

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Забайкальский государственный университет»
(ФГБОУ ВО «ЗабГУ»)

УДК
№ госрегистрации АААА-А17-117030310070-3
Инв. №

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной
и инновационной работе,
д-р техн. наук, профессор
А.Н. Хатькова
30.01.18 2018 г.



ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

«Разработка математического обеспечения для построения суточных графиков отпуска тепловой энергии в системах централизованного теплоснабжения и их экспериментальная верификация»

по теме:

«РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ ТЕПЛОЙ ИНЕРЦИОННОСТИ РАЗВЕТВЛЕННОЙ СИСТЕМЫ
ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ РЕКУРРЕНТНЫХ СООТНОШЕНИЙ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ПЕРВОГО ПОРЯДКА»
(промежуточный)

Руководитель темы

 30.01.18
подпись, дата

А.Г. Батухтин

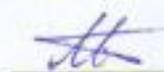
СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы,
канд. техн. наук,
доцент

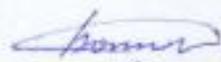

30.01.18

А.Г. Батухтин
(введение, разделы 1-4, заключения)

Исполнители темы:


30.01.18

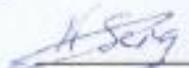
М.С. Басс (раздел 4)


30.01.18

С.Г. Батухтин
(разделы 2-4)

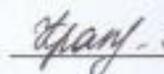

30.01.18

М.В. Кобылкин
(введение, раздел 1)


30.01.18

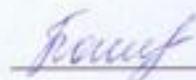
С.В. Какауров
(введение, раздел 1)

Нормоконтролер


30.01.18

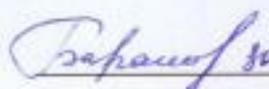
Е.С. Крапивина

Соисполнители:
канд. физ.-мат. наук


30.01.18

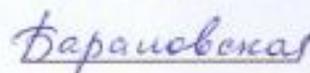
И.Ю. Батухтина
(введение, разделы 1-4, заключения)

аспирант


30.01.18

М.Г. Барановская
(раздел 2)

студент


30.01.18

Е.Э. Барановская
(раздел 3)

РЕФЕРАТ

Отчет содержит 61 страницу, 4 рисунка, 4 таблицы, 36 источников.

СИСТЕМА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ,
ТЕПЛОВЫЕ СЕТИ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ВЕРИФИКАЦИЯ,
ИНЕРЦИОННОСТЬ, ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ

НИР выполнялась в рамках инициативного научного проекта фундаментального характера, выполняемого в рