительные трудности.

Последовательно-параллельные или цепочечные схемы характерны тем, что для каждого кольца или контура можно найти узел входа и узел выхода. Каждый контур, начиная с последнего, функционально зависим от предыдущего. Поэтому выявление зависимости участкового расхода от узлового в узле входа, представляет возможность построения метода гидравлического расчёта и эквивалентирования.

Рассмотрим контур, содержащий произвольное количество участков и узловых расходов, изображённый на рисунке 1.4.6.

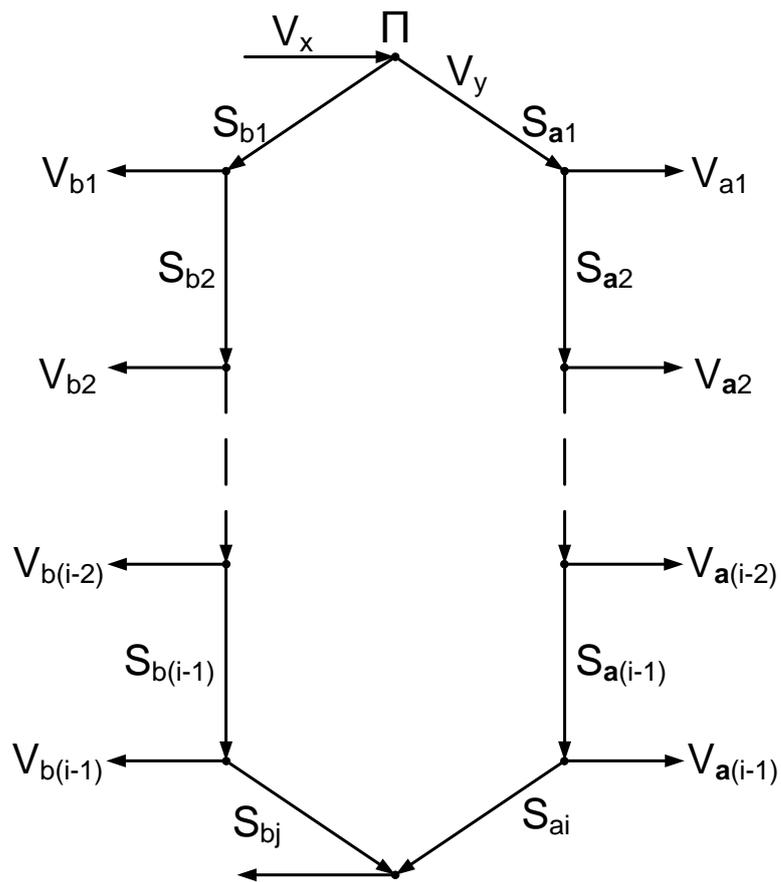


Рисунок 1.4.6 - Гидравлический контур

где:

Π – узел входа в контур;

O – узел выхода из контура;

i - число участков в правой ветви контура;

$i-1$ – число фиксированных расходов в правой ветви контура;

j - число участков в левой ветви контура;

$j-1$ - число фиксированных расходов в левой ветви контура;

S_i - сопротивления участков в правой ветви контура;

S_j - сопротивления участков в левой ветви контура;

V_{ai} - фиксированные расходы в правой ветви контура;

V_{bj} - фиксированные расходы в левой ветви контура;

V_x - расход, входящий в узел Π ;

V_y - расход по ветви.

При $V_x \rightarrow \infty$ потокораспределение в контуре устанавливается такое, как указано стрелками на рисунке 1.4.6, а при $V_x \rightarrow -\infty$ устанавливается противоположное направление.

В обоих случаях потокораспределение описывается одним уравнением II закона Кирхгофа с постановкой в него уравнения I закона Кирхгофа, которое имеет вид

$$\begin{aligned}
& S_{a1} \cdot V_y^2 + S_{a2} \cdot (V_y - V_{a1})^2 + \dots + S_{a(i-1)} \cdot \left(V_y - \sum_{l=1}^{l=i-2} V_{al} \right)^2 + \\
& + S_{ai} \cdot \left(V_y - \sum_{l=1}^{l=i-1} V_{al} \right)^2 - S_{b1} \cdot (V_x - V_y)^2 - S_{b2} \cdot (V_x - V_y - V_{b1})^2 - \dots - \\
& - S_{b(j-1)} \cdot \left(V_x - V_y - \sum_{l=1}^{l=j-2} V_{bl} \right)^2 - S_{bj} \cdot \left(V_x - V_y - \sum_{l=1}^{l=j-1} V_{bl} \right)^2 = 0
\end{aligned} \tag{1.4.39}$$

Можно показать, что данное уравнение описывает гиперболу или пару пересекающихся прямых и может быть преобразовано к виду

$$A \cdot V_x^2 + 2 \cdot B \cdot V_x \cdot V_y + C \cdot V_y^2 + 2 \cdot D \cdot V_x + 2 \cdot E \cdot V_y + F = 0 \tag{1.4.40}$$

Коэффициенты уравнения (1.4.40) определяются по следующим зависимостям:

$$A = - \sum_{l=1}^{l=j} S_{bl} ; \tag{1.4.41}$$

$$B = \sum_{l=1}^{l=j} S_{bl} ; \tag{1.4.42}$$

$$C = \sum_{l=1}^{l=i} S_{al} - \sum_{l=1}^{l=j} S_{bl} ; \tag{1.4.43}$$

$$D = - \sum_{l=2}^{l=j} S_{bl} \cdot \sum_{l=1}^{l-1} V_{bl} ; \tag{1.4.44}$$

$$E = \sum_{l=2}^{l=i} S_{al} \cdot \sum_{l=1}^{l-1} V_{al} - \sum_{l=2}^{l=j} S_{bl} \cdot \sum_{l=1}^{l-1} V_{bl} ; \tag{1.4.45}$$

$$F = \sum_{l=2}^{l=i} S_{al} \cdot \left(\sum_{l=1}^{l-1} V_{al} \right)^2 - \sum_{l=2}^{l=j} S_{bl} \cdot \left(\sum_{l=1}^{l-1} V_{bl} \right)^2; \quad (1.4.46)$$

Если схема закрытая, то есть не имеет фиксированных расходов, то уравнение (1.4.40) распадается на два уравнения прямых, из которых удовлетворяет физическому смыслу только одно. Если схема открытая, то есть с фиксированными расходами, то уравнение (1.4.40) описывает гиперболу, для которой можно найти асимптоты. Как и в случае с закрытой системой, физическому смыслу удовлетворяют только одна асимптота.

Уравнение асимптоты имеет вид:

$$V_y = K_x \cdot V_x + m, \quad (1.4.47)$$

Где коэффициенты определяются:

$$K_x = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^{l=i} S_{al}}{\sum_{l=1}^{l=j} S_{bl}}}}; \quad (1.4.48)$$

$$m = \frac{D - E \cdot K_x}{B - C \cdot K_x}. \quad (1.4.49)$$

Для закрытой схемы коэффициент $m=0$, т. е. уравнение (1.4.47) являются общим для открытых и закрытых систем.

Правомерность замены уравнения второго порядка на линейное уравнение асимптоты поясним на примере схемы треугольника, изображенного на рисунке 1.4.7, а на рисунке 1.4.8 представлено графическое изображение функциональной зависимости V_y от V_x .

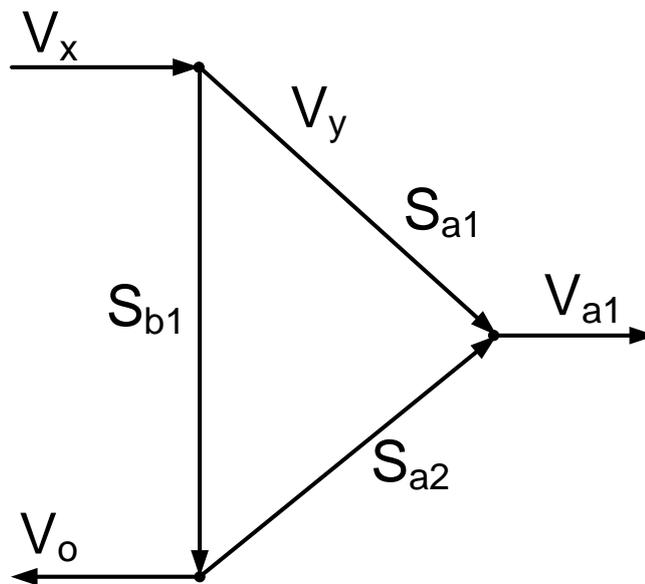


Рисунок 1.4.7 - Схема треугольника

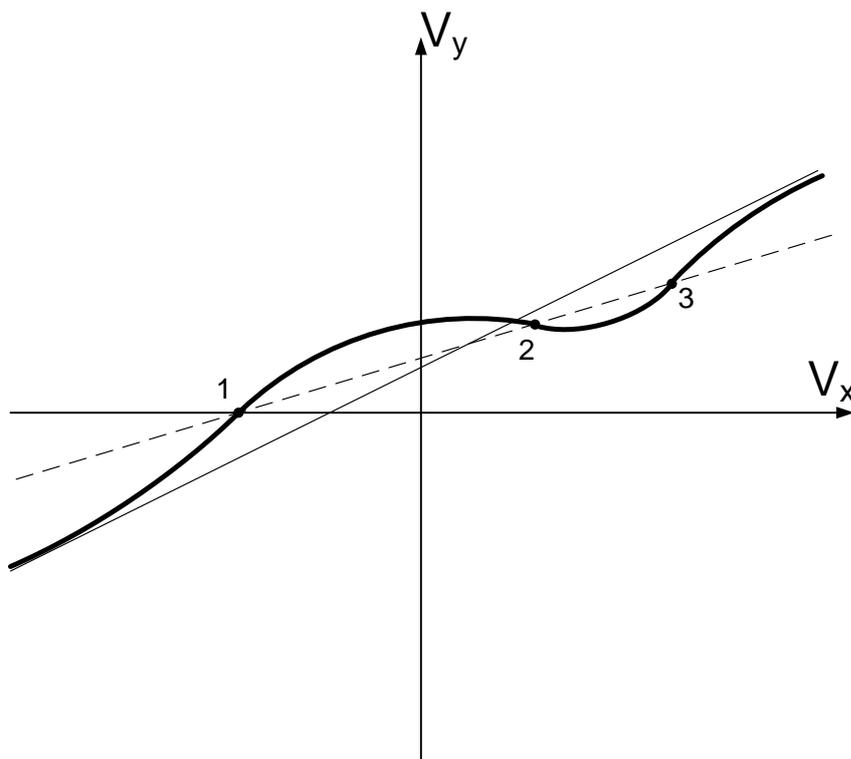


Рисунок 1.4.8 - Зависимость участкового расхода от узлового

Как видно из рисунка 1.4.8 левее точки 1 и правее точки 3, зависимость имеет гиперболический характер, что соответствует $V_x \rightarrow -\infty$ и $V_x \rightarrow \infty$. Между точками 1 и 3 происходят в контуре смены направлений потоков на участках и поэтому зависимости могут иметь вид любой кривой второго порядка. Как видно из графика, асимптота дает практически совпадающие значения с гиперболы при больших значениях V_x . Кривая зависимо-

сти V_y от V_x является кусочной. Для контура треугольника она состоит из трех частей. Вообще для контура с произвольным числом участков количество кусков кривых второго порядка равно числу участков.

На рисунке 1.4.8 пунктиром нанесена прямая, определяемая линеаризованным уравнением Хасилева В. Я.

$$\sqrt{S_{a1}} \cdot V_y - \sqrt{S_{a1}} \cdot (V_y - V_1) - \sqrt{S_{b1}} \cdot (V_x - V_y) = 0. \quad (1.4.50)$$

Эта прямая проходит через точки перехода функциональной зависимости с одной кривой второго порядка на другую. Для контуров с большим числом участков это свойство размывается, однако кривая зависимости V_y от V_x сохраняет змеевидную форму. Отклонение гиперболы от асимптоты в последовательно-параллельных схемах при практических расчетах почти не заметны. Это объясняется тем, что нормальные режимы эксплуатации цепочечных схем предполагают гиперболическое потокораспределение при значительном удалении от точек перехода зависимости. При других режимах, хотя относительные отклонения могут быть и значительными, но и абсолютное значение в этих режимах расходов и потерь напора ничтожное, уравнение асимптоты хорошо отражает физический смысл и может применяться для инженерных расчетов. С помощью уравнения асимптоты легко, например, найти значение расходов, при которых наступает реверс, т. е. изменение направления потоков на противоположное.

Уравнение (1.4.47) можно преобразовать к более удобному виду, раскрыв содержание коэффициента m .

$$V_y = K_x \cdot V_x + K_{a1} \cdot V_{a1} + K_{a2} \cdot V_{a2} + \dots + K_{ai} \cdot V_{ai} - K_{b1} \cdot V_{b1} - K_{b2} \cdot V_{b2} - \dots - K_{bj} \cdot V_{bj}, \quad (1.4.51)$$

где:

$$K_{an} = \frac{\left(\sum_{l=n+1}^{l=i} S_{al} \right) \cdot K_x}{B + C \cdot K_x}; \quad (1.4.52)$$

$$K_{bm} = \frac{\left(\sum_{l=m+1}^{l=i} S_{bl} \right) \cdot (1 - K_x)}{B + C \cdot K_x}; \quad (1.4.53)$$

n – номер узлового расхода в правой ветви, считая от узла входа П;

m – номер узлового расхода в левой ветви, считая от узла входа П.

Уравнение (1.4.51) линейно и позволяет применить для анализа последовательно-параллельных схем хорошо разработанный математический аппарат решения систем линейных уравнений.

Эквивалентирование и расчет последовательно-параллельных схем.

Последовательно-параллельные схемы находят наибольшее распространение в тепловых сетях. Поэтому ниже будет рассмотрен метод расчета потокораспределения, ориентированный на тепловые сети, хотя принципиально метод применим к любым гидравлическим сетям.

На рисунке 1.4.9 изображена цепочечная тепловая сеть с произвольным числом абонентов.

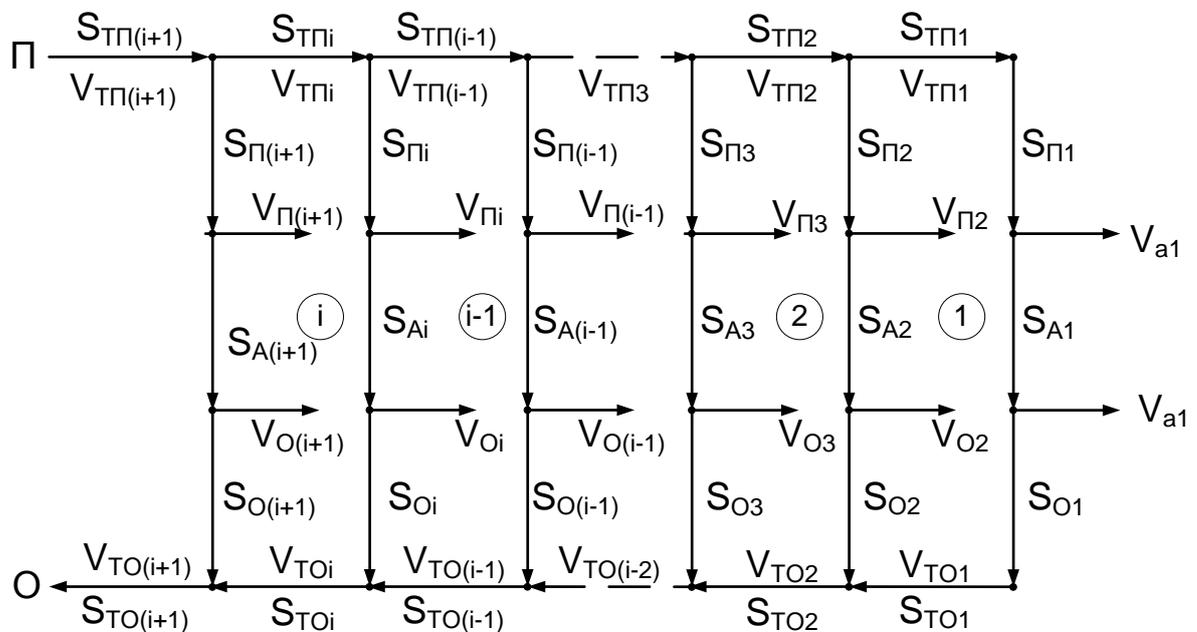


Рисунок 1.4.9 - Схема цепочечной тепловой сети

Принятые обозначения на схеме, рисунок 1.4.9.

Точки «П», «О» - узлы входа и выхода цепочечной сети;

$S_{ТП}, \dots, S_{ТП(i+1)}$ – сопротивления транзитных участков подающей линии;

$S_{ТО1}, \dots, S_{ТО(i+1)}$ – сопротивления транзитных участков обратной линии;

$S_{П1}, \dots, S_{П(i+1)}$ – сопротивления транзитных участков обратной линии;

$S_{A1}, \dots, S_{A(i+1)}$ – сопротивления абонентов;

$V_{ТП1}, \dots, V_{ТП(i+1)}$ – расходы воды по транзитным участкам подающей линии;

$V_{ТО1}, \dots, V_{ТО(i+1)}$ – расходы воды по транзитным участкам обратной линии;

$V_{\Pi 1}, \dots, V_{\Pi(i+1)}$ – расходы воды у абонентов на горячее водоснабжение из подающей линии;

$V_{O1}, \dots, V_{O(i+1)}$ – расходы воды у абонентов на горячее водоснабжение из обратной линии;

$\textcircled{1}, \dots, \textcircled{i}$ – номер контура.

Используя методику, изложенную в выражениях (1.4.41-1.4.49), запишем для произвольного контура \textcircled{j} , где $j=1,2,3\dots i$, уравнения, необходимые для определения коэффициентов асимптоты:

$$A_j = S_{\dot{I}(j+1)} + S_{\dot{A}(j+1)} + S_{\dot{I}(j+1)}; \quad (1.4.54)$$

$$B_j = -S_{\dot{I}(j+1)} - S_{\dot{A}(j+1)} - S_{\dot{I}(j+1)}; \quad (1.4.55)$$

$$C_j = -S_{\dot{O}j} - (S_{\dot{I}j} + S_{\dot{A}j} + S_{\dot{O}j}) \cdot (1 - k_{(j-1)})^2 - S_{\dot{O}j} + S_{\dot{I}(j+1)} + S_{\dot{A}(j+1)} + S_{\dot{I}(j+1)}; \quad (1.4.56)$$

$$D_j = S_{\dot{A}(j+1)} \cdot V_{\dot{I}(j+1)} - S_{\dot{I}(j+1)} \cdot (V_{\dot{I}(j+1)} - V_{\dot{I}(j+1)}); \quad (1.4.57)$$

$$E_j = [S_{\dot{I}j} \cdot m_{(j-1)} + S_{\dot{A}j} \cdot (m_{(j-1)} + V_{\dot{I}j}) + S_{\dot{O}j} \cdot (m_{(j-1)} + V_{\dot{I}j} + V_{\dot{O}j})] \cdot (1 - K_{(j-1)}) + S_{\dot{TO}j} \cdot \sum_{l=1}^j (V_{\dot{I}j} + V_{\dot{O}j}) + S_{\dot{A}(j+1)} \cdot V_{\dot{I}(j+1)} + S_{\dot{O}(j+1)} \cdot (V_{\dot{I}(j+1)} + V_{\dot{O}(j+1)}); \quad (1.4.58)$$

$$F_j = -S_{\dot{I}j} \cdot m_{(j-1)}^2 - S_{\dot{A}j} \cdot (m_{(j-1)} + V_{\dot{I}j})^2 - S_{\dot{O}j} \cdot (m_{(j-1)} + V_{\dot{I}j} + V_{\dot{O}j})^2 - S_{\dot{TO}j} \cdot \left[\sum_{l=1}^j (V_{\dot{I}j} + V_{\dot{O}j})^2 \right] + S_{\dot{A}(j+1)} \cdot V_{\dot{I}(j+1)}^2 + S_{\dot{O}(j+1)} \cdot (V_{\dot{I}(j+1)} + V_{\dot{O}(j+1)})^2; \quad (1.4.59)$$

$$K_j = \frac{-B_j - \sqrt{B_j^2 - A_j \cdot C_j}}{C_j}; \quad (1.4.60)$$

$$m_j = \frac{-D_j - E_j \cdot K_j}{B_j + C_j \cdot K_j}. \quad (1.4.61)$$

Проведя вычисления по формуле (1.4.54-1.4.61) для всех контуров схемы, мы получаем систему линейных уравнений

$$\left. \begin{aligned} V_{\dot{\alpha} 1} &= K_1 \cdot V_{\dot{\alpha} 2} + m_1 \\ V_{\dot{\alpha} 2} &= K_2 \cdot V_{\dot{\alpha} 3} + m_2 \\ V_{\dot{\alpha} 3} &= K_3 \cdot V_{\dot{\alpha} 4} + m_3 \\ \dots\dots\dots \\ V_{\dot{\alpha} i} &= K_i \cdot V_{\dot{\alpha} (i+1)} + m_i \end{aligned} \right\} \quad (1.4.62)$$

Система уравнений (1.4.62) позволяет при известном расходе на всю схему $V_{\dot{\alpha} (i+1)}$ определить транзитные участковые расходы по всем контурам. Определение расходов по остальным участкам схемы не вызывает затруднений, так как, если известен хотя бы один участковый расход в контуре, то остальные определяют из линейных уравнений Кирхгофа.

Система (1.4.62) позволяет привести схему (рисунок 1.4.9) к приближению эквивалентной, изображенной на рисунке 1.4.10.

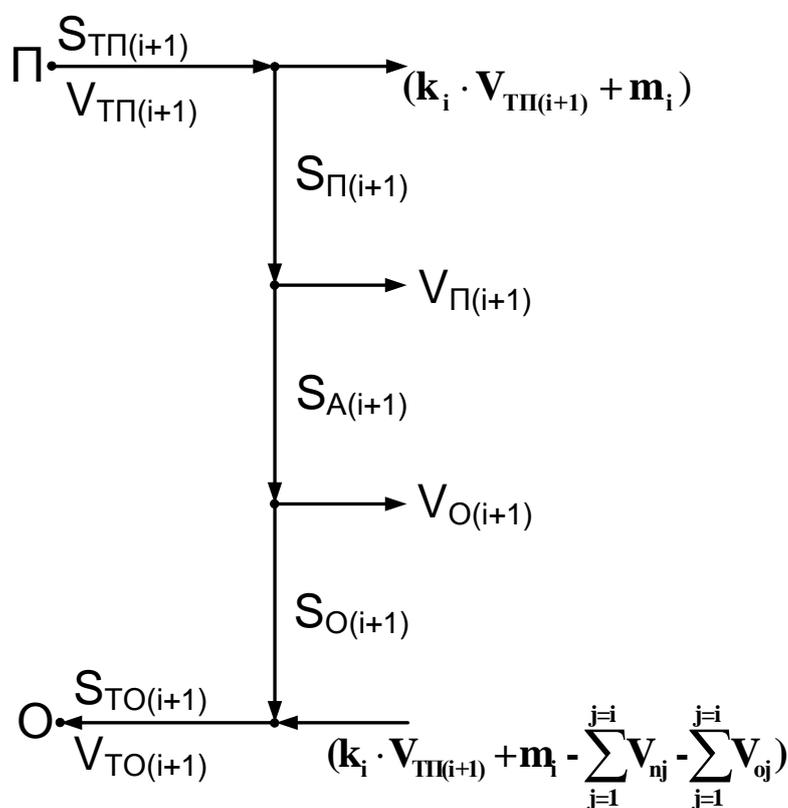


Рисунок 1.4.10 - Эквивалентный абонент

Потери напора в схеме (рисунок 1.4.10) между точками «П»-«О» определяются следующим образом

$$\begin{aligned}
 H_{\bar{i}-\bar{j}} = & S_{\check{\alpha}(i+1)} \cdot V_{\check{\alpha}(i+1)}^2 + S_{\bar{i}(i+1)} \cdot \left[(1 - K_i) \cdot V_{\check{\alpha}(i+1)} - m_i \right]^2 + \\
 & + S_{A(i+1)} \cdot \left[(1 - K_i) \cdot V_{\check{\alpha}(i+1)} - m_i - V_{\bar{i}(i+1)} \right]^2 + \\
 & + S_{O(i+1)} \cdot \left[(1 - K_i) \cdot V_{\check{\alpha}(i+1)} - m_i - V_{\bar{i}(i+1)} - V_{O(i+1)} \right]^2 + \\
 & + S_{TO(i+1)} \cdot \left(V_{\check{\alpha}(i+1)} - \sum_{j=1}^{j=i+1} V_{\bar{i}j} - \sum_{j=1}^{j=i+1} V_{Oj} \right)^2
 \end{aligned} \tag{1.4.62}$$

При заданной величине перепада напоров между точками «П»-«О» $H_{\text{П-О}}$, уравнение (1.4.62) легко разрешается относительно расхода $V_{\check{\alpha}(i+1)}$. Проведенные расчёты по изложенной методике для тупиковых сетей показывают хорошую сходимость по сравнению с методикой, основанной на решении системы уравнений второго порядка.

Эквивалентирование и расчет разветвленных схем

Схемы тепловых сетей состоят из объединений цепочечных и разветвленных фрагментов.

Рассмотрим схему разветвленной тепловой сети произвольным числом параллельных ветвей, рисунок 1.4.11. На рисунке 1.4.12 представлена эквивалентная схема в виде цепочечной.

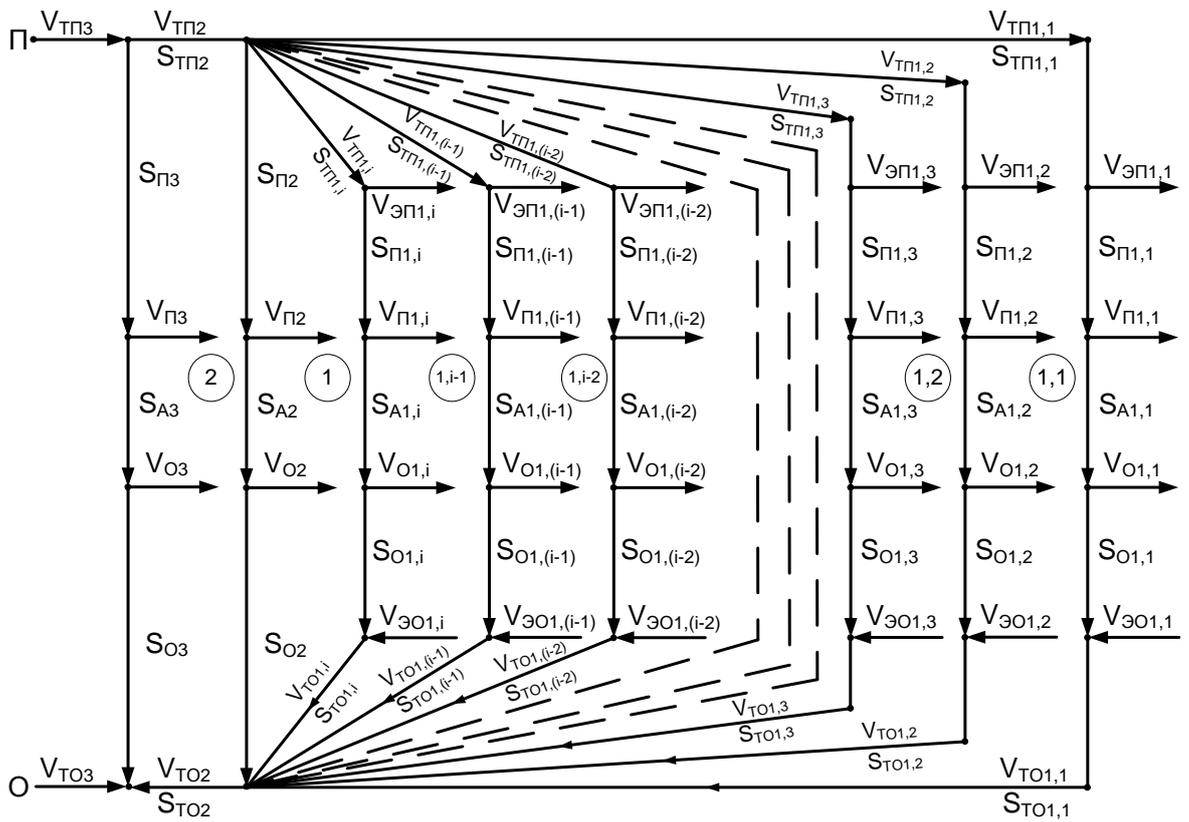


Рисунок 1.4.11 - Разветвленная схема

Отличие схемы, изображенной на рисунке 1.4.11, от схемы, изображенной на рисунке 1.4.12, заключается в фиктивных нулевых сопротивлениях $S_{\delta i 1}, S_{\delta i 2}, \dots, S_{\delta i i}, S_{\delta i 1}, S_{\delta i 2}, \dots, S_{\delta i i}$. При этом естественно возникают фиктивные участковые расходы в подающей линии $V_{\delta i 1}, V_{\delta i 2}, \dots, V_{\delta i (i-1)}, V_{\delta i 1}$ и фиктивные участковые расходы в обратной линии $V_{\delta i 1}, V_{\delta i 2}, \dots, V_{\delta i (i-1)}, V_{\delta i 1}$. На схеме так же изображены узловые расходы $V_{\gamma i 1,1}, V_{\gamma i 1,2}, \dots, V_{\gamma i 1,i}$, которые являются суммарными расходами для присоединенных к параллельным ветвям цепочных и разветвленных схем. И суммарные узловые расходы по обратной линии $V_{\gamma i 1,1}, V_{\gamma i 1,2}, \dots, V_{\gamma i 1,i}$, которые также проходят от присоединенных цепочных и разветвленных схем.

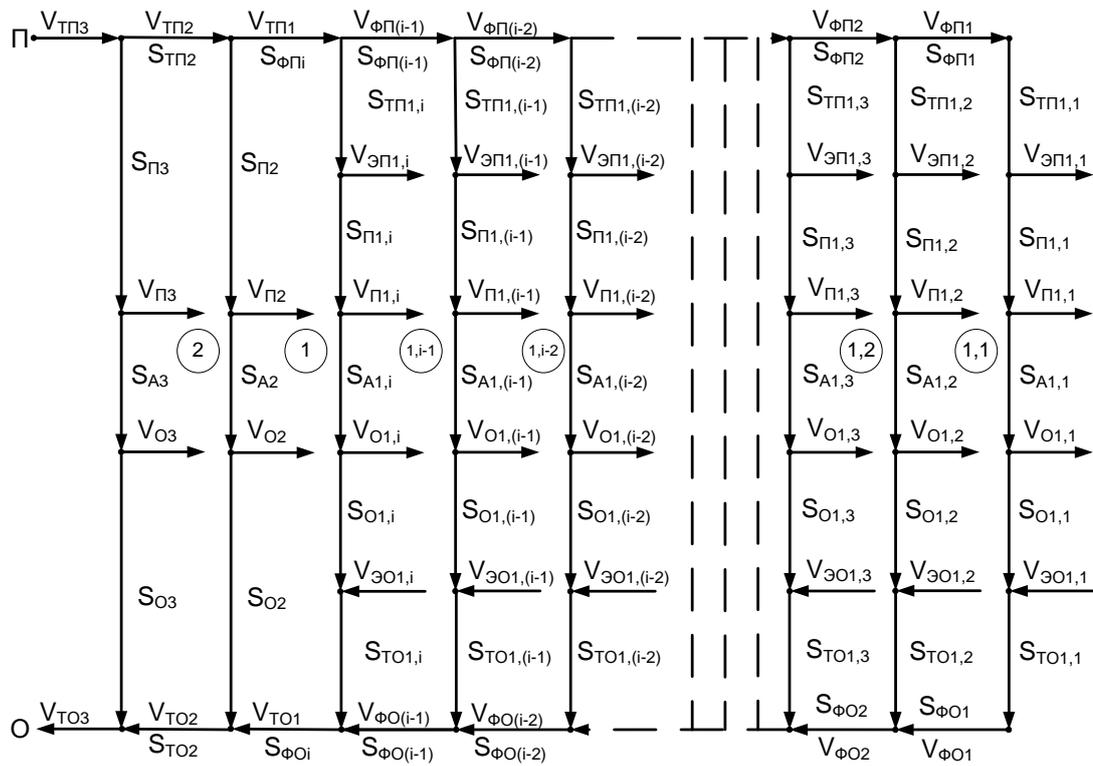


Рисунок 1.4.12 - Эквивалентная схема

Расходы от присоединенных схем могут быть записаны

$$\left. \begin{aligned}
 V_{\dot{Y}i 1,1} &= K_{1,1} \cdot V_{\dot{\delta}i 1} + m_{1,1} \\
 V_{\dot{Y}i 1,2} &= K_{1,2} \cdot (V_{\dot{\delta}i 2} - V_{\dot{\delta}i 1}) + m_{1,2} \\
 V_{\dot{Y}i 1,3} &= K_{1,3} \cdot (V_{\dot{\delta}i 3} - V_{\dot{\delta}i 2}) + m_{1,3} \\
 &\dots \\
 &\dots \\
 &\dots \\
 V_{\dot{Y}i 1,i} &= K_{1,i} \cdot (V_{\dot{\delta}i 1} - V_{\dot{\delta}i (i-1)}) + m_{1,i} \\
 V_{\dot{Y}i 1,1} &= K_{1,1} \cdot V_{\dot{\delta}i 1} + m_{1,1} - V_{\dot{A}A1,1} \\
 V_{\dot{Y}i 1,2} &= K_{1,2} \cdot (V_{\dot{\delta}i 2} - V_{\dot{\delta}i 1}) + m_{1,2} - V_{\dot{A}A1,2} \\
 V_{\dot{Y}i 1,3} &= K_{1,3} \cdot (V_{\dot{\delta}i 3} - V_{\dot{\delta}i 2}) + m_{1,3} - V_{\dot{A}A1,3} \\
 &\dots \\
 &\dots \\
 &\dots \\
 V_{\dot{Y}i 1,i} &= K_{1,i} \cdot (V_{\dot{\delta}i 1} - V_{\dot{\delta}i (i-1)}) + m_{1,i} - V_{\dot{A}A1,i}
 \end{aligned} \right\} \quad (1.4.64)$$

где $V_{\dot{A}A j}$ - сумма расходов воды на горячее водоснабжение

без учета $V_{\dot{Y} j}$ и $V_{\dot{Y} j}$; $j = 1, 2, 3 \dots i$

Уравнения, необходимые для определения коэффициентов асимптоты для разветвленной схемы, имеют вид:

$$A_{1,j} = S_{\check{\alpha} 1,(j+1)} + (S_{\check{I} 1,(j+1)} + S_{A1,(j+1)} + S_{O1,(j+1)}) \cdot (1 - K_{1,(j+1)})^2 + S_{\check{\alpha} O1,(j+1)}; \quad (1.4.65)$$

$$B_{1,j} = -S_{\check{\alpha} 1,(j+1)} - (S_{\check{I} 1,(j+1)} + S_{A1,(j+1)} + S_{O1,(j+1)}) \cdot (1 - K_{1,(j+1)})^2 - S_{\check{\alpha} O1,(j+1)}; \quad (1.4.66)$$

$$C_{1,j} = S_{\check{\alpha} 1,(j+1)} + (S_{\check{I} 1,(j+1)} + S_{A1,(j+1)} + S_{O1,(j+1)}) \cdot (1 - K_{1,(j+1)})^2 + S_{\check{\alpha} O1,(j+1)} - \\ - [S_{\check{\alpha} 1,j} + (S_{\check{I} 1,j} + S_{A1,j} + S_{O1,j}) \cdot (1 - K_{1,j})^2 + S_{\check{\alpha} O1,j}] \cdot (1 - K_{\hat{O},(j-1)})^2; \quad (1.4.67)$$

$$D_{1,j} = \left[\begin{array}{l} -S_{\check{I} 1,(j+1)} \cdot m_{1,(j+1)} - S_{A1,(j+1)} \cdot (m_{1,(j+1)} + V_{\check{I} 1,(j+1)}) \\ -S_{O1,(j+1)} \cdot (m_{1,(j+1)} + V_{\check{I} 1,(j+1)} + V_{O1,(j+1)}) \end{array} \right] \cdot (1 - K_{1,(j+1)}) - \\ - S_{\check{\alpha} O1,(j+1)} \cdot (V_{\check{I} 1,(j+1)} + V_{O1,(j+1)} + V_{\check{A}\check{A}1,(j+1)}) \quad (1.4.68)$$

$$E_{1,j} = \left[\begin{array}{l} S_{\check{I} 1,(j+1)} \cdot m_{1,(j+1)} + S_{A1,(j+1)} \cdot (m_{1,(j+1)} + V_{\check{I} 1,(j+1)}) \\ + S_{O1,(j+1)} \cdot (m_{1,(j+1)} + V_{\check{I} 1,(j+1)} + V_{O1,(j+1)}) \end{array} \right] \cdot (1 - K_{1,(j+1)}) + \\ + S_{\check{\alpha} O1,(j+1)} \cdot (V_{\check{I} 1,(j+1)} + V_{O1,(j+1)} + V_{\check{A}\check{A}1,(j+1)}) + \\ + \left\{ \begin{array}{l} S_{\check{\alpha} 1,(j+1)} \cdot m_{\hat{O},(j-1)} + \left[\begin{array}{l} S_{\check{I} 1,j} \cdot [m_{\hat{O},(j-1)} \cdot (1 - K_{1,j}) + m_{1,j}] + \\ + S_{A1,j} \cdot [m_{\hat{O},(j-1)} \cdot (1 - K_{1,j}) + m_{1,j} + V_{\check{I} 1,j}] + \\ + S_{O1,j} \cdot [m_{\hat{O},(j-1)} \cdot (1 - K_{1,j}) + m_{1,j} + V_{\check{I} 1,j} + V_{O1,j}] \end{array} \right] \cdot (1 - K_{1,j}) + \\ + S_{\check{\alpha} O1,j} \cdot (m_{\hat{O},(j-1)} + V_{\check{I} 1,j} + V_{O1,j} + V_{\check{A}\check{A}1,j}) \end{array} \right\} \times \\ \times (1 - K_{\hat{O},(j-1)}) \quad (1.4.69)$$

$$F_{1,j} = S_{\check{I} 1,(j+1)} \cdot m_{1,(j+1)}^2 + S_{A1,(j+1)} \cdot (m_{1,(j+1)} + V_{\check{I} 1,(j+1)})^2 + \\ + S_{O1,(j+1)} \cdot (m_{1,(j+1)} + V_{\check{I} 1,(j+1)} + V_{O1,(j+1)})^2 + \\ + S_{\check{\alpha} O1,(j+1)} \cdot (V_{\check{I} 1,(j+1)} + V_{O1,(j+1)} + V_{\check{A}\check{A}1,(j+1)})^2 - \\ - S_{\check{\alpha} 1,(j+1)} \cdot m_{\hat{O},(j-1)}^2 + S_{\check{I} 1,j} \cdot [m_{\hat{O},(j-1)} \cdot (1 - K_{1,j}) + m_{1,j}]^2 - \\ - S_{A1,j} \cdot [m_{\hat{O},(j-1)} \cdot (1 - K_{1,j}) + m_{1,j} + V_{\check{I} 1,j}]^2 - \\ - S_{O1,j} \cdot [m_{\hat{O},(j-1)} \cdot (1 - K_{1,j}) + m_{1,j} + V_{\check{I} 1,j} + V_{O1,j}]^2 - \\ - S_{\check{\alpha} O1,j} \cdot (m_{\hat{O},(j-1)} + V_{\check{I} 1,j} + V_{O1,j} + V_{\check{A}\check{A}1,j})^2 \quad (1.4.70)$$

$$K_{\hat{\sigma}_j} = \frac{-B_{1,j} - \sqrt{B_{1,j}^2 - C_{1,j} \cdot A_{1,j}}}{C_{1,j}}; \quad (1.4.71)$$

$$m_{\hat{\sigma}_j} = \frac{-D_{1,j} - E_{1,j} \cdot K_{\hat{\sigma}_j}}{B_{1,j} + C_{1,j} \cdot K_{\hat{\sigma}_j}}. \quad (1.4.72)$$

Таким образом, проведя вычисления по формулам (1.4.65 - 1.4.72), мы получили систему линейных уравнений для контуров $\textcircled{1,1}$; $\textcircled{1,2}$; ... $\textcircled{1,i-1}$

$$\left. \begin{aligned} V_{\hat{\sigma}_1} &= K_{\hat{\sigma}_1} \cdot V_{\hat{\sigma}_2} + m_{\hat{\sigma}_1} \\ V_{\hat{\sigma}_2} &= K_{\hat{\sigma}_2} \cdot V_{\hat{\sigma}_3} + m_{\hat{\sigma}_2} \\ \dots & \\ \dots & \\ V_{\hat{\sigma}_{(i-1)}} &= K_{\hat{\sigma}_{(i-1)}} \cdot V_{\hat{\sigma}_1} + m_{\hat{\sigma}_{(i-1)}} \end{aligned} \right\} \quad (1.4.73)$$

Тем самым схема, изображенная на рисунке 1.4.12, приводится к асимптотически эквивалентной схеме, изображенной на рисунке 1.4.13.

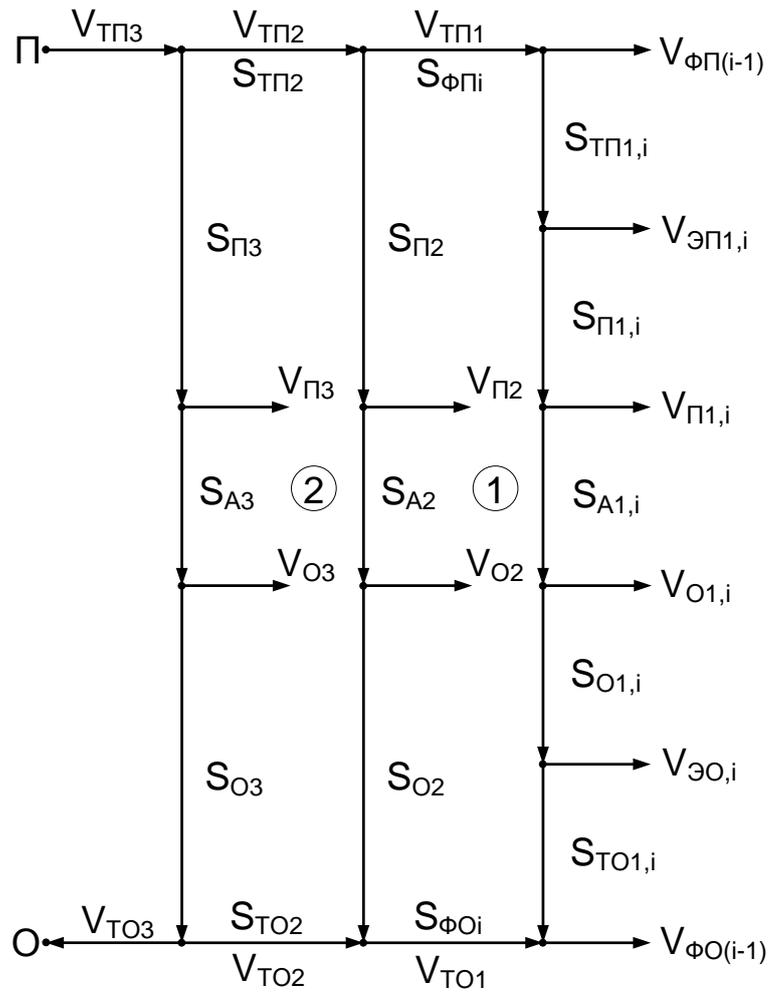


Рисунок 1.4.13 - Асимптотически эквивалентная схема

Схема (рисунок 1.4.13), хотя и является цепочечной, имеет различное число участков в контурах, поэтому уравнения для определения коэффициентов асимптоты имеют несколько иной вид:

$$A_1 = S_{i_2} + S_{A2} + S_{i_2}; \quad (1.4.74)$$

$$B_1 = -S_{i_2} - S_{A2} - S_{i_2}; \quad (1.4.75)$$

$$C_2 = S_{i_2} + S_{A2} + S_{i_2} - \left[S_{\alpha_{1,i}} + (S_{i_{1,i}} + S_{A1,i} + S_{O1,i}) \cdot (1 - K_{1,i})^2 + S_{\alpha_{1,i}} \right] \cdot (1 - K_{\delta(i-1)})^2; \quad (1.4.76)$$

$$D_1 = -S_{A2} \cdot V_{i_2} - S_{i_2} \cdot (V_{i_2} - V_{i_2}); \quad (1.4.77)$$

$$E_1 = S_{A2} \cdot V_{\bar{I}2} + S_{\bar{I}2} \cdot (V_{\bar{I}2} + V_{O2}) + \left\{ \begin{array}{l} S_{\bar{I}1,i} \cdot \left[m_{\hat{O}(i-1)} \cdot (1 - K_{1,i}) + m_{1,i} \right] + \\ S_{\bar{\alpha}1,i} \cdot m_{\hat{O}(i-1)} + \left[S_{A1,i} \cdot \left(m_{\hat{O}(i-1)} \cdot (1 - K_{1,i}) + m_{1,i} + V_{\bar{I}1,i} \right) + \right. \\ \left. + S_{\bar{I}1,i} \cdot \left(m_{\hat{O}(i-1)} \cdot (1 - K_{1,i}) + m_{1,i} + V_{\bar{I}1,i} + V_{\bar{I}1,i} \right) \right] \cdot (1 - K_{1,i}) + \\ \left. + S_{TO1,i} \cdot \left(m_{\hat{O}(i-1)} + V_{\bar{I}1,i} + V_{\bar{I}1,i} + V_{\bar{A}\bar{A}1,i} \right) \right\} \cdot (1 - K_{\hat{O}(i-1)}); \quad (1.4.78)$$

$$F_1 = S_{A2} \cdot V_{\bar{I}2}^2 + S_{\bar{I}2} \cdot (V_{\bar{I}2} + V_{\bar{I}2})^2 - S_{\bar{\alpha}1,i} \cdot m_{\hat{O}(i-1)}^2 - S_{\bar{I}1,i} \cdot \left(m_{\hat{O}(i-1)} \cdot (1 - K_{1,i}) + m_{1,i} \right)^2 - \\ - S_{A1,i} \cdot \left[m_{\hat{O}(i-1)} \cdot (1 - K_{1,i}) + m_{1,i} + V_{\bar{I}1,i} \right]^2 - S_{\bar{I}1,i} \cdot \left[\begin{array}{l} m_{\hat{O}(i-1)} \cdot (1 - K_{1,i}) + \\ + m_{1,i} + V_{\bar{I}1,i} + V_{O1,i} \end{array} \right]^2 - \\ - S_{TO1,i} \cdot \left(m_{\hat{O}(i-1)} + V_{\bar{I}1,i} + V_{O1,i} + V_{\bar{A}\bar{A}1,i} \right)^2; \quad (1.4.79)$$

$$K_1 = \frac{-B_1 - \sqrt{B_1^2 - C_1 \cdot \bar{A}_1}}{C_1}; \quad (1.4.80)$$

$$m_1 = \frac{-D_1 - E_1 \cdot K_1}{B_1 + C_1 \cdot K_1}. \quad (1.4.81)$$

Далее для контура $\textcircled{2}$ и последующих контуров, если они имеются, расчет проводится по системе уравнений (1.4.54 - 1.4.61) для цепочечной схемы.

В заключение рассмотрим наиболее часто встречающийся случай разветвляющейся тепловой сети, когда в месте разветвления сети отсутствует абонент, то есть $S_{\bar{I}2} = S_{\bar{A}2} = S_{\bar{I}2} = \infty$; $V_{\bar{I}2} = 0$; $V_{O2} = 0$. В этом случае образуется контур из сопротивлений $S_{\bar{\alpha}2}$, $S_{\hat{O}i}$, $S_{\bar{\alpha}1,i}$, $S_{\bar{I}1,i}$, $S_{A1,i}$, $S_{O1,i}$, $S_{\bar{\alpha}O1,i}$, $S_{\hat{O}O1}$, $S_{\bar{\alpha}O2}$, S_{O3} , $S_{\bar{A}3}$, $S_{\bar{I}3}$.

Уравнение асимптоты для данного контура определяется из выражений:

$$A_2 = S_{\bar{I}3} + S_{\bar{A}3} + S_{\bar{I}3}; \quad (1.4.82)$$

$$B_2 = -S_{\bar{I}3} - S_{\bar{A}3} - S_{\bar{I}3}; \quad (1.4.83)$$

$$C_2 = S_{\bar{I}3} + S_{A3} + S_{\bar{I}3} - S_{\bar{\alpha}2} - \left[S_{\bar{\alpha}1,i} + (S_{\bar{I}1,i} + S_{A1,i} + S_{O1,i}) \cdot (1 - K_{1,i})^2 + S_{\bar{\alpha}1,i} \right] \times \\ \times (1 - K_{\hat{O}(i-1)})^2 - S_{\hat{O}O2} \quad (1.4.84)$$

$$D_2 = -S_{A3} \cdot V_{\bar{I}3} - S_{\bar{I}3} \cdot (V_{\bar{I}3} + V_{\bar{I}3}); \quad (1.4.85)$$

$$E_2 = S_{A3} \cdot V_{\bar{I}3} + S_{\bar{I}3} \cdot (V_{\bar{I}3} + V_{O3}) + \\ + \left\{ \begin{array}{l} S_{\bar{\alpha}1,i} \cdot m_{\hat{O}(i-1)} + \left[\begin{array}{l} S_{\bar{I}1,i} \cdot [m_{\hat{O}(i-1)} \cdot (1 - K_{1,i}) + m_{1,i}] + \\ + S_{A1,i} \cdot (m_{\hat{O}(i-1)} \cdot (1 - K_{1,i}) + m_{1,i} + V_{\bar{I}1,i}) + \\ + S_{\bar{I}1,i} \cdot (m_{\hat{O}(i-1)} \cdot (1 - K_{1,i}) + m_{1,i} + V_{\bar{I}1,i} + V_{\bar{I}1,i}) \end{array} \right] \cdot (1 - K_{1,i}) + \\ + S_{TO1,i} \cdot (m_{\hat{O}(i-1)} + V_{\bar{I}1,i} + V_{\bar{I}1,i} + V_{\hat{A}\hat{A}1,i}) \end{array} \right\} \times \\ \times (1 - K_{\hat{O}(i-1)}) + S_{TO2} \cdot (V_{\bar{I}1,i} + V_{\bar{I}1,i} + V_{\hat{A}\hat{A}1,i} + V_{\hat{A}\hat{A}\hat{N}}) \quad (1.4.86)$$

$$F_2 = S_{A3} \cdot V_{\bar{I}3}^2 + S_{\bar{I}3} \cdot (V_{\bar{I}3} + V_{\bar{I}3})^2 - S_{\bar{\alpha}1,i} \cdot m_{\hat{O}(i-1)}^2 - S_{\bar{I}1,i} \cdot (m_{\hat{O}(i-1)} \cdot (1 - K_{1,i}) + m_{1,i})^2 - \\ - S_{A1,i} \cdot [m_{\hat{O}(i-1)} \cdot (1 - K_{1,i}) + m_{1,i} + V_{\bar{I}1,i}]^2 - S_{\bar{I}1,i} \cdot \left[\begin{array}{l} m_{\hat{O}(i-1)} \cdot (1 - K_{1,i}) + \\ + m_{1,i} + V_{\bar{I}1,i} + V_{O1,i} \end{array} \right]^2 - \\ - S_{TO1,i} \cdot (m_{\hat{O}(i-1)} + V_{\bar{I}1,i} + V_{O1,i} + V_{\hat{A}\hat{A}1,i})^2 - S_{TO2} \cdot (V_{\bar{I}1,i} + V_{O1,i} + V_{\hat{A}\hat{A}1,i} + V_{\hat{A}\hat{A}\hat{N}})^2 \quad (1.4.87)$$

где:

$$V_{\hat{A}\hat{A}\hat{N}} = \sum_{j=1}^{j=i-1} (V_{\bar{I}j} + V_{Oj} + V_{\hat{A}\hat{A}j}); \quad (1.4.88)$$

$$K_2 = \frac{B_2 - \sqrt{B_2^2 - C_2 \cdot \hat{A}_2}}{C_2}; \quad (1.4.89)$$

$$m_2 = \frac{-D_2 - E_2 \cdot K_2}{B_2 + C_2 \cdot K_2}; \quad (1.4.90)$$

$$V_{\bar{\alpha}2} = K_2 \cdot V_{\bar{\alpha}3} + m_2. \quad (1.4.91)$$

Рассмотренная методика расчёта цепочечных и разветвляющихся гидравлических сетей, являющаяся точной для закрытых сетей и приближенной для открытых, позволяет с

достаточной для инженерных целей точно производить расчёт потокораспределения и решать ряд других задач, связанных с наладкой гидравлических режимов.

Эквивалентная замена радиальной последовательно-параллельной и разветвлённой схемы на эквивалентный абонент.

Как было показано выше, и цепочечная, и разветвлённая схема приводятся к эквивалентной схеме, рисунок 1.4.10. Потери напора в этом контуре определяются по формуле (1.4.62). Это выражение можно преобразовать к виду:

$$A_{(i+1)} \cdot V_{\check{\alpha}(i+1)}^2 + 2 \cdot D_{(i+1)} \cdot V_{\check{\alpha}(i+1)} + F_{(i+1)} = H \text{ в} \quad (1.4.92)$$

где:

$$A_{(i+1)} = S_{\check{\alpha}(i+1)} + (1 - K_i)^2 \cdot (S_{\check{I}(i+1)} + S_{A(i+1)} + S_{O(i+1)}) + S_{TO(i+1)}; \quad (1.4.93)$$

$$D_{(i+1)} = -(1 - K_i) \cdot (S_{\check{I}(i+1)} \cdot m_i + S_{A(i+1)} \cdot (m_i + V_{\check{I}(i+1)})) + S_{O(i+1)} \cdot (m_i + V_{\check{I}(i+1)} + V_{O(i+1)}) - S_{TO(i+1)} \cdot \left(\sum_{j=1}^{j=i+1} V_{\check{I}j} + \sum_{j=1}^{j=i+1} V_{Oj} \right); \quad (1.4.94)$$

$$F_{(i+1)} = S_{\check{I}(i+1)} \cdot m_i^2 + S_{A(i+1)} \cdot (m_i + V_{\check{I}(i+1)})^2 + S_{O(i+1)} \cdot (m_i + V_{\check{I}(i+1)} + V_{O(i+1)})^2 - S_{TO(i+1)} \cdot \left(\sum_{j=1}^{j=i+1} V_{\check{I}j} + \sum_{j=1}^{j=i+1} V_{Oj} \right)^2; \quad (1.4.95)$$

Запишем уравнение потерь напора для контура, входящего в разветвляющую сеть, рисунок 1.4.13. Контур состоит из сопротивлений: $S_{\check{\alpha}1,i}$, $S_{\check{I}1,i}$, $S_{A1,i}$, $S_{O1,i}$, $S_{\check{O}O1,i}$.

Уравнение потерь напора имеет вид

$$S_{\check{\alpha}1,i} \cdot (V_{\check{\alpha}1} - V_{\check{O}\check{I}(i-1)})^2 + S_{\check{I}1,i} \cdot (V_{\check{\alpha}1} - V_{\check{O}\check{I}(i-1)} - V_{\check{Y}\check{I}1,2})^2 + S_{A1,i} \cdot (V_{\check{\alpha}1} - V_{\check{O}\check{I}(i-1)} - V_{\check{Y}\check{I}1,2} - V_{\check{I}1,i})^2 + S_{O1,i} \cdot (V_{\check{\alpha}1} - V_{\check{O}\check{I}(i-1)} - V_{\check{Y}\check{I}1,2} - V_{\check{I}1,i} - V_{O1,i} - V_{\check{A}\check{A}\check{N},(i-1)})^2 = H \quad (1.4.96)$$

Подставим значения $V_{\check{O}\check{I}(i-1)} = K_{\check{O}(i-1)} \cdot V_{\check{\alpha}1} + m_{\check{O}(i-1)}$;

$$V_{\check{Y}\check{I}1,i} = K_{1,i} \cdot (V_{\check{\alpha}1} - V_{\check{O}\check{I}(i-1)}) + m_{1,i}.$$

Уравнение (1.4.96) принимает вид

$$A_{1,i} \cdot V_{\alpha_1}^2 + 2 \cdot D_{1,i} \cdot V_{\alpha_1} + F_{1,i} = H, \quad (1.4.97)$$

где:

$$A_{1,i} = (S_{\alpha_1,1,i} + S_{TO1,i}) \cdot (1 - K_{\hat{O}(i-1)})^2 \cdot \left(\begin{array}{l} S_{\bar{I}1,i} + S_{A1,i} + \\ + S_{O1,i} \end{array} \right) \times; \quad (1.4.98)$$

$$\times (1 - K_{\hat{O}(i-1)} - K_{1,i} + K_{1,i} \cdot K_{\hat{O}(i-1)})^2$$

$$D_{1,i} = -S_{\alpha_1,1,i} \cdot (1 - K_{\hat{O}(i-1)}) \cdot m_{\hat{O}(i-1)} - (1 - K_{\hat{O}(i-1)} - K_{1,i} + K_{1,i} \cdot K_{\hat{O}(i-1)}) \cdot$$

$$\left[\begin{array}{l} S_{\bar{I}1,i} \cdot (m_{\hat{O}(i-1)} - K_{1,i} \cdot m_{\hat{O}(i-1)} + m_{1,i}) - S_{A1,i} \cdot \left(\begin{array}{l} m_{\hat{O}(i-1)} - K_{1,i} \cdot m_{\hat{O}(i-1)} + \\ + m_{1,i} + V_{\bar{I}1,i} \end{array} \right) + \\ + S_{O1,i} \cdot (m_{\hat{O}(i-1)} - K_{1,i} \cdot m_{\hat{O}(i-1)} + m_{1,i} + V_{\bar{I}1,i} + V_{O1,i}) \end{array} \right] -; \quad (1.4.99)$$

$$- S_{TO1,i} (1 - K_{\hat{O}(i-1)}) \cdot (m_{\hat{O}(i-1)} + V_{\bar{I}1,i} + V_{O1,i} + V_{\bar{I}1,i} + V_{\hat{A}\hat{A}1,(i-1)})$$

$$F_{1,i} = S_{\alpha_1,1,i} \cdot m_{\hat{O}(i-1)}^2 + S_{\bar{I}1,i} \cdot (m_{\hat{O}(i-1)} - K_{1,i} \cdot m_{\hat{O}(i-1)} + m_{1,i})^2 +$$

$$+ S_{A1,i} \cdot (m_{\hat{O}(i-1)} - K_{1,i} \cdot m_{\hat{O}(i-1)} + m_{1,i} + V_{\bar{I}1,i})^2 + \quad (1.4.100)$$

$$+ S_{O1,i} \cdot (m_{\hat{O}(i-1)} - K_{1,i} \cdot m_{\hat{O}(i-1)} + m_{1,i} + V_{\bar{I}1,i} + V_{O1,i})^2 +$$

$$+ S_{TO1,i} \cdot (m_{\hat{O}(i-1)} + V_{\bar{I}1,i} + V_{O1,i} + V_{\bar{I}1,i} + V_{\hat{A}\hat{A}1,(i-1)})^2$$

Таким образом, мы показали, что и цепочечная, и разветвляющаяся сети приводятся к эквивалентной схеме, описывающейся уравнением второго порядка. С другой стороны, таким же уравнением описывается схема, изображенная на рисунке 1.4.14

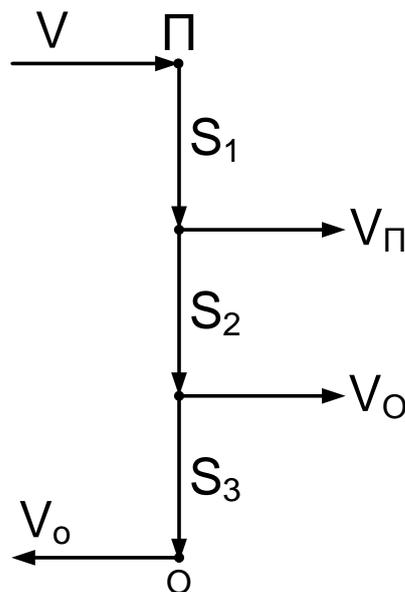


Рисунок 1.4.14 - Эквивалентный абонент

Потери напора для контура (рисунок 1.4.14) определяются выражением

$$S_1 \cdot V^2 + S_2 \cdot (V - V_i)^2 + S_3 \cdot (V - V_i - V_o)^2 = H; \quad (1.4.101)$$

Или

$$(S_1 + S_2 + S_3) \cdot V^2 - 2 \cdot (S_2 \cdot V_i + S_3 \cdot (V_i + V_o)) \cdot V + S_3 \cdot V_i^2 + S_3 \cdot (V_o + V_i)^2 = H; \quad (1.4.102)$$

Из условий тождественности эквивалентной замены необходимо выполнение следующих условий

$$\left. \begin{aligned} A &= S_1 + S_2 + S_3 \\ D &= -S_2 \cdot V_i - S_3 \cdot (V_i + V_o) \\ F &= S_2 \cdot V_i^2 + S_3 \cdot (V_i + V_o)^2 \end{aligned} \right\}, \quad (1.4.103)$$

где:

$V_i = \sum V_{\bar{A}\bar{A}i}$ и $V_o = \sum V_{\bar{A}\bar{A}o}$ - соответственно суммарные расходы воды на горячее водоснабжение из подающей и обратной линии.

На основании решения системы уравнений (1.4.103) получаем следующие зависимости:

$$S_2 = \frac{D \cdot (V_i - V_o) + F}{-V_i \cdot V_o}; \quad (1.4.104)$$

$$S_3 = \frac{F \cdot V_o + (D \cdot (V_i - V_o) + F) \cdot V_i}{V_o \cdot (V_i + V_o)^2}; \quad (1.4.105)$$

$$S_1 = A - S_2 - S_3. \quad (1.4.106)$$

В случае, если $\sum V_{\bar{A}\bar{A}i} = 0$ или $\sum V_{\bar{A}\bar{A}o} = 0$ необходимо сначала определить фиктивные расходы на горячее водоснабжение:

$$\text{при } \sum V_{\bar{A}\bar{A}i} = 0; \quad V_i = \chi \sum V_{\bar{A}\bar{A}i}; \quad V_i = (1 - \chi) \cdot \sum V_{\bar{A}\bar{A}i};$$

$$\text{при } \sum V_{\bar{A}\bar{A}o} = 0; \quad V_o = \chi \sum V_{\bar{A}\bar{A}o}; \quad V_o = (1 - \chi) \cdot \sum V_{\bar{A}\bar{A}o};$$

где:

χ - произвольный коэффициент, $0 < \chi < 1$.

В частном случае, для закрытой схемы:

$$\begin{aligned} D = 0; \quad F = 0; \quad V_I = 0; \quad V_O = 0; \\ A = S_1 + S_2 + S_3 = S, \end{aligned} \tag{1.4.107}$$

то есть имеем одно эквивалентное сопротивление, заменяющее всю сеть.

Если равен нулю расход воды из подающей или обратной линии, то возможно и другое решение. При этом эквивалентный контур содержит только два сопротивления.

Для суммы $\sum V_{\bar{A}\bar{A}i} = 0$ система уравнений (1.4.103) принимает вид

$$\left. \begin{aligned} A &= S_1 + S_2 + S_3 \\ D &= -V_I \cdot (S_2 + S_3) \\ F &= -V_I^2 \cdot (S_2 + S_3) \end{aligned} \right\}. \tag{1.4.108}$$

Если поделить F на D, то получим

$$\frac{F}{D} = -V_I.$$

Практические расчеты показывают, что $\frac{F}{D} \approx -V_I$, то есть достаточно хорошее при-

ближение, и в этом случае имеем:

$$S_2 + S_3 = -\frac{D}{V_I}; \tag{1.4.109}$$

$$S_1 = A - S_2 - S_3; \tag{1.4.110}$$

или

$$S_2 + S_3 = -\frac{F}{V_I^2}; \tag{1.4.111}$$

$$S_1 = A - S_2 - S_3; \tag{1.4.112}$$

Эквивалентная схема в этом случае принимает вид

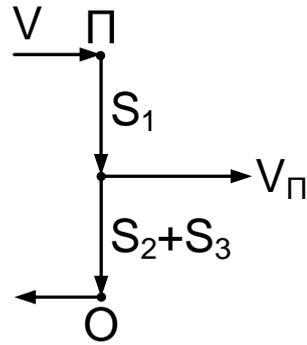


Рисунок 1.4.15 - Эквивалентный абонент при $\sum V_{\dot{A}\dot{A}i} = 0$

Для $\sum V_{\dot{A}\dot{A}i} = 0$ система уравнений (1.4.103) принимает вид

$$\left. \begin{aligned} A &= S_1 + S_2 + S_3 \\ D &= -S_3 \cdot V_i \\ F &= S_3 \cdot V_i^2 \end{aligned} \right\}. \quad (1.4.113)$$

Практические расчёты показывают, что $\frac{F}{D} \approx -V_i$.

$$S_3 = -\frac{D}{V_o}; \quad (1.4.114)$$

$$S_1 + S_2 = A - S_3; \quad (1.4.115)$$

или

$$S_3 = \frac{F}{V_o}; \quad (1.4.116)$$

$$S_1 + S_2 = A - S_3; \quad (1.4.117)$$

Эквивалентная схема в этом случае принимает вид, рисунок 1.4.16

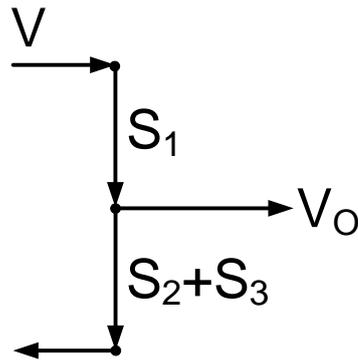


Рисунок 1.4.16 - Эквивалентный абонент при $\sum V_{AA'} = 0$

На основании изложенной методики и цепочечную, и разветвлённую тепловые сети можно привести к одному эквивалентному абоненту, состоящему из одного или двух узловых расходов и двух или трёх участков. При этом любую разветвлённую сеть можно привести к цепочечной, например, к главной магистрали.

Рассмотренный метод эквивалентирования можно распространить на любые последовательно-параллельные схемы. Этот метод позволяет легко реализовать расчётный алгоритм на ЭВМ. В заключение следует отметить, что метод эквивалентирования, изложенный в данном параграфе, позволяет получить эквивалентные сопротивления, которые функционально зависят от узловых расходов, то есть, если изменится хотя бы один из расходов, то изменятся и эквивалентные сопротивления. С другой стороны, если все расходы на горячее водоснабжение изменяются с одним коэффициентом пропорциональности, то эквивалентные сопротивления остаются неизменными, т.к. выражения для m пропорциональны расходам. Это свойство позволяет проводить анализ сетей на влияние коэффициента часовой неравномерности горячего водоснабжения, не пересчитывая эквивалентных сопротивлений.

1.4.2.3 Математическая модель гидравлического расчёта сетей с несколькими источниками питания методом расщепления на последовательно-параллельные подсети

Для расчёта таких сетей необходимо произвести расщепление схемы сети на отдельные подсети, структура которых аналогична сетям с одним источником питания. Расщепление можно производить в любой месте сети, однако наиболее целесообразно и, кроме то-

го, позволяет получить наибольшую точность расчёта, если расщепление на участке с подкачивающей подстанцией, а если её нет, то на среднем участке от источников.

В расчётном плане объединение отдельных частей в общую схему производится для каждого расщепления составлением двух уравнений: уравнением второго закона Кирхгофа для расщепленного контура и уравнение материального баланса.

Рассмотрим методику расчёта на примере конкретной схемы с двумя источниками питания.

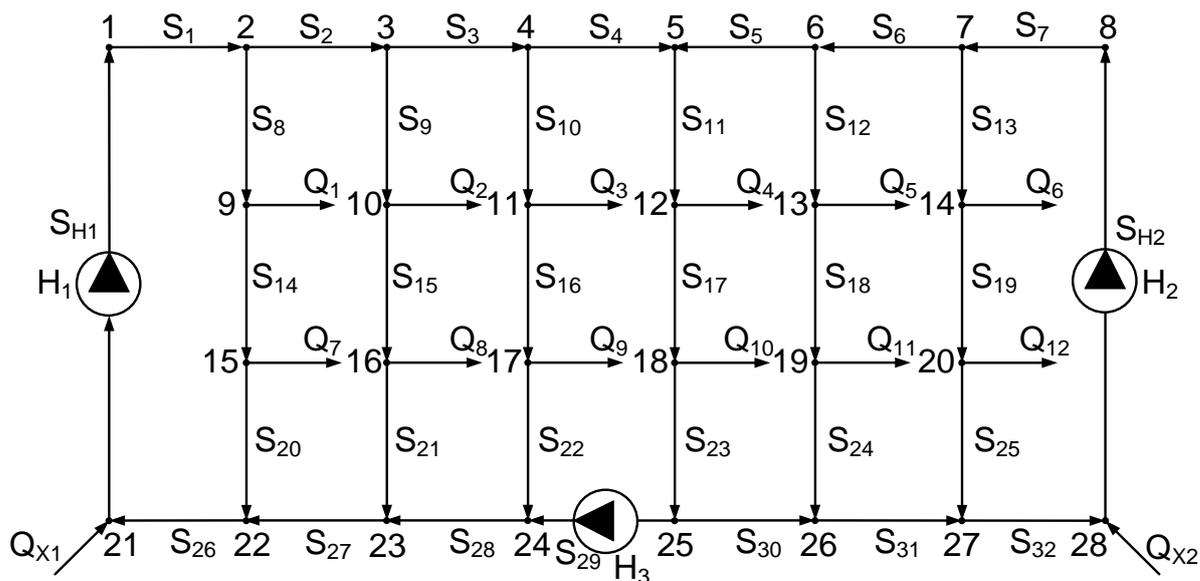


Рисунок 1.4.16 - Схема гидравлической тепловой сети с двумя источниками питания

Если расщечь участки 4-5 и 25-24, то левая и правая половины схемы будут иметь вид, аналогично рисунку 1.4.9 схемы цепочечной сети. Отличие состоит лишь в том, что в узлах 4, 5, 24, 25 будут присутствовать узловые расходы.

Для учёта дополнительных узловых расходов рассмотрим схему, рисунок 1.4.17.

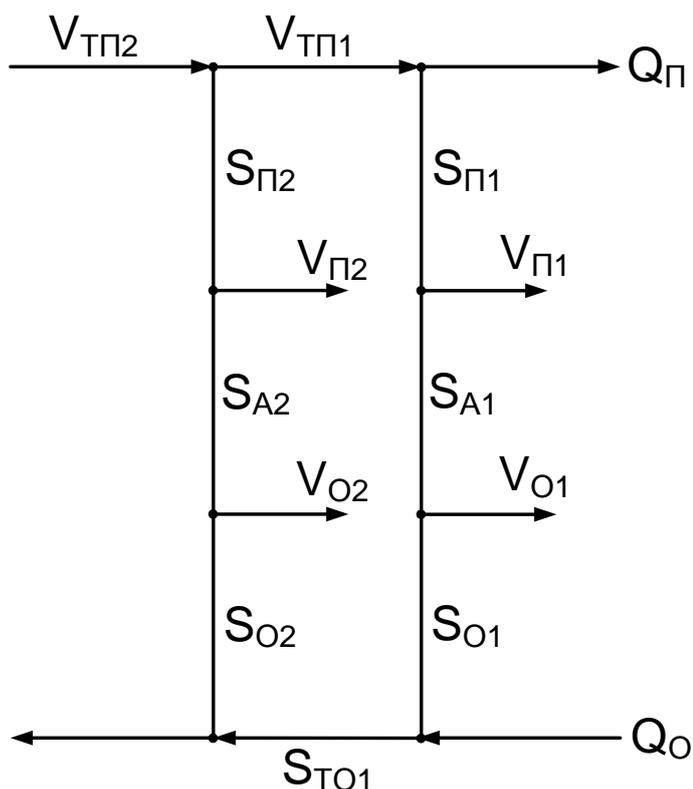


Рисунок 1.4.17 - Схема оконечного контура цепочечной сети

Запишем уравнение второго закона Кирхгофа

$$\begin{aligned}
 & S_{\alpha_1} \cdot V_{\alpha_1}^2 + S_{i_1} \cdot (V_{\alpha_1} - Q_i)^2 + S_{A1} \cdot (V_{\alpha_1} - Q_i - V_{i_1})^2 + \\
 & + S_{i_1} \cdot (V_{\alpha_1} - Q_i - V_{i_1} - V_{i_1})^2 + S_{\alpha_1} \cdot (V_{\alpha_1} - Q_i - V_{i_1} - V_{i_1} - Q_i)^2 - \\
 & - S_{i_2} \cdot (V_{\alpha_2} - V_{\alpha_1})^2 - S_{A2} \cdot (V_{\alpha_2} - V_{\alpha_1} - V_{i_2})^2 - \\
 & - S_{i_2} \cdot (V_{\alpha_2} - V_{\alpha_1} - V_{i_2} - V_{i_2})^2 = 0
 \end{aligned} \tag{1.4.118}$$

Уравнение для нахождения асимптоты имеют вид:

$$A_1 = S_{i_2} + S_{A2} + S_{i_2}; \tag{1.4.119}$$

$$B_1 = -S_{i_2} - S_{A2} - S_{i_2}; \tag{1.4.120}$$

$$C_2 = S_{\alpha_1} - S_{i_1} - S_{A1} - S_{i_1} - S_{\alpha_1} + S_{i_2} + S_{A2} + S_{i_2}; \tag{1.4.121}$$

$$D_1 = -S_{A2} \cdot V_{i_2} - S_{i_2} \cdot (V_{i_2} - V_{i_2}); \tag{1.4.122}$$

$$E_1 = S_{i1} \cdot Q_i + S_{A1} \cdot (Q_i + V_{i1}) + S_{i1} \cdot (Q_i + V_{i1} + V_{i1}) + S_{\alpha 1} \cdot (Q_i + V_{i1} + V_{i1} - Q_i) + S_{A2} \cdot V_{i2} + S_{i2} \cdot (V_{i2} + V_{i2}); \quad (1.4.123)$$

$$E_1 = S_{i1} \cdot Q_i^2 + S_{A1} \cdot (Q_i + V_{i1})^2 + S_{i1} \cdot (Q_i + V_{i1} + V_{i1})^2 + S_{\alpha 1} \cdot (Q_i + V_{i1} + V_{i1} - Q_i)^2 + S_{A2} \cdot V_{i2}^2 + S_{i2} \cdot (V_{i2} + V_{i2})^2; \quad (1.4.124)$$

$$K_1 = \frac{-B_1 - \sqrt{B_1^2 - A_1 \cdot C_1}}{C_1}; \quad (1.4.125)$$

$$m_1 = \frac{-D_1 - E_1 \cdot K_1}{B_1 + C_1 \cdot K_1}. \quad (1.4.126)$$

Схема источника имеет вид, рисунок 1.4.18.

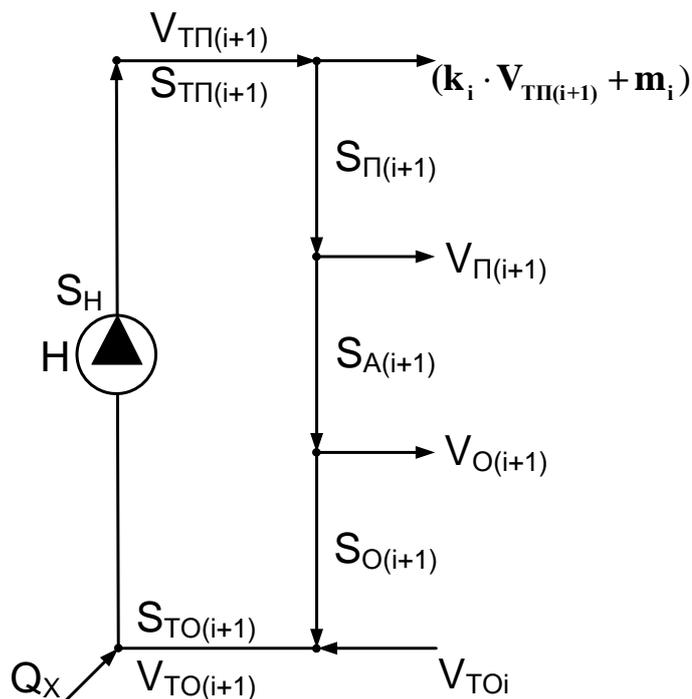


Рисунок 1.4.18 - Схема источника

На рисунке 1.4.18 Q_X – подпитка схемы сети на данном источнике.

В виду того, что в некоторых режимах подпитка может полностью или частично осуществляться от другого источника, то это приводит к изменению направления потоков

движения жидкости и уравнение второго закона Кирхгофа для контура (рисунок 1.4.18)

имеет вид:

$$\begin{aligned}
 & \left(S_{\dot{I}} + S_{\dot{\alpha}^{(i+1)}} \right) \cdot V_{\dot{\alpha}^{(i+1)}} \cdot \left| V_{\dot{\alpha}^{(i+1)}} \right| + S_{\dot{I}^{(i+1)}} \cdot \left(V_{\dot{\alpha}^{(i+1)}} - K_i \cdot V_{\dot{\alpha}^{(i+1)}} - m_i \right) \times \\
 & \times \left| \begin{array}{l} V_{\dot{\alpha}^{(i+1)}} - K_i \cdot V_{\dot{\alpha}^{(i+1)}} \\ -m_i \end{array} \right| + S_{A^{(i+1)}} \cdot \left(V_{\dot{\alpha}^{(i+1)}} - K_i \cdot V_{\dot{\alpha}^{(i+1)}} - m_i - V_{\dot{I}^{(i+1)}} \right) \times \\
 & \times \left| V_{\dot{\alpha}^{(i+1)}} - K_i \cdot V_{\dot{\alpha}^{(i+1)}} - m_i - V_{\dot{I}^{(i+1)}} \right| + S_{O^{(i+1)}} \cdot \left(\begin{array}{l} V_{\dot{\alpha}^{(i+1)}} - K_i \cdot V_{\dot{\alpha}^{(i+1)}} - m_i \\ -V_{\dot{I}^{(i+1)}} - V_{O^{(i+1)}} \end{array} \right) \times \\
 & \times \left| \begin{array}{l} V_{\dot{\alpha}^{(i+1)}} - K_i \cdot V_{\dot{\alpha}^{(i+1)}} - m_i \\ -V_{\dot{I}^{(i+1)}} - V_{O^{(i+1)}} \end{array} \right| + S_{TO^{(i+1)}} \cdot \left(\begin{array}{l} V_{\dot{\alpha}^{(i+1)}} - K_i \cdot V_{\dot{\alpha}^{(i+1)}} - m_i \\ -Q_i + Q_o - \sum_1^i V_{\dot{I}i} - \sum_1^i V_{Oi} \end{array} \right) \times \\
 & \times \left| \begin{array}{l} V_{\dot{\alpha}^{(i+1)}} - K_i \cdot V_{\dot{\alpha}^{(i+1)}} - m_i - Q_i \\ +Q_o - \sum_1^i V_{\dot{I}i} - \sum_1^i V_{Oi} \end{array} \right| - H = 0.
 \end{aligned}$$

; (1.4.127)

Теперь составим уравнение для соединения рассеченных частей. Схема рассеченного контура имеет вид

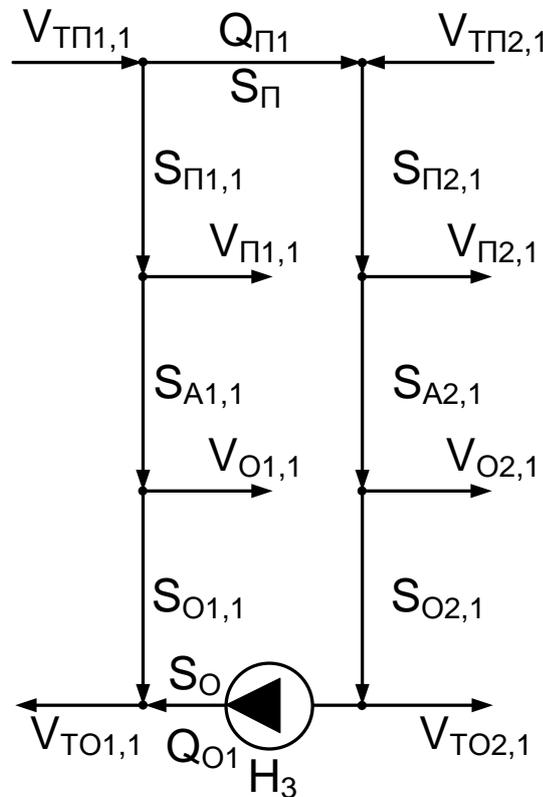


Рисунок 1.4.19 - Схема рассеченного контура

Уравнение второго закона Кирхгофа для рассеченного контура

$$\begin{aligned}
 & S_{i_1} \cdot Q_{i_1} \cdot |Q_{i_1}| + S_{i_{2,1}} \cdot (Q_{i_1} + V_{\bar{i}_{2,1}}) \cdot |Q_{i_1} + V_{\bar{i}_{2,1}}| + S_{A_{2,1}} \cdot (Q_{i_1} + V_{\bar{i}_{1,1}} - V_{i_{2,1}}) \cdot \\
 & \cdot |Q_{i_1} + V_{\bar{i}_{1,1}} - V_{i_{2,1}}| + S_{i_{2,1}} \cdot (Q_{i_1} + V_{\bar{i}_{1,1}} - V_{i_{2,1}} - V_{O_{2,1}}) \cdot |Q_{i_1} + V_{\bar{i}_{1,1}} - V_{i_{2,1}} - V_{O_{2,1}}| + \\
 & + S_{i_1} \cdot Q_{O_1} \cdot |Q_{O_1}| - S_{i_{1,1}} \cdot (V_{\bar{i}_{1,1}} - Q_{i_1}) \cdot |V_{\bar{i}_{1,1}} - Q_{i_1}| - S_{A_{1,1}} \cdot (V_{\bar{i}_{1,1}} - Q_{i_1} - V_{i_{1,1}}) \cdot \\
 & |V_{\bar{i}_{1,1}} - Q_{i_1} - V_{i_{1,1}}| - S_{i_{1,1}} \cdot (V_{\bar{i}_{1,1}} - Q_{i_1} - V_{i_{1,1}} - V_{O_{1,1}}) \cdot |V_{\bar{i}_{1,1}} - Q_{i_1} - V_{i_{1,1}} - V_{O_{1,1}}| - H_3 = 0
 \end{aligned} \quad (1.4.128)$$

Для составления уравнения материального баланса составим для каждой части схемы (рисунки 1.4.16, 1.4.17, 1.4.18) материальный баланс.

$$Q_{X_1} + Q_{O_1} - Q_{i_1} - \sum_1^{i+1} V_{i_1} - \sum_1^{i+1} V_{O_1} = 0; \quad (1.4.129)$$

$$Q_{X_2} + Q_{O_1} - Q_{i_1} - \sum_1^{i+1} V_{i_2} - \sum_1^{i+1} V_{O_2} = 0; \quad (1.4.130)$$

Вычтем из уравнения (1.4.129) уравнение (1.4.130)

$$Q_{X_2} - Q_{X_1} + 2 \cdot Q_{O_1} - 2 \cdot Q_{i_1} - \sum_1^{i+1} V_{i_1} - \sum_1^{i+1} V_{O_1} + \sum_1^{i+1} V_{i_2} + \sum_1^{i+1} V_{O_2} = 0. \quad (1.4.131)$$

Уравнение (1.4.131) является уравнением материального баланса для всей схемы.

Таким образом, расчет исходной 7-кольцевой схемы приведен к решению 3-линейных уравнений – источников и рассеченного контура, и 5-линейных. По обычной методике для расчета этой схемы необходимо решение 7-линейных уравнений.

1.4.2.4 Математическая модель эквивалентного преобразование двухкольцевой схемы от двух источников питания в однокольцевую

Анализ сложных многокольцевых тепловых сетей в реальном времени с использованием ЭВМ возможен лишь при применении эквивалентных преобразователей.

Рассмотрим методику эквивалентирования лестничной двухкольцевой схемы в однокольцевую при двух источниках питания.

Очевидно, применяя последовательно такое эквивалентирование, можно существенно упростить схему сети.

Пусть исходная двухкольцевая схема имеет вид, рисунок 1.4.20.

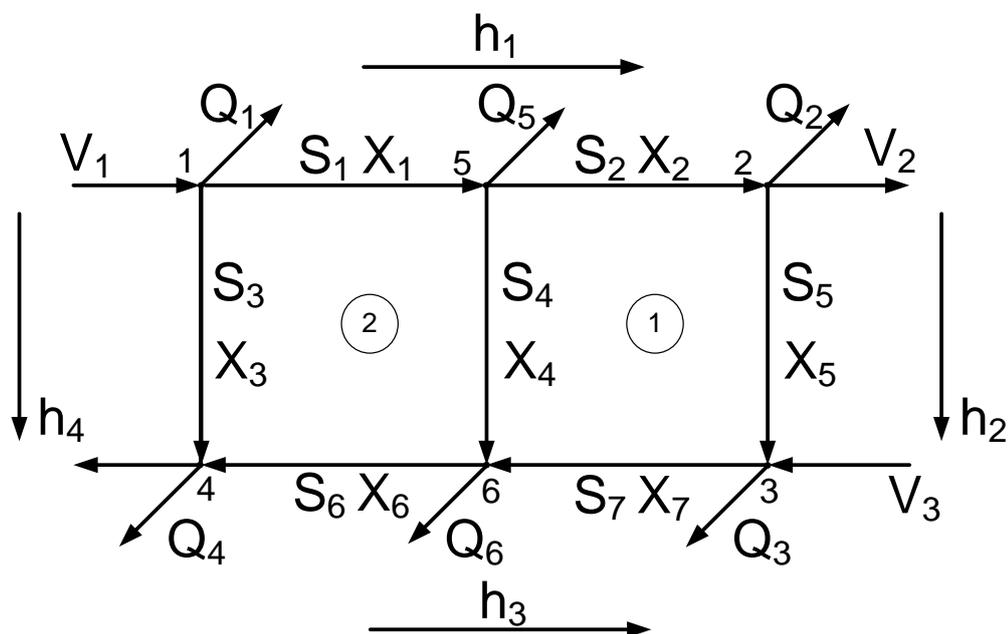


Рисунок 1.4.20 - Схема двухкольцевой тепловой сети при $V_1 \rightarrow \infty$, $V_4 \rightarrow \infty$

Стрелками на рисунке 1.4.20 указаны направления потоков, соответствующих условию

$V_1 \rightarrow \infty$, $V_4 \rightarrow \infty$, причем $V_4 \rightarrow \infty$ - балансирующий расход.

Запишем уравнения второго закона Кирхгофа для $\textcircled{1}$ и $\textcircled{2}$ контуров с подстановкой в них уравнений первого закона Кирхгофа.

Для контура $\textcircled{1}$

$$S_2 \cdot X_2 \cdot |X_2| + S_5 \cdot (X_2 - Q_2 - V_2) \cdot |X_2 - Q_2 - V_2| + S_7 \cdot (X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 + Q_3) \times \\ \times |X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 + Q_3| - S_4 \cdot (X_1 - Q_5 - X_2) \cdot |X_1 - Q_5 - X_2| = 0 \quad (1.4.132)$$

Для контура $\textcircled{2}$

$$S_1 \cdot X_1 \cdot |X_1| + S_4 \cdot (X_1 - Q_5 - X_2) \cdot |X_1 - Q_5 - X_2| + S_6 \cdot (X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6) \times \\ \times |X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6| - S_3 \cdot (V_1 - Q_1 - X_1) \cdot |V_1 - Q_1 - X_1| = 0 \quad (1.4.133)$$

Уравнение потерь напора имеют вид:

$$h_1 = S_1 \cdot X_1 \cdot |X_1| + S_2 \cdot X_2 \cdot |X_2|; \quad (1.4.134)$$

$$h_2 = S_5 \cdot (X_2 - Q_2 - V_2) \cdot |X_2 - Q_2 - V_2|; \quad (1.4.135)$$

$$h_3 = S_6 \cdot (X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6) \cdot |X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6| + \\ + S_7 \cdot (X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3) \cdot |X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3|; \quad (1.4.136)$$

$$h_4 = S_3 \cdot (V_1 - Q_1 - X_1) \cdot |V_1 - Q_1 - X_1|; \quad (1.4.137)$$

Эти уравнения можно записать иначе:

$$\text{sign}(h_1) \cdot \left[\text{sign}(h_1) \cdot \sqrt{\text{sign}(h_1)} \right]^2 - S_1 \cdot X_1 \cdot |X_1| + S_2 \cdot X_2 \cdot |X_2| = 0; \quad (1.4.138)$$

$$\text{sign}(h_2) \cdot \left[\text{sign}(h_2) \cdot \sqrt{\text{sign}(h_2)} \right]^2 - S_5 \cdot (X_2 - Q_2 - V_2) \cdot |X_2 - Q_2 - V_2| = 0; \quad (1.4.139)$$

$$\text{sign}(h_3) \cdot \left[\text{sign}(h_3) \cdot \sqrt{\text{sign}(h_3)} \right]^2 - S_6 \cdot (X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6) \times \\ \times |X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6| + S_7 \cdot (X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3) \times \\ \times |X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3| = 0; \quad (1.4.140)$$

$$\text{sign}(h_4) \cdot \left[\text{sign}(h_4) \cdot \sqrt{\text{sign}(h_4)} \right]^2 - S_3 \cdot (V_1 - Q_1 - X_1) \cdot |V_1 - Q_1 - X_1|; \quad (1.4.141)$$

Можно показать аналитически, что при $V_1 \rightarrow \infty$, $V_4 \rightarrow \infty$ уравнения (1.4.132–1.4.141) описывают гиперболы и соответственно имеют асимптоты, практически совпадающие с гиперболой и определяющие действительное потокораспределение в схеме.

Уравнение асимптоты имеют вид:

$$\text{sign}(h_1) \cdot \sqrt{h_1 \cdot \text{sign}(h_1)} = m_1 \cdot V_1 + P_1 + f_1 \cdot V_2 + g_1 \cdot V_3; \quad (1.4.142)$$

$$\text{sign}(h_2) \cdot \sqrt{h_2 \cdot \text{sign}(h_2)} = m_2 \cdot V_1 + P_2 + f_2 \cdot V_2 + g_2 \cdot V_3; \quad (1.4.143)$$

$$\text{sign}(h_3) \cdot \sqrt{h_3 \cdot \text{sign}(h_3)} = m_3 \cdot V_1 + P_3 + f_3 \cdot V_2 + g_3 \cdot V_3; \quad (1.4.144)$$

$$\text{sign}(h_4) \cdot \sqrt{h_4 \cdot \text{sign}(h_4)} = m_4 \cdot V_1 + P_4 + f_4 \cdot V_2 + g_4 \cdot V_3; \quad (1.4.145)$$

где:

$$\begin{aligned} \frac{\partial [\text{sign}(h_1) \cdot \sqrt{h_1 \cdot \text{sign}(h_1)}]}{\partial V_1} &= m_1; & \frac{\partial [\text{sign}(h_1) \cdot \sqrt{h_1 \cdot \text{sign}(h_1)}]}{\partial V_2} &= f_1; \\ \frac{\partial [\text{sign}(h_1) \cdot \sqrt{h_1 \cdot \text{sign}(h_1)}]}{\partial V_2} &= g_1; & \frac{\partial [\text{sign}(h_2) \cdot \sqrt{h_2 \cdot \text{sign}(h_2)}]}{\partial V_1} &= m_2; \\ \dots\dots\dots & & \frac{\partial [\text{sign}(h_4) \cdot \sqrt{h_4 \cdot \text{sign}(h_4)}]}{\partial V_3} &= g_4. \end{aligned}$$

Коэффициенты $m_1, p_1, f_1, g_1, m_2, p_2, f_2, g_2, m_3, p_3, f_3, g_3, m_4, p_4, f_4, g_4$, могут быть найдены аналитически, путём сложных математических выкладок. Однако значительно эффективнее, используя ЭВМ, можно найти эти коэффициенты численным методом, так как они определяют коэффициенты в уравнении гиперплоскостей.

Известно, что уравнение асимптоты имеет вид:

$$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 1, \quad (1.4.146)$$

где:

$$a = \lim_{x \rightarrow \infty} (x - y \cdot \frac{dx}{dy}); \quad (1.4.147)$$

$$b = \lim_{x \rightarrow \infty} (y - x \cdot \frac{dy}{dx}). \quad (1.4.148)$$

Очевидно, что задаваясь фиксированными малыми значениями V_2 и V_3 и, решив для $V_1 \rightarrow \infty$ для нескольких точек систему уравнений (1.4.132, 1.4.133, 1.4.138, 1.4.139, 1.4.140, 1.4.141, 1.4.147, 1.4.148), можно найти коэффициенты $m_1, m_2, m_3, m_4, b_1, b_2, b_3, b_4$,

где:

$$b_1 = p_1 + f_1 \cdot V_2 + g_1 \cdot V_3; \quad (1.4.149)$$

$$b_2 = p_2 + f_2 \cdot V_2 + g_2 \cdot V_3; \quad (1.4.150)$$

$$b_3 = p_3 + f_3 \cdot V_2 + g_3 \cdot V_3; \quad (1.4.151)$$

$$b_4 = p_4 + f_4 \cdot V_2 + g_4 \cdot V_3; \quad (1.4.152)$$

Производные в (1.4.147, 1.4.148) находят из системы уравнение (1.4.132, 1.4.133, 1.4.138, 1.4.139, 1.4.140, 1.4.141) продифференцированных как система неявных функций по независимой переменной $V_1 \rightarrow \infty$:

$$\begin{aligned} & -2 \cdot S_4 \cdot |X_1 - Q_5 - X_2| \cdot \frac{\partial X_1}{\partial V_1} + \\ & + \left[2 \cdot S_2 \cdot |X_2| + 2 \cdot S_5 \cdot |X_2 - Q_5 - V_2| + \right. \\ & \left. + 2 \cdot S_7 \cdot |X_2 - Q_5 - V_2 + V_3 - Q_3| + 2 \cdot S_4 \cdot |X_1 - Q_5 - X_2| \right] \cdot \frac{\partial X_2}{\partial V_1} + 0 = 0 \end{aligned} \quad ; \quad (1.4.153)$$

$$\begin{aligned} & \left[2 \cdot S_1 \cdot |X_1| + 2 \cdot S_4 \cdot |X_1 - Q_5 - X_2| + 2 \cdot S_6 \cdot |X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6| + \right. \\ & \left. + 2 \cdot S_3 \cdot |V_1 - Q_1 - X_1| \right] \times \\ & \times \frac{\partial X_1}{\partial V_1} + \left[-2 \cdot S_4 \cdot |X_1 - Q_5 - X_2| \right] \cdot \frac{\partial X_2}{\partial V_1} - 2 \cdot S_3 \cdot |V_1 - Q_1 - X_1| = 0 \end{aligned} \quad ; \quad (1.4.154)$$

$$\begin{aligned} & \text{sign} \left[S_1 \cdot X_1 \cdot |X_1| + S_2 \cdot X_2 \cdot |X_2| \right] \cdot 2 \cdot S_1 \cdot |X_1| \cdot \frac{\partial X_1}{\partial V_1} - \text{sign} \left[S_1 \cdot X_1 \cdot |X_1| + S_2 \cdot X_2 \cdot |X_2| \right] \times \\ & \times 2 \cdot S_2 \cdot |X_2| \cdot \frac{\partial X_2}{\partial V_1} + 2 \cdot \left[\text{sign}(h_1) \cdot \sqrt{h_1 \cdot \text{sign}(h_1)} \right] \cdot \frac{\partial \left[\text{sign}(h_1) \cdot \sqrt{h_1 \cdot \text{sign}(h_1)} \right]}{\partial V_1} + 0 = 0 \end{aligned} \quad ; \quad (1.4.155)$$

$$\begin{aligned} & 0 \cdot \frac{\partial X_1}{\partial V_1} - \text{sign} \left[S_5 \cdot (X_2 - Q_2 - V_2) \cdot |X_2 - Q_2 - V_2| \right] \cdot 2 \cdot S_5 \cdot |X_2 - Q_2 - V_2| \cdot \frac{\partial X_2}{\partial V_1} + \\ & + 2 \cdot \left[\text{sign}(h_2) \cdot \sqrt{h_2 \cdot \text{sign}(h_2)} \right] \cdot \frac{\partial \left[\text{sign}(h_2) \cdot \sqrt{h_2 \cdot \text{sign}(h_2)} \right]}{\partial V_1} + 0 = 0 \end{aligned} \quad ; \quad (1.4.156)$$

$$\begin{aligned}
& -\text{sign} \left[\begin{array}{l} S_6 \cdot (X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6) \cdot |X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6| + \\ + S_7 \cdot (X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3) \cdot |X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3| \end{array} \right] \cdot 2 \cdot S_6 \times \\
& \times |X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6| \cdot \frac{\partial X_1}{\partial V_1} - \\
& -\text{sign} \left[\begin{array}{l} S_6 \cdot (X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6) \times \\ \times |X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6| + \\ + S_7 \cdot (X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3) \cdot |X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3| \end{array} \right] \times \quad ; \quad (1.4.157) \\
& \times 2 \cdot S_7 \cdot |X_1 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3| \cdot \frac{\partial X_2}{\partial V_1} + 2 \cdot \left[\text{sign}(h_3) \cdot \sqrt{h_3 \cdot \text{sign}(h_3)} \right] \times \\
& \times \frac{\partial \left[\text{sign}(h_3) \cdot \sqrt{h_3 \cdot \text{sign}(h_3)} \right]}{\partial V_1} + 0 = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{sign} \left[S_3 \cdot (V_1 - Q_1 - X_1) \cdot |V_1 - Q_1 - X_1| \right] \cdot 2 \cdot S_3 \cdot |V_1 - Q_1 - X_1| \cdot \frac{\partial X_1}{\partial V_1} + 0 \cdot \frac{\partial X_2}{\partial V_1} + \\
& + 2 \cdot \left[\text{sign}(h_4) \cdot \sqrt{h_4 \cdot \text{sign}(h_4)} \right] \cdot \frac{\partial \left[\text{sign}(h_4) \cdot \sqrt{h_4 \cdot \text{sign}(h_4)} \right]}{\partial V_1} - \quad . \quad (1.4.158) \\
& -\text{sign} \left[S_3 \cdot (V_1 - Q_1 - X_1) \cdot |V_1 - Q_1 - X_1| \right] \cdot 2 \cdot S_3 \cdot |V_1 - Q_1 - X_1| = 0
\end{aligned}$$

Для определения коэффициентов f_1, f_2, f_3, f_4 необходимо решить систему продифференцированных неявных уравнений по независимой V_2 :

$$\begin{aligned}
& -2 \cdot S_4 \cdot |X_1 - Q_5 - X_2| \cdot \frac{\partial X_2}{\partial V_2} + \left[\begin{array}{l} 2 \cdot S_2 \cdot |X_2| + 2 \cdot S_5 \cdot |X_2 - Q_2 - V_2| + 2 \cdot S_7 \times \\ \times |X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3| + 2 \cdot S_4 \cdot |X_1 - Q_5 - X_2| \end{array} \right] \times \quad ; \quad (1.4.159) \\
& \times \frac{\partial X_2}{\partial V_2} - 2 \cdot S_5 \cdot |X_2 - Q_2 - V_2| - 2 \cdot S_7 \cdot |X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3| = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left| \begin{array}{l} 2 \cdot S_1 \cdot |X_1| + 2 \cdot S_4 \cdot |X_1 - Q_5 - X_2| - 2 \cdot S_6 \times \\ \times |X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 - V_3 - Q_3 - Q_6| - 2 \cdot S_3 \cdot |V_1 - Q_1 - X_1| \end{array} \right| \cdot \frac{\partial X_1}{\partial V_2} + \quad ; \quad (1.4.160) \\
& + \left[-2 \cdot S_4 \cdot |X_1 - Q_5 - X_2| \right] \cdot \frac{\partial X_2}{\partial V_2} - 2 \cdot S_6 \cdot |X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6| = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\text{sign}\left[S_1 \cdot X_1 \cdot |X_1| + S_2 \cdot X_2 \cdot |X_2|\right] \cdot 2 \cdot S_1 \cdot |X_1| \cdot \frac{\partial X_1}{\partial V_2} - \\
& -\text{sign}\left[S_1 \cdot X_1 \cdot |X_1| + S_2 \cdot X_2 \cdot |X_2|\right] \cdot 2 \cdot S_2 \cdot |X_2| \cdot \frac{\partial X_2}{\partial V_2} + \quad ; \quad (1.4.161)
\end{aligned}$$

$$+2 \cdot \left[\text{sign}(h_1) \cdot \sqrt{h_1 \cdot \text{sign}(h_1)} \right] \cdot \frac{\partial \left[\text{sign}(h_1) \cdot \sqrt{h_1 \cdot \text{sign}(h_1)} \right]}{\partial V_2} + 0 = 0$$

$$\begin{aligned}
& 0 \cdot \frac{\partial X_1}{\partial V_2} - \text{sign}\left[S_5 \cdot (X_2 - Q_2 - V_2) \cdot |X_2 - Q_2 - V_2|\right] \cdot 2 \cdot S_5 \cdot |X_2 - Q_2 - V_2| \cdot \frac{\partial X_2}{\partial V_2} + \\
& +2 \cdot \left[\text{sign}(h_2) \cdot \sqrt{h_2 \cdot \text{sign}(h_2)} \right] \cdot \frac{\partial \left[\text{sign}(h_2) \cdot \sqrt{h_2 \cdot \text{sign}(h_2)} \right]}{\partial V_2} + \quad ; \quad (1.4.162)
\end{aligned}$$

$$\text{sign}\left[S_5 \cdot (X_2 - Q_2 - V_2) \cdot |X_2 - Q_2 - V_2|\right] \cdot 2 \cdot S_5 \cdot |X_2 - Q_2 - V_2| = 0$$

$$\begin{aligned}
& \text{sign}\left[S_6 \cdot (X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6) \cdot |X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6| + \right. \\
& \left. + S_7 \cdot (X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3) \cdot |X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3| \right] \times \\
& \times 2 \cdot S_6 \cdot |X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6| \cdot \frac{\partial X_1}{\partial V_2} + \\
& + \text{sign}\left[S_6 \cdot (X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6) \cdot |X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6| + \right. \\
& \left. + S_7 \cdot (X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3) \cdot |X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3| \right] \times \quad (1.4.163)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times 2 \cdot S_7 \cdot |X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3| \cdot \frac{\partial X_2}{\partial V_2} + \\
& +2 \cdot \left[\text{sign}(h_4) \cdot \sqrt{h_4 \cdot \text{sign}(h_4)} \right] \cdot \frac{\partial \left[\text{sign}(h_4) \cdot \sqrt{h_4 \cdot \text{sign}(h_4)} \right]}{\partial V_2} + 0 = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\text{sign}\left[S_3 \cdot (V_1 - Q_1 - X_1) \cdot |V_1 - Q_1 - X_1|\right] \cdot 2 \cdot S_3 \cdot |V_1 - Q_1 - X_1| \cdot \frac{\partial X_1}{\partial V_2} + 0 \cdot \frac{\partial X_2}{\partial V_2} + \\
& +2 \cdot \left[\text{sign}(h_4) \cdot \sqrt{h_4 \cdot \text{sign}(h_4)} \right] \cdot \frac{\partial \left[\text{sign}(h_4) \cdot \sqrt{h_4 \cdot \text{sign}(h_4)} \right]}{\partial V_2} + 0 = 0 \quad . \quad (1.4.164)
\end{aligned}$$

Для определения коэффициентов g_1, g_2, g_3, g_4 необходимо решить систему продифференцированных неявных уравнений по независимой переменной V_3 :

$$\begin{aligned}
& -2 \cdot S_4 \cdot |X_1 - Q_5 - X_2| \cdot \frac{\partial X_1}{\partial V_3} + \left[2 \cdot S_2 \cdot |X_2| + 2 \cdot S_5 \cdot |X_2 - Q_2 - V_2| + \right. \\
& \left. + 2 \cdot S_7 \cdot |X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3| + 2 \cdot S_4 \cdot |X_1 - Q_5 - X_2| \right] \times \\
& \times \frac{\partial X_2}{\partial V_3} + 2 \cdot S_7 \cdot |X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3| = 0
\end{aligned} \tag{1.4.165}$$

$$\begin{aligned}
& \left[2 \cdot S_1 \cdot |X_1| + 2 \cdot S_4 \cdot |X_1 - Q_5 - X_2| + 2 \cdot S_6 \times \right. \\
& \left. \times |X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6| + 2 \cdot S_3 \cdot |V_1 - Q_1 - X_1| \right] \cdot \frac{\partial X_1}{\partial V_3} + \\
& + \left[-2 \cdot S_4 \cdot |X_1 - Q_5 - X_2| \right] \cdot \frac{\partial X_2}{\partial V_3} + \\
& + 2 \cdot S_6 \cdot |X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6| = 0
\end{aligned} \tag{1.4.166}$$

$$\begin{aligned}
& -\text{sign} \left[S_1 \cdot X_1 \cdot |X_1| + S_2 \cdot X_2 \cdot |X_2| \right] \cdot 2 \cdot S_1 \cdot |X_1| \cdot \frac{\partial X_1}{\partial V_3} - \\
& -\text{sign} \left[S_1 \cdot X_1 \cdot |X_1| + S_2 \cdot X_2 \cdot |X_2| \right] \cdot 2 \cdot S_2 \cdot |X_2| \cdot \frac{\partial X_2}{\partial V_3} + \\
& + 2 \cdot \left[\text{sign}(h_1) \cdot \sqrt{h_1 \cdot \text{sign}(h_1)} \right] \cdot \frac{\partial \left[\text{sign}(h_1) \cdot \sqrt{h_1 \cdot \text{sign}(h_1)} \right]}{\partial V_3} + 0 = 0
\end{aligned} \tag{1.4.167}$$

$$\begin{aligned}
& 0 \cdot \frac{\partial X_1}{\partial V_3} - \text{sign} \left[S_5 \cdot (X_2 - Q_2 - V_2) \cdot |X_2 - Q_2 - V_2| \right] \cdot 2 \cdot S_5 \cdot |X_2 - Q_2 - V_2| \cdot \frac{\partial X_2}{\partial V_3} + \\
& + 2 \cdot \left[\text{sign}(h_2) \cdot \sqrt{h_2 \cdot \text{sign}(h_2)} \right] \cdot \frac{\partial \left[\text{sign}(h_2) \cdot \sqrt{h_2 \cdot \text{sign}(h_2)} \right]}{\partial V_3} + 0 = 0
\end{aligned} \tag{1.4.168}$$

$$\begin{aligned}
& -\text{sign} \left[\begin{array}{l} S_6 \cdot (X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6) \cdot |X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6| + \\ + S_7 \cdot (X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3) \cdot |X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3| \end{array} \right] \times \\
& \times 2 \cdot S_6 \cdot |X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6| \cdot \frac{\partial X_1}{\partial V_3} - \\
& -\text{sign} \left[\begin{array}{l} S_6 \cdot (X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6) \cdot |X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6| + \\ + S_7 \cdot (X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3) \cdot |X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3| \end{array} \right] \times \\
& \times 2 \cdot S_7 \cdot |X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3| \cdot \frac{\partial X_2}{\partial V_3} + \\
& + 2 \cdot \left[\text{sign}(h_3) \cdot \sqrt{h_3 \cdot \text{sign}(h_3)} \right] \cdot \frac{\partial \left[\text{sign}(h_3) \cdot \sqrt{h_3 \cdot \text{sign}(h_3)} \right]}{\partial V_3} - \\
& -\text{sign} \left[\begin{array}{l} S_6 \cdot (X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6) \cdot |X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6| + \\ + S_7 \cdot (X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3) \cdot |X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3| \end{array} \right] \times \\
& \times \left[2 \cdot S_6 \cdot |X_1 - Q_5 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3 - Q_6| + 2 \cdot S_7 \cdot |X_2 - Q_2 - V_2 + V_3 - Q_3| \right] = 0
\end{aligned} \tag{1.4.169}$$

$$\begin{aligned}
& \text{sign} \left[S_3 \cdot (V_1 - Q_1 - X_1) \cdot |V_1 - Q_1 - X_1| \right] \cdot 2 \cdot S_3 \cdot |V_1 - Q_1 - X_1| \cdot \frac{\partial X_1}{\partial V_3} + 0 \cdot \frac{\partial X_2}{\partial V_3} + \\
& + 2 \cdot \left[\text{sign}(h_4) \cdot \sqrt{h_4 \cdot \text{sign}(h_4)} \right] \cdot \frac{\partial \left[\text{sign}(h_4) \cdot \sqrt{h_4 \cdot \text{sign}(h_4)} \right]}{\partial V_3} + 0 = 0
\end{aligned} \tag{1.4.170}$$

Коэффициенты P_1, P_2, P_3, P_4 , находим:

$$P_1 = b_1 - f_1 \cdot V_2 - g_1 \cdot V_3; \tag{1.4.171}$$

$$P_2 = b_2 - f_2 \cdot V_2 - g_2 \cdot V_3; \tag{1.4.172}$$

$$P_3 = b_3 - f_3 \cdot V_2 - g_3 \cdot V_3; \tag{1.4.173}$$

$$P_4 = b_4 - f_4 \cdot V_2 - g_4 \cdot V_3; \tag{1.4.174}$$

Рассмотрим одноклыцевую схему, рисунок 1.4.21.

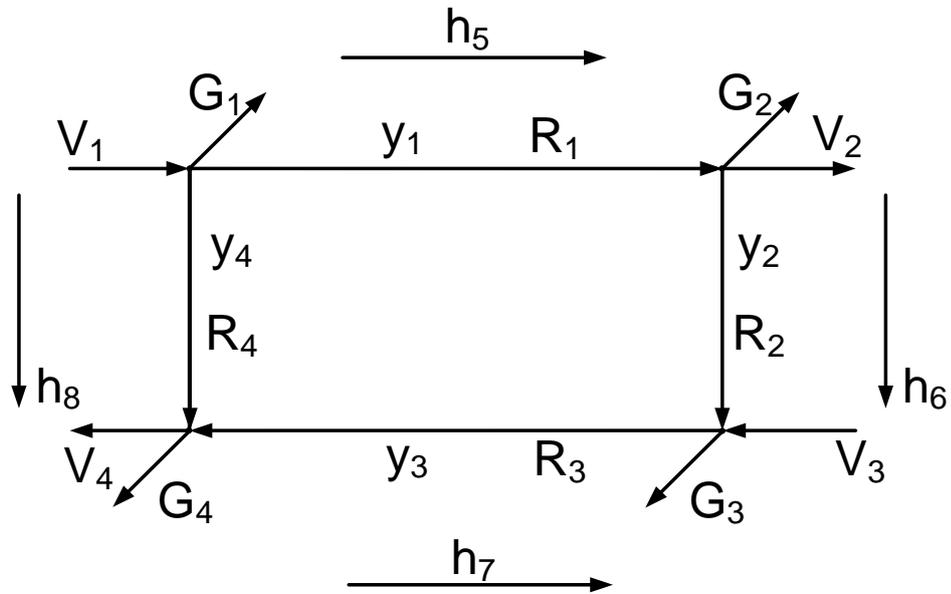


Рисунок 1.4.21 - Схема однокльцевой сети при $V_1 \rightarrow \infty$, $V_4 \rightarrow \infty$

Пусть $V_1 \rightarrow \infty$, $V_4 \rightarrow \infty$.

Уравнение второго закона Кирхгофа

$$R_1 \cdot y_1^2 + R_2 \cdot y_2^2 + R_3 \cdot y_3^2 + R_4 \cdot y_4^2 = 0; \quad (1.4.175)$$

или

$$R_1 \cdot y_1^2 + R_2 \cdot (y_1 - G_2 - V_2)^2 + R_3 \cdot (y_1 - G_2 - V_2 + V_3 - G_3)^2 - R_4 \cdot (V_1 - G_1 - y_1)^2 = 0. \quad (1.4.176)$$

Сделаем подстановку $y_1 = n + m \cdot V_1$

$$R_1 \cdot (n + m \cdot V_1)^2 + R_2 \cdot (n + m \cdot V_1 - G_2 - V_2)^2 + R_3 \cdot (n + m \cdot V_1 - G_2 - V_2 + V_3 - G_3)^2 - R_4 \cdot (V_1 - G_1 - n + m \cdot V_1)^2 = 0. \quad (1.4.177)$$

Из уравнения (1.4.177) получаем систему уравнений для определения коэффициентов асимптоты гиперболы, описываемой уравнением (1.4.176).

$$\left. \begin{aligned} (R_1 + R_2 + R_3) \cdot m^2 - R_4 \cdot (1-m)^2 &= 0 \\ R_1 \cdot n \cdot m + R_2 \cdot (n - G_2 - V_2) \cdot m + R_3 \cdot (n - G_2 - V_2 + V_3 - G_3) \cdot m - \\ - R_4 \cdot (1-m)(G_1 + n) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (1.4.178)$$

Откуда

$$m = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_4}}}; \quad (1.4.179)$$

$$n = \frac{m \cdot [R_2 \cdot (G_2 + V_2) + R_3 \cdot (G_2 + V_2 - V_3 + G_3)] - R_4 \cdot (1-m) \cdot G_1}{m \cdot (R_1 + R_2 + R_3) + R_4 \cdot (1-m)}; \quad (1.4.180)$$

$$n = P + f \cdot V_2 - g \cdot V_3; \quad (1.4.181)$$

$$P = \frac{m \cdot [R_2 \cdot G + R_3 \cdot (G_2 + G_3)] - R_4 \cdot (1-m) \cdot G_1}{m \cdot (R_1 + R_2 + R_3) + R_4 \cdot (1-m)}; \quad (1.4.182)$$

$$f = \frac{m \cdot (R_2 + R_3)}{m \cdot (R_1 + R_2 + R_3) + R_4 \cdot (1-m)}; \quad (1.4.183)$$

$$g = \frac{-m \cdot R_3}{m \cdot (R_1 + R_2 + R_3) + R_4 \cdot (1-m)}; \quad (1.4.185)$$

$$y_1 = m \cdot V_1 + P + f \cdot V_2 - g \cdot V_3; \quad (1.4.186)$$

$$\sqrt{h_5} = \sqrt{R_1} \cdot y_1 = \sqrt{R_1} \cdot V_1 + \sqrt{R_1} \cdot P + \sqrt{R_1} \cdot f \cdot V_2 + \sqrt{R_1} \cdot g \cdot V_3; \quad (1.4.187)$$

$$\begin{aligned} \sqrt{h_6} = \sqrt{R_2} \cdot (y - G_2 - V_2) = \sqrt{R_2} \cdot m \cdot V_1 + \sqrt{R_2} \cdot (P - G_2) + \\ + \sqrt{R_2} \cdot (f - 1) \cdot V_2 + \sqrt{R_2} \cdot g \cdot V_3 \end{aligned}; \quad (1.4.188)$$

$$\begin{aligned} \sqrt{h_7} &= \sqrt{R_3} \cdot (y_1 - G_2 - V_2 + V_3 - G_3) = \sqrt{R_3} \cdot m \cdot V_1 + \sqrt{R_3} \cdot (P - G_2 - G_3) + \\ &+ \sqrt{R_3} \cdot (f - 1) \cdot V_2 + \sqrt{R_3} \cdot (g + 1) \cdot V_3 \end{aligned}; \quad (1.4.189)$$

$$\begin{aligned} \sqrt{h_8} &= \sqrt{R_4} \cdot (V_2 - G_2 - y_1) = \sqrt{R_4} \cdot (1 - m) \cdot V_1 + \sqrt{R_4} \cdot (-G_2 - P) + \sqrt{R_4} \cdot (-f) \cdot V_2 + \\ &+ \sqrt{R_4} \cdot (-g) \cdot V_3 \end{aligned}; \quad (1.4.190)$$

Уравнение (1.4.187, 1.4.188, 1.4.189, 1.4.190) аналогичны уравнениям (1.4.142, 1.4.143, 1.4.144, 1.4.145).

Следовательно, схема (рисунок 1.4.20), при $V_1 \rightarrow \infty$, $V_4 \rightarrow \infty$ будет эквивалентна схеме (рисунок 1.4.21), если $h_1 = h_5$, $h_2 = h_6$, $h_3 = h_7$, $h_4 = h_8$, то есть при равенстве коэффициентов:

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= \sqrt{R_1} \cdot m \\ P_1 &= \sqrt{R_1} \cdot P \\ \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \\ f_4 &= \sqrt{R_4} \cdot (-f) \\ g_4 &= \sqrt{R_4} \cdot (-g) \end{aligned} \right\}. \quad (1.4.191)$$

Поделим и умножим соответственно уравнения (1.4.142, 1.4.143, 1.4.144, 1.4.145) на неизвестные

$\sqrt{R_1}, \sqrt{R_2}, \sqrt{R_3}, \sqrt{R_4}$ сопротивление:

$$\text{sign}(h_1) \cdot \sqrt{h_1 \cdot \text{sign}(h_1)} = \sqrt{R_1} \cdot \left(\frac{m_1}{\sqrt{R_1}} \cdot V_1 + \frac{P_1}{\sqrt{R_1}} + \frac{f_1}{\sqrt{R_1}} \cdot V_2 + \frac{g_1}{\sqrt{R_1}} \cdot V_3 \right); \quad (1.4.192)$$

$$\text{sign}(h_2) \cdot \sqrt{h_2 \cdot \text{sign}(h_2)} = \sqrt{R_2} \cdot \left(\frac{m_2}{\sqrt{R_2}} \cdot V_1 + \frac{P_2}{\sqrt{R_2}} + \frac{f_2}{\sqrt{R_2}} \cdot V_2 + \frac{g_2}{\sqrt{R_2}} \cdot V_3 \right); \quad (1.4.193)$$

$$\text{sign}(h_3) \cdot \sqrt{h_3 \cdot \text{sign}(h_3)} = \sqrt{R_3} \cdot \left(\frac{m_3}{\sqrt{R_3}} \cdot V_1 + \frac{P_3}{\sqrt{R_3}} + \frac{f_3}{\sqrt{R_3}} \cdot V_2 + \frac{g_3}{\sqrt{R_3}} \cdot V_3 \right); \quad (1.4.194)$$

$$\text{sign}(h_4) \cdot \sqrt{h_4 \cdot \text{sign}(h_4)} = \sqrt{R_4} \cdot \left(\frac{m_4}{\sqrt{R_4}} \cdot V_1 + \frac{P_4}{\sqrt{R_4}} + \frac{f_4}{\sqrt{R_4}} \cdot V_2 + \frac{g_4}{\sqrt{R_4}} \cdot V_3 \right); \quad (1.4.195)$$

Если схемы (рисунок 1.4.20 и рисунок 1.4.21) эквивалентны, то очевидно, из соответствия уравнений (1.4.187, 1.4.188, 1.4.189, 1.4.190) и (1.4.192, 1.4.193, 1.4.194, 1.4.195) следует:

$$y_1 = \frac{m_1}{\sqrt{R_1}} \cdot V_1 + \frac{P_1}{\sqrt{R_1}} + \frac{f_1}{\sqrt{R_1}} \cdot V_2 + \frac{g_1}{\sqrt{R_1}} \cdot V_3; \quad (1.4.196)$$

$$y_1 - G_2 - V_2 = \frac{m_2}{\sqrt{R_2}} \cdot V_1 + \frac{P_2}{\sqrt{R_2}} + \frac{f_2}{\sqrt{R_2}} \cdot V_2 + \frac{g_2}{\sqrt{R_2}} \cdot V_3; \quad (1.4.197)$$

$$y_1 - G_2 - V_2 + V_3 - G_3 = \frac{m_3}{\sqrt{R_3}} \cdot V_1 + \frac{P_3}{\sqrt{R_3}} + \frac{f_3}{\sqrt{R_3}} \cdot V_2 + \frac{g_3}{\sqrt{R_3}} \cdot V_3; \quad (1.4.198)$$

$$y_1 - G_1 - V_1 = \frac{m_4}{\sqrt{R_4}} \cdot V_1 + \frac{P_4}{\sqrt{R_4}} + \frac{f_4}{\sqrt{R_4}} \cdot V_2 + \frac{g_4}{\sqrt{R_4}} \cdot V_3; \quad (1.4.199)$$

$$\begin{aligned} \frac{m_2}{\sqrt{R_2}} \cdot V_1 + \frac{P_2}{\sqrt{R_2}} + \frac{f_2}{\sqrt{R_2}} \cdot V_2 + \frac{g_2}{\sqrt{R_2}} \cdot V_3 = \frac{m_1}{\sqrt{R_1}} \cdot V_1 + \frac{P_1}{\sqrt{R_1}} + \frac{f_1}{\sqrt{R_1}} \cdot V_2 + \\ + \frac{g_1}{\sqrt{R_1}} \cdot V_3 - G_2 - V_2 \end{aligned}; \quad (1.4.200)$$

$$\begin{aligned} \frac{m_3}{\sqrt{R_3}} \cdot V_1 + \frac{P_3}{\sqrt{R_3}} + \frac{f_3}{\sqrt{R_3}} \cdot V_2 + \frac{g_3}{\sqrt{R_3}} \cdot V_3 = \frac{m_1}{\sqrt{R_1}} \cdot V_1 + \frac{P_1}{\sqrt{R_1}} + \frac{f_1}{\sqrt{R_1}} \cdot V_2 + \\ + \frac{g_1}{\sqrt{R_1}} \cdot V_3 - G_2 - V_2 + V_3 - G_3 \end{aligned}; \quad (1.4.201)$$

$$\begin{aligned} \frac{m_4}{\sqrt{R_4}} \cdot V_1 + \frac{P_4}{\sqrt{R_4}} + \frac{f_4}{\sqrt{R_4}} \cdot V_2 + \frac{g_4}{\sqrt{R_4}} \cdot V_3 = -\frac{m_1}{\sqrt{R_1}} \cdot V_1 - \frac{P_1}{\sqrt{R_1}} - \\ - \frac{f_1}{\sqrt{R_1}} \cdot V_2 - \frac{g_1}{\sqrt{R_1}} \cdot V_3 - G_1 - V_1 \end{aligned}; \quad (1.4.202)$$

Поскольку точного соответствия нелинейных схем получить невозможно, но можно получить достаточно близкое приближение, определяя минимум суммы квадратов отклонений коэффициентов при узловых расходах V_1, V_2, V_3 .

Из (1.4.200, 1.4.201, 1.4.202) можно записать, если обозначить:

$$x_1 = \frac{1}{\sqrt{R_1}}; x_2 = \frac{1}{\sqrt{R_2}}; x_3 = \frac{1}{\sqrt{R_3}}; x_4 = \frac{1}{\sqrt{R_4}};$$

$$x_5 = G_1; x_6 = G_2; x_7 = G_3.$$

$$\begin{aligned} F_1 = & (m_1 \cdot x_1 - m_2 \cdot x_2)^2 + (P_1 \cdot x_1 - P_2 \cdot x_2 - x_6)^2 + \\ & + (f_1 \cdot x_1 - f_2 \cdot x_2 - 1)^2 + (g_1 \cdot x_1 - g_2 \cdot x_2)^2 + \\ & + (m_1 \cdot x_1 - m_3 \cdot x_3)^2 + (P_1 \cdot x_1 - P_3 \cdot x_3 - x_6 - x_7)^2 + ; \\ & + (f_1 \cdot x_1 - f_3 \cdot x_3 - 1)^2 + (g_1 \cdot x_1 - g_3 \cdot x_3 + 1)^2 + \\ & + (m_1 \cdot x_1 - m_4 \cdot x_4 - 1)^2 + (P_1 \cdot x_1 - P_4 \cdot x_4 - x_5)^2 + \\ & + (f_1 \cdot x_1 - f_4 \cdot x_4)^2 + (g_1 \cdot x_1 - g_4 \cdot x_4)^2 \end{aligned} \quad (1.4.203)$$

Очевидно, что минимум функции можно найти из решения системы уравнений частных производных, приравненных к нулю:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} = & 6 \cdot (m_1^2 + P_1^2 + f_1^2 + g_1^2) \cdot x_1 + 2 \cdot (-m_1 \cdot m_2 - P_1 \cdot P_2 - f_1 \cdot f_2 - g_1 \cdot g_2) \cdot x_2 + \\ & + 2 \cdot (-m_1 \cdot m_3 - P_1 \cdot P_3 - f_1 \cdot f_3 - g_1 \cdot g_3) \cdot x_3 + 2 \cdot (-m_1 \cdot m_4 - P_1 \cdot P_4 - f_1 \cdot f_4 - g_1 \cdot g_4) \cdot x_4 + ; \\ & + 2 \cdot (P_1) \cdot x_5 + 2 \cdot (-2P_1) \cdot x_6 + 2 \cdot (-P_1) \cdot x_7 - 2 \cdot (2f_1 - g_1 + m_1) = 0; \end{aligned} \quad (1.4.204)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_1}{\partial x_2} = & 2 \cdot (m_1 \cdot m_2 + P_1 \cdot P_2 + f_1 \cdot f_2 + g_1 \cdot g_2) \cdot x_1 + 2(m_2^2 + P_2^2 + f_2^2 + g_2^2) \cdot x_2 + ; \\ & + 0 \cdot x_3 + 0 \cdot x_4 + 0 \cdot x_5 + 2(P_2) \cdot x_6 + 0 \cdot x_7 + 2 \cdot f_2 = 0 \end{aligned} \quad (1.4.205)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_1}{\partial x_3} = & 2 \cdot (m_1 \cdot m_3 + P_1 \cdot P_3 + f_1 \cdot f_3 + g_1 \cdot g_3) \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + 2(m_3^2 + P_3^2 + f_3^2 + g_3^2) \cdot x_3 + ; \\ & + 0 \cdot x_4 + 0 \cdot x_5 + 2(P_3) \cdot x_6 + 2(P_3) \cdot x_7 + 2(f_3 - g_3) = 0; \end{aligned} \quad (1.4.206)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_1}{\partial x_4} &= 2 \cdot (m_1 \cdot m_4 + P_1 \cdot P_4 + f_1 \cdot f_4 + g_1 \cdot g_4) \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3 + 2 \cdot (m_4^2 + P_4^2 + f_4^2 + g_4^2) \cdot x_4 + \\ &+ 2 \cdot (P_4) \cdot x_5 + 0 \cdot x_6 + 2 \cdot (P_3) \cdot x_7 + 2 \cdot (-m_4) = 0; \end{aligned} \quad (1.4.207)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial x_5} = 2 \cdot (P_1) \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3 + 2 \cdot (P_4) \cdot x_4 + 2x_5 + 0 \cdot x_6 + 0 \cdot x_7 + 0 = 0; \quad (1.4.208)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial x_6} = 2 \cdot (-2P_1) \cdot x_1 + 2 \cdot (P_2) \cdot x_2 + 2 \cdot (P_3) \cdot x_3 + 0 \cdot x_4 + 0 \cdot x_5 + 2 \cdot (2) \cdot x_6 + 2 \cdot x_7 + 0 = 0; \quad (1.4.209)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial x_7} = 2 \cdot (-2P_1) \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + 2(P_3) \cdot x_3 + 0 \cdot x_4 + 0 \cdot x_5 + 2 \cdot x_6 + 2 \cdot x_7 + 0 = 0; \quad (1.4.210)$$

Система (1.4.204 - 1.4.210) представляет собой систему уравнений и позволяет найти $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$ и

$$R_1 = \left(\frac{1}{x_1}\right)^2; \quad R_2 = \left(\frac{1}{x_2}\right)^2; \quad R_3 = \left(\frac{1}{x_3}\right)^2; \quad R_4 = \left(\frac{1}{x_4}\right)^2; \quad G_1 = x_5; \quad G_2 = x_6; \quad G_3 = x_7.$$

Так как в эквивалентных схемах должен соблюдаться и материальный баланс, то

$$G_3 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 - G_1 - G_2 - G_3. \quad (1.4.211)$$

Поскольку в анализируемых сетях неизвестно соотношение расходов V_1, V_2, V_3 , то кроме изложенного выше варианта №1 $V_1 \rightarrow \infty, V_4 \rightarrow \infty$ необходимо ещё рассмотреть варианты:

$$\text{№2 } V_2 \rightarrow \infty, V_3 \rightarrow \infty;$$

$$\text{№3 } V_1 \rightarrow \infty, V_2 \rightarrow \infty;$$

$$\text{№4 } V_3 \rightarrow \infty, V_4 \rightarrow \infty;$$

$$\text{№5 } V_1 \rightarrow \infty, V_3 \rightarrow \infty;$$

№6 $V_2 \rightarrow \infty, V_4 \rightarrow \infty$.

При этом минимизируемая функция имеет вид

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6$$

Частные производные вида (1.4.204 - 1.4.210) представляет суммы частных производных по вариантам от F

$$\frac{\partial F}{\partial x_1} = \frac{\partial F_1}{\partial x_1} + \frac{\partial F_2}{\partial x_1} + \frac{\partial F_3}{\partial x_1} + \frac{\partial F_4}{\partial x_1} + \frac{\partial F_5}{\partial x_1} + \frac{\partial F_6}{\partial x_1} \quad (1.4.212)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_2} = \frac{\partial F_1}{\partial x_2} + \frac{\partial F_2}{\partial x_2} + \frac{\partial F_3}{\partial x_2} + \frac{\partial F_4}{\partial x_2} + \frac{\partial F_5}{\partial x_2} + \frac{\partial F_6}{\partial x_2} \quad (1.4.213)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_3} = \frac{\partial F_1}{\partial x_3} + \frac{\partial F_2}{\partial x_3} + \frac{\partial F_3}{\partial x_3} + \frac{\partial F_4}{\partial x_3} + \frac{\partial F_5}{\partial x_3} + \frac{\partial F_6}{\partial x_3} \quad (1.4.214)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_4} = \frac{\partial F_1}{\partial x_4} + \frac{\partial F_2}{\partial x_4} + \frac{\partial F_3}{\partial x_4} + \frac{\partial F_4}{\partial x_4} + \frac{\partial F_5}{\partial x_4} + \frac{\partial F_6}{\partial x_4} \quad (1.4.215)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_5} = \frac{\partial F_1}{\partial x_5} + \frac{\partial F_2}{\partial x_5} + \frac{\partial F_3}{\partial x_5} + \frac{\partial F_4}{\partial x_5} + \frac{\partial F_5}{\partial x_5} + \frac{\partial F_6}{\partial x_5} \quad (1.4.215)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_6} = \frac{\partial F_1}{\partial x_6} + \frac{\partial F_2}{\partial x_6} + \frac{\partial F_3}{\partial x_6} + \frac{\partial F_4}{\partial x_6} + \frac{\partial F_5}{\partial x_6} + \frac{\partial F_6}{\partial x_6} \quad (1.4.217)$$

По изложенной методике проведено исследование схемы, рисунок 1.4.22.

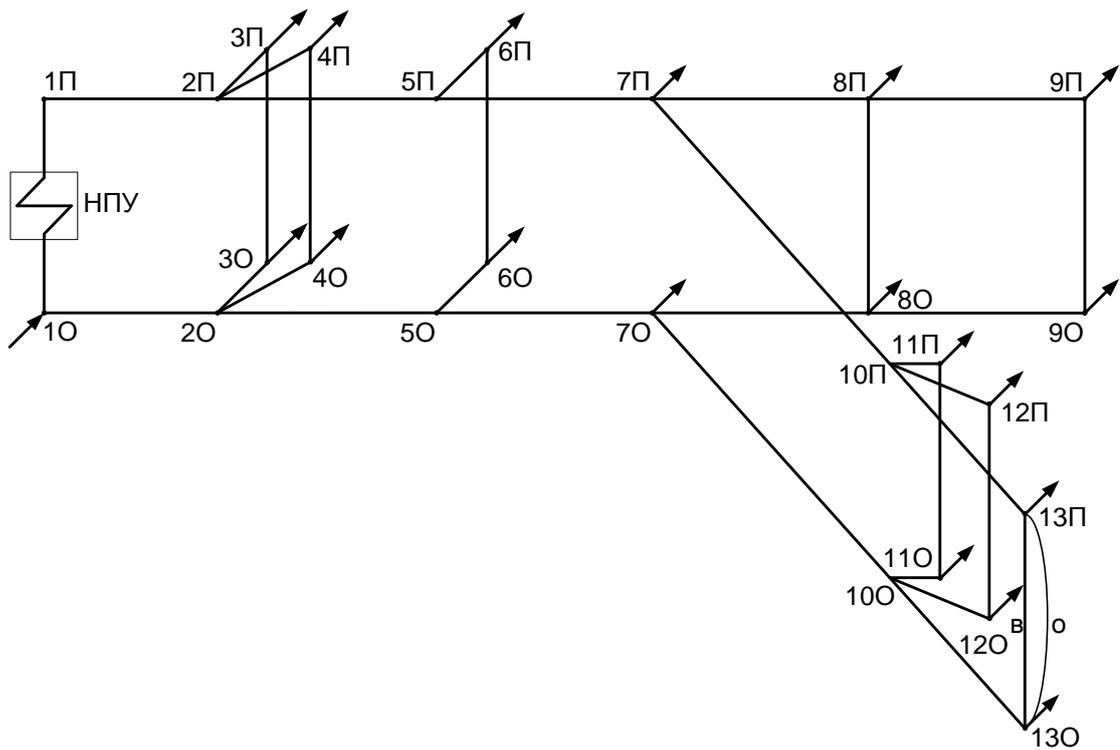


Рисунок 1.4.22 - Схема двухлинейной тепловой сети

Используя методику эквивалентирования, схему можно преобразовать в схему (рисунок 1.4.23)

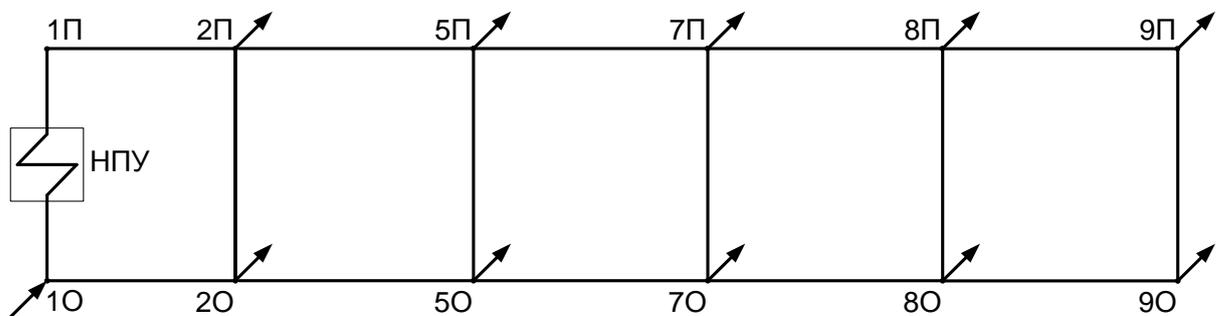


Рисунок 1.4.23 - Схема тепловой сети с эквивалентированными ответвлениями

При исследовании гидравлических режимов часто возникает необходимость выяснить располагаемый перепад у наиболее удаленного абонента, рисунок 1.4.22 – 9П-90, причём в том случае не возникает требований по расчёту предыдущих потребителей. Поэтому в этом этапе наиболее удобна схема эквивалентирования двухкольцевой схемы в однокольцевую, повторенная необходимое число раз. На схеме, рисунок 1.4.23, удобно эквивалентировать в одно кольцо схему, ограниченную узлами: 2П, 5П, 7П, 8П, 80, 70, 50, 20.

В результате эквивалентирования схема преобразуется в рисунок 1.4.24.

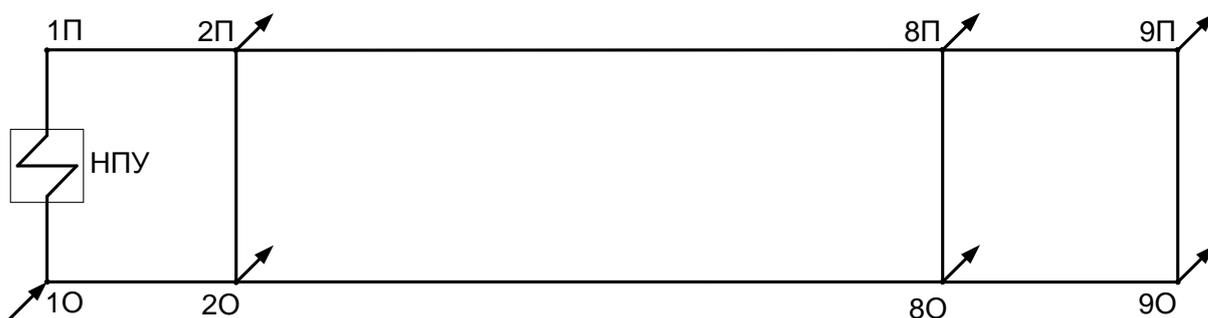


Рисунок 1.4.24 - Схема тепловой сети с эквивалентированием колец.

1.4.2.5 Математическая модель эквивалентного преобразования произвольной двухкольцевой сети с участком без фиксированных расходов в однокольцевую

При анализе эксплуатационных и аварийных режимов гидравлических сетей, таких как водопроводные, тепловые и газовые, необходимо выполнять проектные и проверочные расчеты. Эффективность таких расчетов можно значительно повысить, если применять эквивалентирование.

Рассмотрим методику преобразования пассивной двухкольцевой сети, рисунок 1.4.25 в однокольцевую /29/.

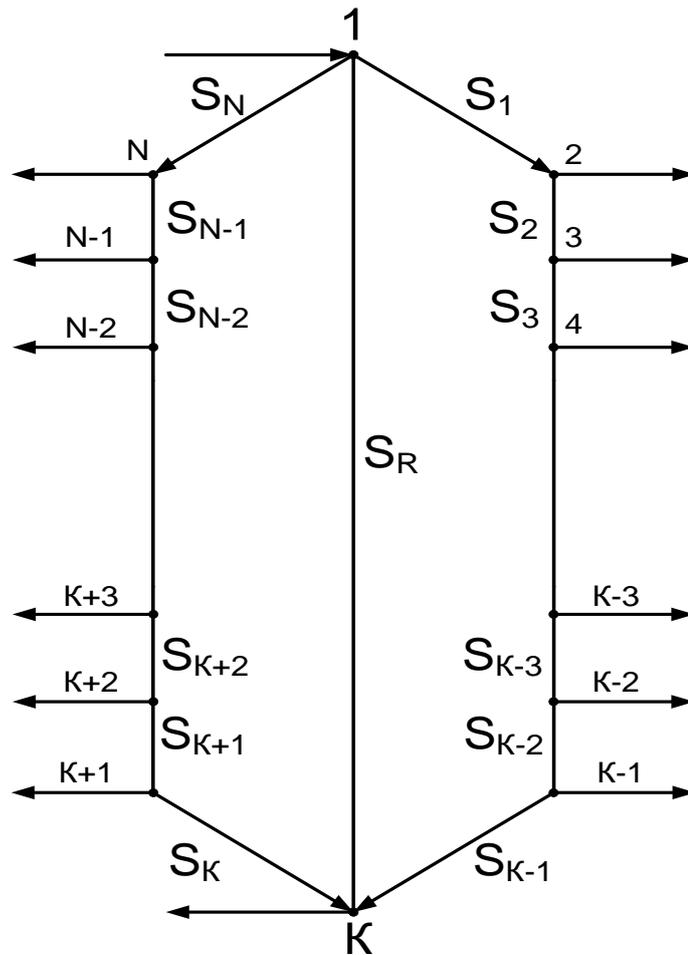


Рисунок 1.4.25 - Схема двухкольцевой пассивной сети

Обозначение на рисунке:

1, 2... N – номера узлов;

K – номер узла соединения трех ветвей, балансирующий узел;

$S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ - сопротивления ветвей;

S_R - сопротивление перемычки;

Наиболее удобно для анализа сети, если схема (рисунок 1.4.25) будет эквивалентно преобразована к схеме (рисунок 1.4.26).

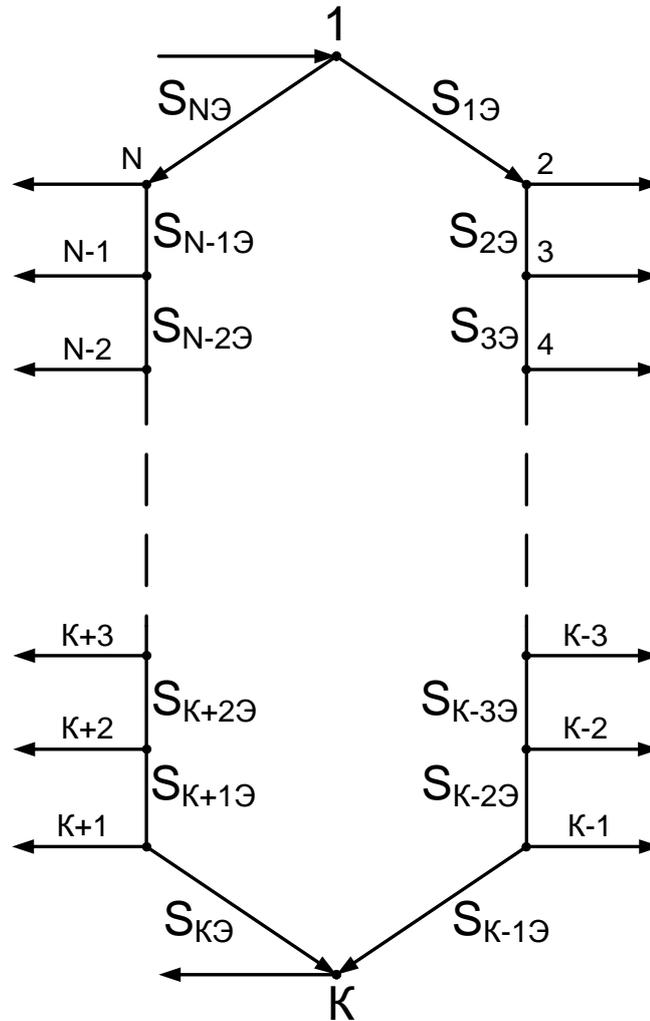


Рисунок 1.4.26 - Схема однокольцевой пассивной сети.

где:

$S_{1Э}, S_{2Э}, S_{3Э}, \dots, S_{NЭ}$ – эквивалентные сопротивления ветвей.

Схемы (рисунок 1.4.25 и рисунок 1.4.26) будут эквивалентны, если при любых равных узловых расходах будут равны потери напоры между узлами. В этом случае внешняя схема как бы "не заметит" подмены двухкольцевой схемы на однокольцевую.

Можно показать, что если взять любые два узла, один как узел входа, а другой как узел выхода из схемы, и устремить их расходы к бесконечности, то корень квадратный из потерь напора между любыми узлами описывается уравнением гиперболы и может быть заменен на уравнение асимптоты. Аналогичная зависимость может быть получена и для двухкольцевой схемы, рисунок 1.4.25.

То есть для любой пары узлов можно получить аналитическое уравнение асимптоты гиперболы

$$\Delta h_{ij} = a_{ij} \cdot V_1 + b_{ij} \cdot V_2 + \dots + c_{ij} \cdot V_N \quad (14.218)$$

где коэффициент при узловом расходе, стремящемся к бесконечности будет равен, например при $V_1 \rightarrow \infty$, $V_K \rightarrow \infty$

$$a_{ij} = \sqrt{S_{ij}} = \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{S_1 + S_2 + \dots + S_{K-1}}} + \frac{1}{\sqrt{S_R}} + \frac{1}{\sqrt{S_K + S_{K+1} + \dots + S_N}}} \quad (1.4.219)$$

Поскольку ищется асимптота по одной переменной, которая стремится к бесконечности, то остальные узловые расходы можно принять равными нулю, тогда схемы рисунок 1.4.25 и рисунок 1.4.26 будут эквивалентны, если для любых двух узлов будет выполнено равенство

$$\sqrt{\Delta h_{ij}} = \sqrt{S_{ij}} \cdot V_i = \sqrt{S_{ij\check{Y}}} \cdot V_i \quad (1.4.220)$$

Из /3/ следует, что схемы будут эквивалентны, если для всех возможных сочетаний узлов входа и выхода, так как ищется соответствие гиперповерхностей, то будет равенство суммарных сопротивлений исходной двухкольцевой и эквивалентной схем:

$$S_{ij} = S_{ij\check{Y}} \quad (1.4.221)$$

Поскольку точного соответствия схемы (рисунок 1.4.25) схеме (рисунок 1.4.26) получить невозможно ввиду нелинейных зависимостей, однако можно получить достаточно хорошее приближение, найти минимум суммы квадратов отклонений суммарных сопротивлений схем:

$$F_{\min} = \sum (S_{ij} - S_{ij\check{Y}})^2 \quad (1.4.222)$$

Изложенный математический аппарат позволяет разработать алгоритм эквивалентирования.

Пусть I – узел входа в схему; J – узел выхода из схемы; K – узел соединения ветвей или балансирующий узел; N – число узлов или участков в схеме.

Так как среди вариантов есть такие, которые дают одинаковые суммарные сопротивления, если поменять местами узлы входа и выхода, то число вариантов определяется изменением I от 1 до N-1, J от I+1 до N.

При расчёте максимального сопротивления возможны 8 типов схем

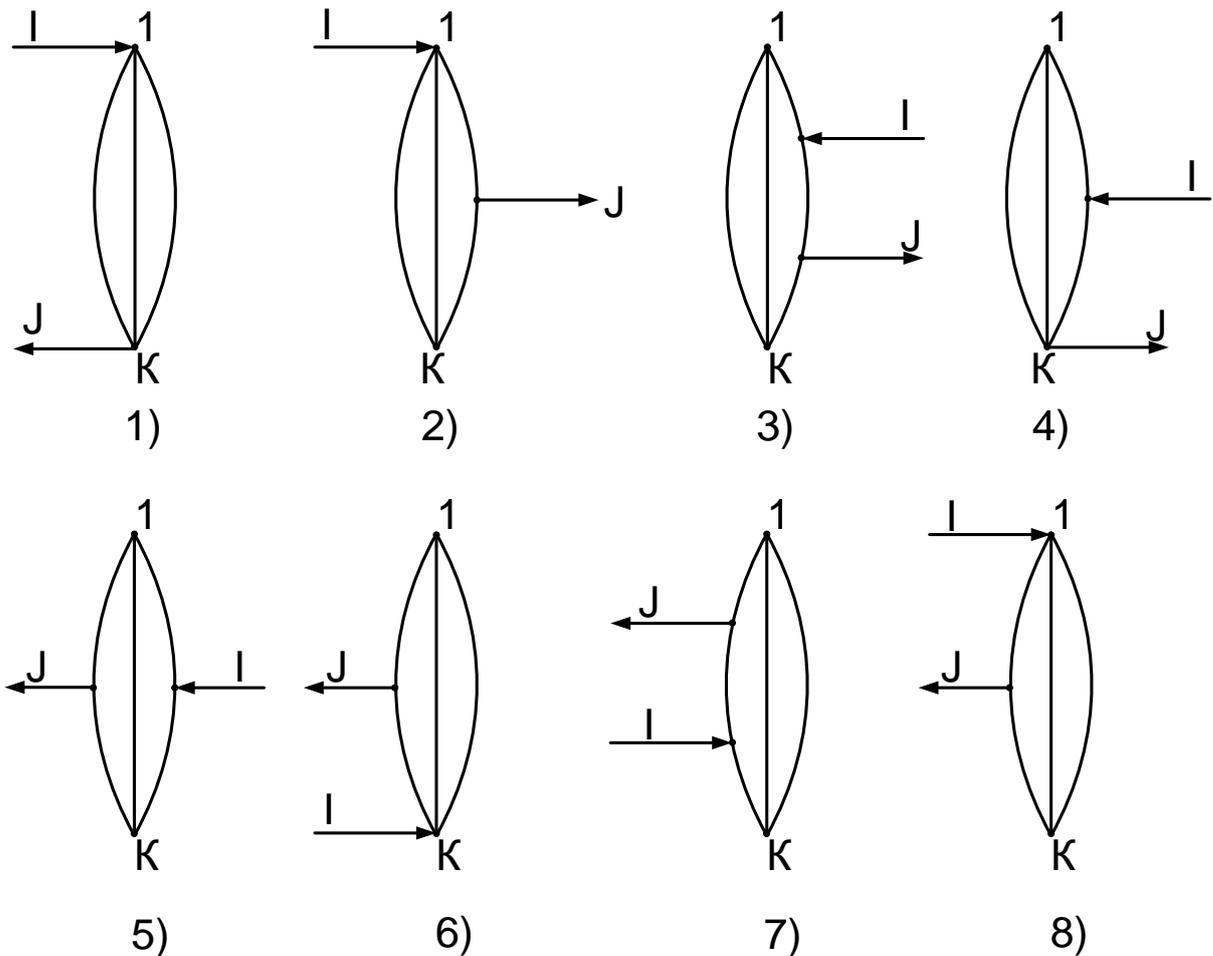


Рисунок 1.4.27 - Варианты схемы

В вариантах схемы 1,2,3,4,6,7,8 суммарное сопротивление находится по методу суммирования последовательных и параллельных сопротивлений, а в схеме варианта 5 увязкой по I и II закона Кирхгофа при $V_I = V_J = I$, тогда:

$$\Delta h = S_{\Sigma} = I \cdot I^2 \quad (1.4.223)$$

то есть

$$\Delta h = S_{\Sigma} \quad (1.4.224)$$

Пусть необходимо провести поверочный расчёт водопроводной сети от двух источников питания. При этом нас интересует лишь нагрузка каждой насосной станции. Поэтому нет необходимости проводить расчет потокораспределения по ветвям схе-

мы, а только с помощью эквивалентирования свернуть схему и ее увязать. На рисунке 1.4.28 представлена схема примера.

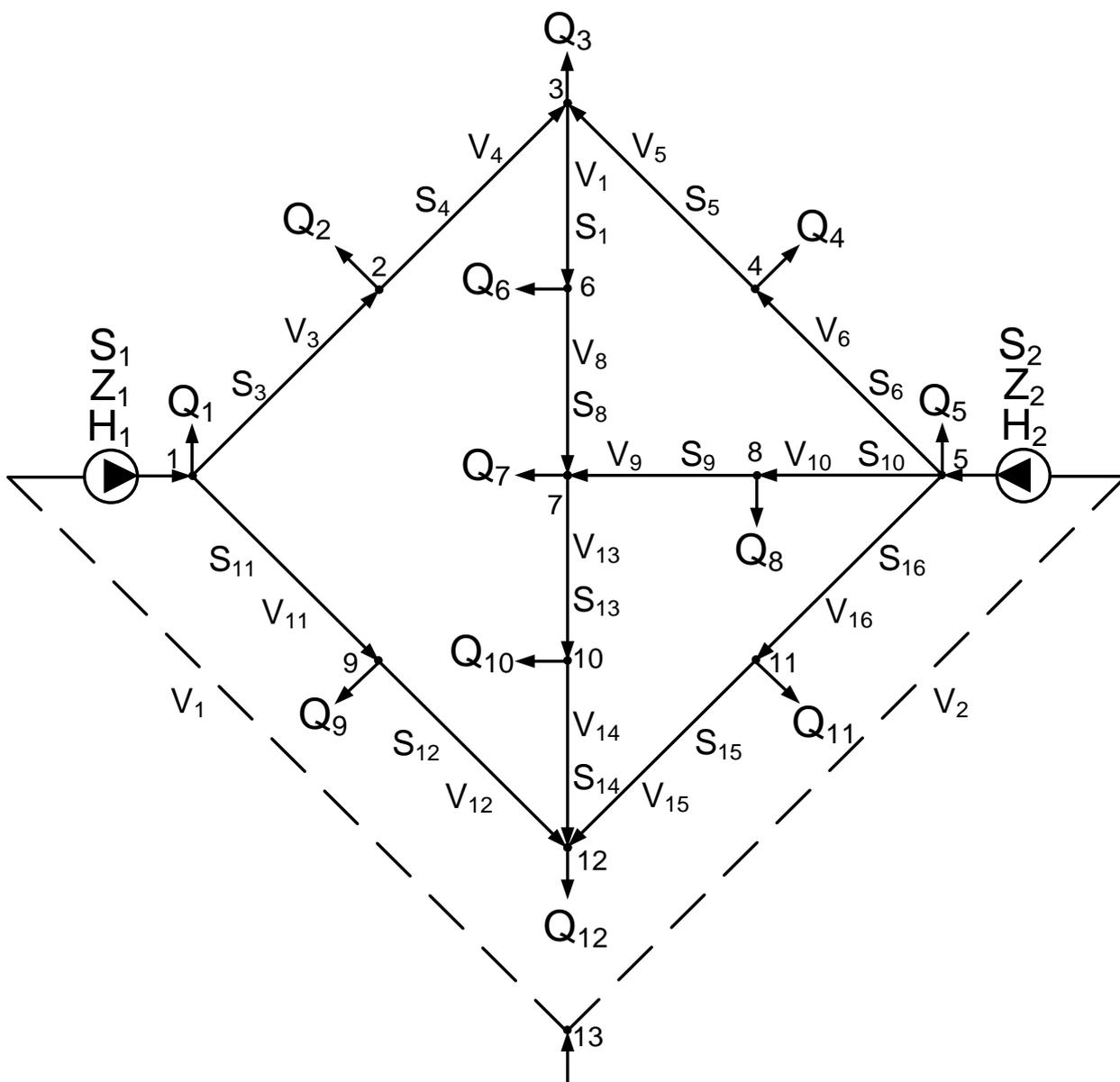


Рисунок 1.4.28 - Схема водопроводной сети

Принятые исходные данные:

$Q_1=10$; $Q_2=20$; $Q_3=30$; $Q_4=40$; $Q_5=50$; $Q_6=60$; $Q_7=70$; $Q_8=80$;
 $Q_9=90$; $Q_{10}=100$; $Q_{11}=110$; $Q_{12}=120$;

$$\begin{aligned}
S_1 &= 1,1 \cdot 10^{-4}; & S_2 &= 1,2 \cdot 10^{-4}; & S_3 &= 1,3 \cdot 10^{-4}; & S_4 &= 1,4 \cdot 10^{-4}; & S_5 &= 1,5 \cdot 10^{-4}; \\
S_6 &= 1,6 \cdot 10^{-4}; & S_7 &= 1,7 \cdot 10^{-4}; & S_8 &= 1,8 \cdot 10^{-4}; & S_9 &= 1,9 \cdot 10^{-4}; & S_{10} &= 2 \cdot 10^{-4}; \\
S_{11} &= 2,1 \cdot 10^{-4}; & S_{12} &= 2,2 \cdot 10^{-4}; & S_{13} &= 2,3 \cdot 10^{-4}; & S_{14} &= 2,4 \cdot 10^{-4}; & S_{15} &= 2,5 \cdot 10^{-4}; \\
S_{16} &= 2,6 \cdot 10^{-4}; & Z_1 &= 120; & H_1 &= 40; & Z_2 &= 100; & H_2 &= 70.
\end{aligned}$$

По формулам (1.4.36)- (1.4.38) вначале проводим эквивалентирование ветвей.

Ветвь 1-2-3. Q_1 и Q_3 относим к этой ветви.

$$S_{\dot{Y}_{1-3}} = 1,3 \cdot 10^{-4} + 1,4 \cdot 10^{-4} = 2,7 \cdot 10^{-4}$$

$$Q_{1\dot{Y}_1} = \frac{1,3 \cdot 10^{-3} + 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot (10 + 20)}{1,3 \cdot 10^{-4} + 1,4 \cdot 10^{-4}} = 20,37037$$

$$Q_{3\dot{Y}_1} = 10 + 20 + 30 - 20,37037 = 39,62963$$

Ветвь 1-9-12. Q_{12} относим к этой ветви.

$$S_{\dot{Y}_{1-12}} = 2,1 \cdot 10^{-4} + 2,2 \cdot 10^{-4} = 4,3 \cdot 10^{-4}$$

$$Q_{1\dot{Y}_2} = \frac{2,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0 + 2,2 \cdot 10^{-4} \cdot (0 + 90)}{2,1 \cdot 10^{-4} + 2,2 \cdot 10^{-4}} = 46,046511$$

$$Q_{12\dot{Y}_1} = 0 + 9 + 12 - 46,046511 = 163,95349$$

Ветвь 5-4-3. Q_5 относим к этой ветви.

$$S_{\dot{Y}_{5-3}} = 1,6 \cdot 10^{-4} + 1,5 \cdot 10^{-4} = 3,1 \cdot 10^{-4}$$

$$Q_{5\dot{Y}_1} = \frac{1,6 \cdot 10^{-4} \cdot 50 + 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot (50 + 40)}{1,6 \cdot 10^{-4} + 1,5 \cdot 10^{-4}} = 69,354838$$

$$Q_{3\dot{Y}_2} = 50 + 40 - 69,354838 = 20,645162$$

Ветвь 5-11-12.

$$S_{\dot{Y}_{5-12}} = 2,6 \cdot 10^{-4} + 2,5 \cdot 10^{-4} = 5,1 \cdot 10^{-4}$$

$$Q_{5\dot{Y}_2} = \frac{2,6 \cdot 10^{-4} + 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot (0 + 110)}{2,6 \cdot 10^{-4} + 2,5 \cdot 10^{-4}} = 53,921568$$

$$Q_{12\dot{Y}_2} = 0 + 110 + 0 - 53,921568 = 56,07843$$

Ветвь 5-8-7. Q_7 относим к этой ветви.

$$S_{\dot{Y}5-7} = 2 \cdot 10^{-4} + 1,9 \cdot 10^{-4} = 3,9 \cdot 10^{-4}$$

$$Q_{5\dot{Y}3} = \frac{2 \cdot 10^{-4} \cdot 0 + 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot (0 + 80)}{2 \cdot 10^{-4} + 1,9 \cdot 10^{-4}} = 38,974358$$

$$Q_{3\dot{Y}1} = 0 + 80 + 70 - 38,974358 = 111,025642$$

Ветвь 3-6-7.

$$S_{\dot{Y}3-7} = 1,7 \cdot 10^{-4} + 1,8 \cdot 10^{-4} = 3,5 \cdot 10^{-4}$$

$$Q_{3\dot{Y}3} = \frac{1,7 \cdot 10^{-4} \cdot 0 + 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot (0 + 60)}{1,7 \cdot 10^{-4} + 1,8 \cdot 10^{-4}} = 30,857142$$

$$Q_{7\dot{Y}2} = 0 + 60 + 0 - 30,857142 = 29,142858$$

Ветвь 7-10-12.

$$S_{\dot{Y}7-12} = 2,3 \cdot 10^{-4} + 2,4 \cdot 10^{-4} = 4,7 \cdot 10^{-4}$$

$$Q_{7\dot{Y}3} = \frac{2,3 \cdot 10^{-4} \cdot 0 + 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot (0 + 100)}{2,3 \cdot 10^{-4} + 2,4 \cdot 10^{-4}} = 51,063829$$

$$Q_{12\dot{Y}3} = 0 + 100 + 0 - 51,063829 = 48,93617$$

В результате схема принимает вид, рисунок 1.4.29.

$$Q_{1\dot{Y}} = 20,37037 + 46,046511 = 66,416881$$

$$Q_{3\dot{Y}} = 39,62963 + 20,645163 + 30,857142 = 91,131934$$

$$Q_{5\dot{Y}} = 69,354838 + 53,921568 + 38,974358 = 162,25077$$

$$Q_{7\dot{Y}} = 111,025642 + 28,142858 + 51,063829 = 191,23233$$

$$Q_{12\dot{Y}} = 163,95349 + 56,07843 + 48,93617 = 268,96809$$

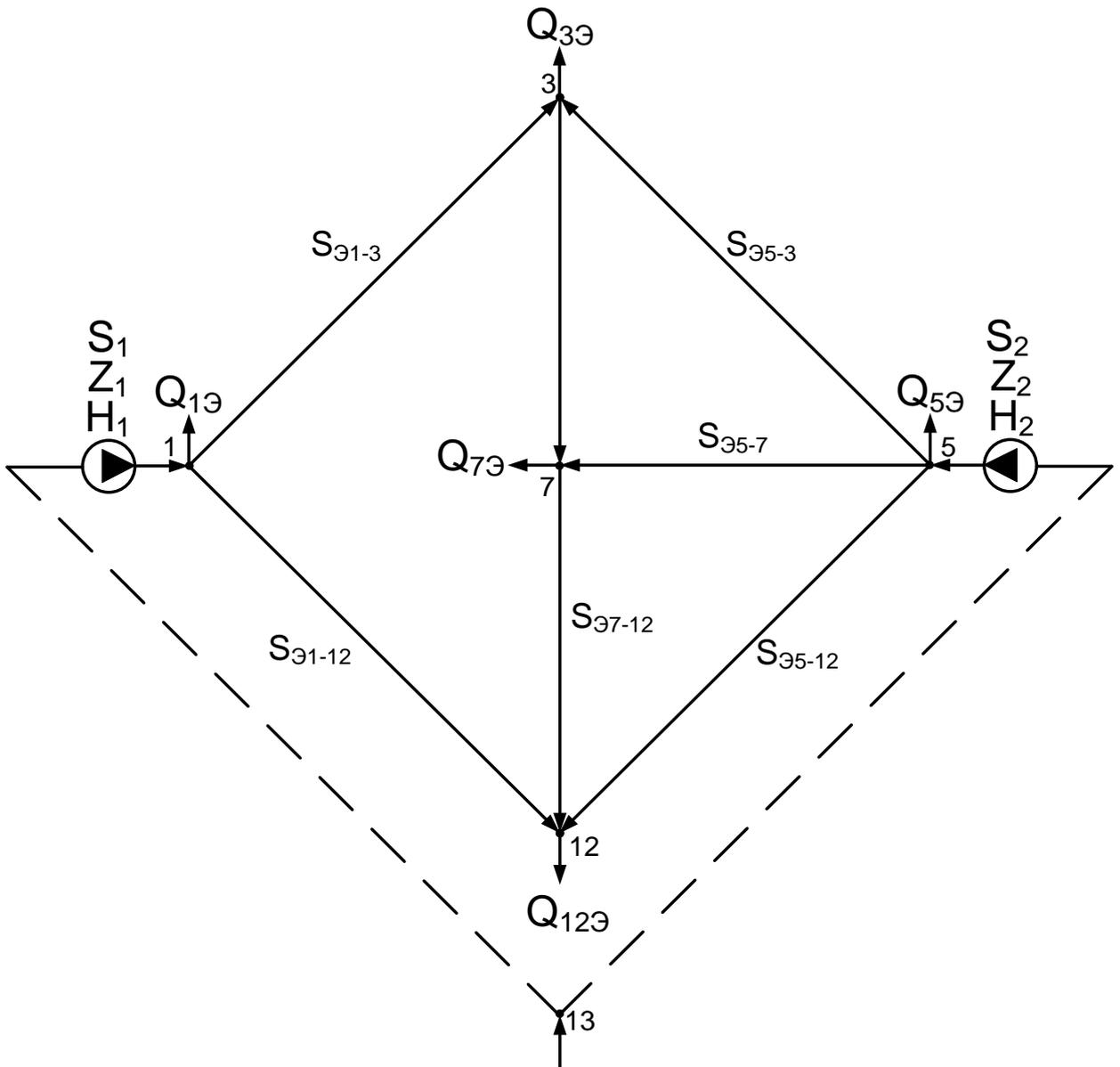


Рисунок 1.4.29 - Первая эквивалентная схема

На схеме (рисунок 1.4.29) четырехугольник 12-7-3-5-12 представляет собой двух-кольцевую схему, которую эквивалентим по вышеприведенной программе. Схема принимает вид, рисунок 1.4.30.

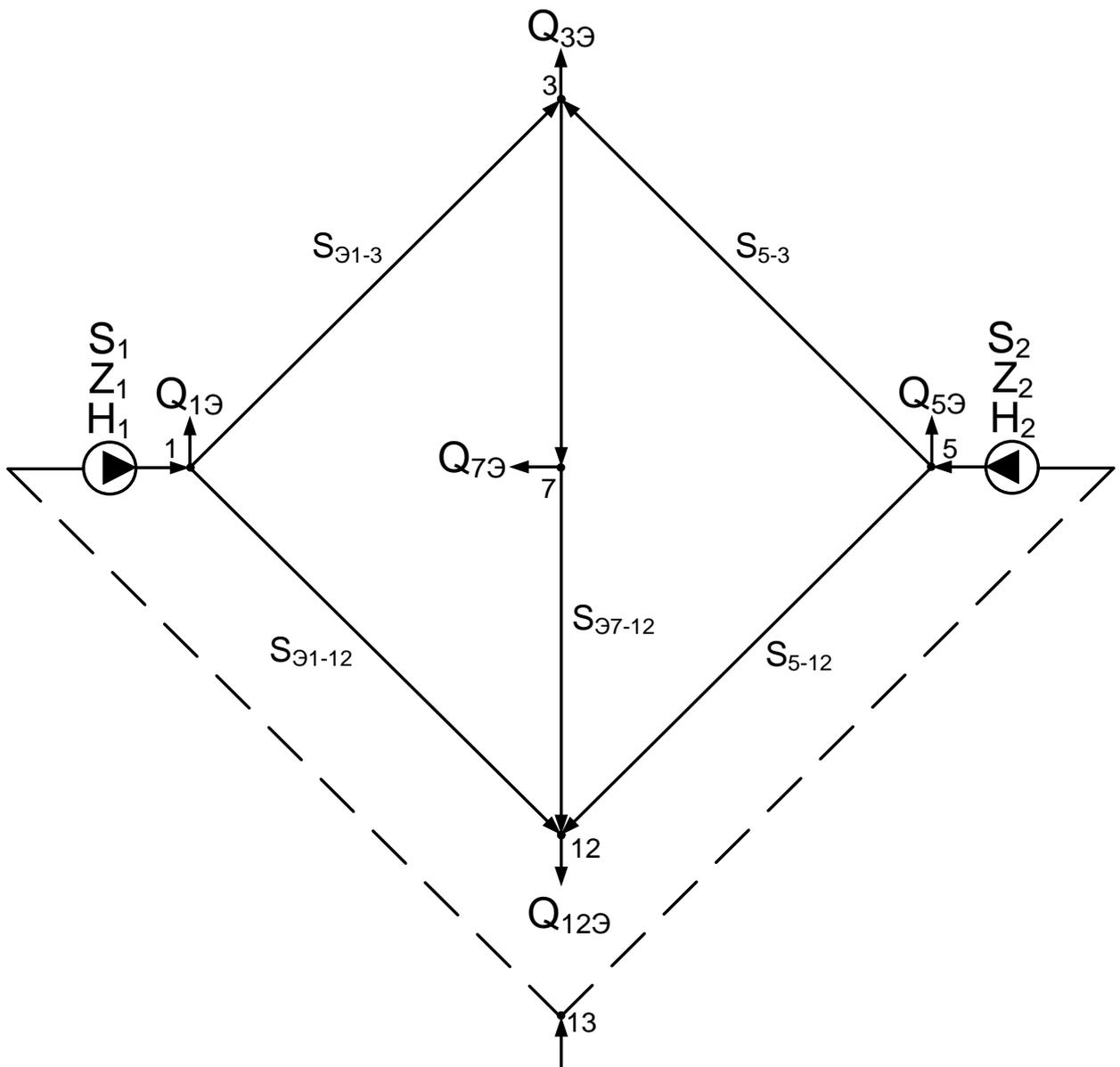


Рисунок 1.4.30 - Вторая эквивалентная схема

Сопротивления эквивалентных ветвей получаем в результате работы программы

$$S_{3-7} = 1,3184151 \cdot 10^{-4}$$

$$S_{5-3} = 1,2498496 \cdot 10^{-4}$$

$$S_{5-12} = 5,2483986 \cdot 10^{-4}$$

$$S_{7-12} = 4,9685150 \cdot 10^{-4}$$

Эквивалентруем ветвь 3-7-12. $Q_{3Э}$ и $Q_{12Э}$ относим к этой ветви.

$$S_{3-12} = 1,3184151 \cdot 10^{-4} + 4,968515 \cdot 10^{-4} = 6,2869301 \cdot 10^{-4}$$

$$Q_{3\dot{Y}\dot{Y}} = \frac{1,3184151 \cdot 10^{-4} \cdot 91,131934 + 4,968515 \cdot 10^{-4} \cdot (91,131934 + 191,23233)}{1,3184151 \cdot 10^{-4} + 4,968515 \cdot 10^{-4}} = 242,26144$$

$$Q_{12\dot{Y}\dot{Y}} = 91,131934 + 191,23233 + 268,96809 - 242,26144 = 309,07091$$

Схема снова принимает вид двухкольцевой и ещё раз эквивалентруется по программе.

Получаем:

$$S_{5-3\dot{Y}} = 0,95628486 \cdot 10^{-4}$$

$$S_{5-12\dot{Y}} = 1,7445019 \cdot 10^{-4}$$

$$S_{1-12\dot{Y}} = 3,5017195 \cdot 10^{-4}$$

$$S_{1-3\dot{Y}} = 3,1898144 \cdot 10^{-4}$$

Схема принимает вид (рисунок 1.4.31).

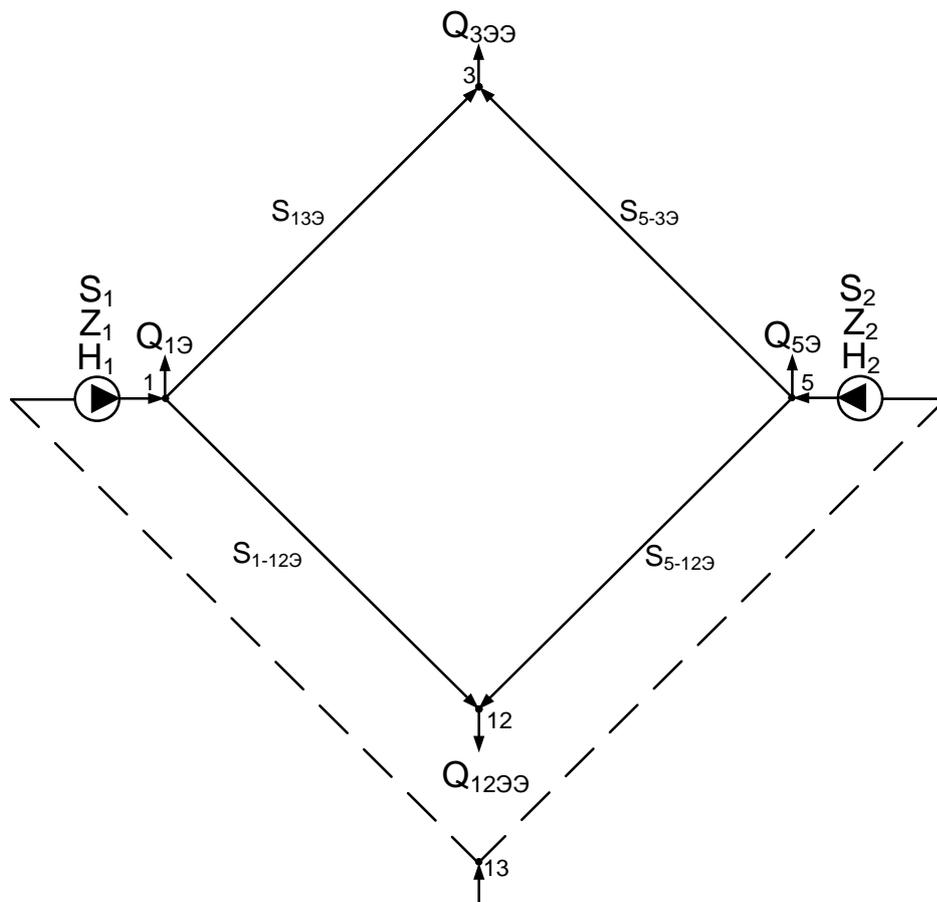


Рисунок 1.4.31 - Третья эквивалентная схема

Эквивалентуем ветвь 1-3-5. Q_{13} и Q_{53} относим к этой ветви.

$$S_1 = 3,1898144 \cdot 10^{-4} + 9,5628486 \cdot 10^{-4} = 4,140993 \cdot 10^{-4}$$

$$Q_{11} = \frac{3,11898144 \cdot 10^{-4} \cdot 66,416881 + 9,5628486 \cdot 10^{-5} \cdot (66,416881 + 242,26144)}{3,11898144 \cdot 10^{-4} + 9,5628486 \cdot 10^{-4}} = 122,29372$$

$$Q_{51} = 66,416881 + 242,26144 + 162,25077 - 122,29372 = 384,63537$$

Эквивалентуем ветвь 1-12-5.

$$S_2 = 3,5017195 \cdot 10^{-4} + 1,7445019 \cdot 10^{-4} = 5,2462214 \cdot 10^{-4}$$

$$Q_{12} = \frac{3,5017195 \cdot 10^{-4} \cdot 0 + 1,7445019 \cdot 10^{-4} \cdot (0 + 309,07091)}{3,5017195 \cdot 10^{-4} + 1,7445019 \cdot 10^{-4}} = 102,77392$$

$$Q_{52} = 0 + 309,07091 + 0 - 102,77392 = 206,29699$$

$$Q_1 = Q_{11} + Q_{12} = 122,29372 + 102,77392 = 225,06764$$

$$Q_5 = Q_{51} + Q_{52} = 384,63537 + 206,29699 = 554,93236$$

Так как ветви 1 и 2 параллельны, то их суммарное сопротивление равно:

$$S_{\dot{y}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{4,14603993 \cdot 10^{-4}}} + \frac{1}{\sqrt{5,2462214 \cdot 10^{-4}}} \right)^2} = 1,1619319 \cdot 10^{-4}$$

Окончательная схема принимает вид, рисунок 1.4.32.

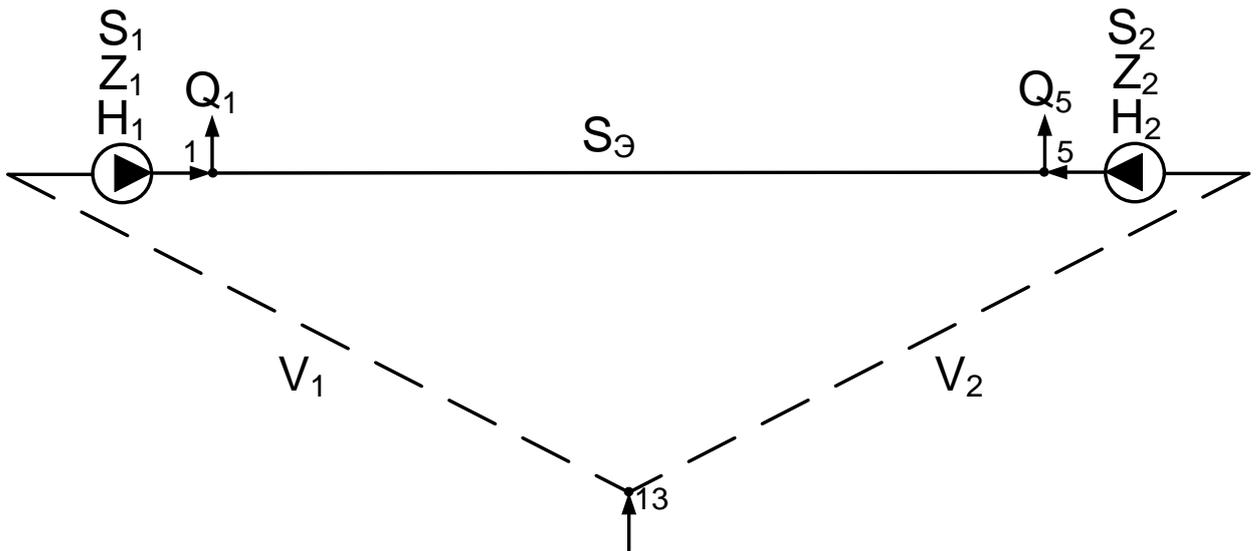


Рисунок 1.4.32 - Окончательная эквивалентная схема

Проведя увязку схемы (рисунок 1.4.32) традиционным методом по уравнению Кирхгофа получаем:

$$V_1 = 335,06816$$

$$V_2 = 444,93184$$

Если же сразу произвести увязку схемы (рисунок 1.4.28), то получаем:

$$V_1 = 329,54509$$

$$V_2 = 450,45491$$

Расхождения незначительны, а расчёт по методике эквивалентирования значительно эффективнее.

Литература

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 23 мая 2006 г. № 307 г. Москва «О порядке предоставления коммунальных услуг гражданам» Приложение №1.
2. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. Москва. Издательство МЭИ. 2001. 472 с.
3. Апарцев М.М. Наладка водяных систем централизованного теплоснабжения. Справочное пособие. Москва. Энергоатомиздат. 1983. 203 с.
4. Сафонов А.П. Сборник задач по теплофикации и тепловым сетям. Москва. «Энергия». 1968. 240 с.
5. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Водяные системы теплоснабжения. Уравнения измерений тепловой энергии и количества теплоносителя. МИ 2412-97. Уравнения определения плотности и энтальпии воды.
6. Временные методические указания по анализу соответствия характеристик отопления проектным данным эксплуатируемого здания и проведению расчёта его фактического теплопотребления. Администрация города Иваново. Ивановский Государственный энергетический университет. Региональная энергетическая комиссия. Авторы: канд. техн. наук Гудзюк В.Л., инж. Грачев С.В., д-р техн. наук Мошкарин А.В., канд. техн. наук Пыжов В.К., инж. Тюрин А.Ю. Иваново, 1998. 15 с.
7. Солодов А.В., Гудзюк В.Л. Определение количества тепловой энергии на отопление здания при отсутствии теплосчётчика. Энергоэффективность. Опыт. Проблемы. Решения. Выпуск 3. 2002. 3 с.
8. Соколов Е.Я., Сафонов А.П., Воронкова Н.А. Метод оперативной оценки расхода тепла на отопление. Теплоэнергетика. №6. 1989. 4 с.
9. Соколов Е.Я., Сафонов А.П., Воронкова Н.А. Метод контроля отопительной нагрузки. Электрические станции. №9. 1990. 5 с.
10. Сапрыкин И.М. Метод контроля качества наладки в системах теплоснабжения. Новости теплоснабжения. №1. 2004. 6 с.
11. Аверьянов В.К., Михайлов А.Г., Миткевич О.А., Сулимов Н.В., Федоров А.В. Диагностика теплогидравлических режимов и эксплуатационных характеристик систем отопления. АВОК. №6. 2006. 4 с., №7. 2006. 4 с.
12. Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения: Справочник /Под общ. редакцией А.М. Курганова. 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Стройиздат. Ленингр. от-ние, 1986. -440 с: ил.
13. Зингер Н.М. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем. М., «Энергия», 1976. 336 с. с ил.

14. Альтшуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.П. Гидравлика и аэродинамика. Москва. Стройиздат.1987. 415 с.
15. Методические указания по составлению энергетической характеристики для систем транспорта тепловой энергии по показателю «Тепловые потери». СО 153-34.20.523-2003. Часть 3.
16. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. РД 34.20.501-95. 15-е издание, переработанное и дополненное.
17. Методические рекомендации по составу и объему технической документации на предприятиях тепловых сетей системы жилищно-коммунального хозяйства. Выпуск 1. Тепловые сети. Энергоатомиздат.
18. А.П. Меренков, В.Я. Хасилев Теория гидравлических цепей, М. Наука. 1985. 279 с.
19. В.И. Манюк, Я.М. Каплинский, Э.Б. Хиж и др. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей. М. Стройиздат. 1988. 354 с.
20. А.Г. Евдокимов, А.Д. Тевяшев, В.В. Дубровский Моделирование и оптимизация потоков распределения в инженерных сетях, М. Стройиздат, 1990. 368 с.
21. Д. Химмельблау Анализ процессов статистическими методами, М. Мир, 1973. 957 с.
22. Н. Джонсон, Ф. Лион. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента, М. Мир, 1981. 516 с.
23. Е.Я. Соколов Теплофикация и тепловые сети. М. Энергия. 1975. 376 с.
24. Пшеничников С.Б., Генварев А.А. Основы альтернионного анализа нелинейных сетей гидравлического типа. – Известия высших учебных заведений. Энергетика. №4, 1984. 4 с. Минск.
25. Пшеничников С.Б., Генварев А.А. Альтернионный анализ на примере расчёта трёх-контурной сети. – Известия высших учебных заведений. Энергетика. №8. 1984. 2 с. Минск.
26. Кулагин Ю.М., Генварёв А.А., Черепкова О.Г. Эквивалентирование участков гидравлической сети. – Известия высших учебных заведений. Энергетика. №6. 1988. 5 с. Минск.
27. Генварев А.А. Асимптотическое эквивалентирование гидравлических сетей. Монография. – Иваново. 1993. 136 с.
28. Генварев А.А. Расчёт потоков распределения в кольцевых гидравлических сетях методом приведения исходной системы трансцендентных уравнений к системе обыкновенных дифференциальных уравнений и их численном интегрировании. Деп.

ВИНИТИ 29.03.95, №855-B95, 9 с.

29. Генварев А.А. Эквивалентное преобразование двухкольцевой схемы в однокольцевую. Деп. ВИНТИ 15.12.94, №2897-1394, 15 с.
30. Генварев А.А. Асимптотическое эквивалентирование гидравлических сетей. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Иваново. 1995. 190 с.
31. Генварев А.А. Анализ технического состояния отопительных систем зданий при элеваторном присоединении. – Новости теплоснабжения. №1. 2008. 1 с.
32. Хасилев В. Я. Элементы теории гидравлических цепей. – Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1964, № 1, с. 69-88.
33. Зайцев Г. А. Основные формулы для действительного спинора и алгебраическая модель квантованных волновых полей. – ДАН СССР, 1964, 156, № 2, с. 294-297.
34. Ван-дер-Варден. Современная алгебра. – М.: ОНТИ, 1947.
34. Расчет водопроводных сетей/ Н. Н. Абрамов и др. – М.: Стройиздат, 1983. – 278 с.
35. Константинов Ю. М. Гидравлика. – Киев: Вища школа, 1981. – 360 с.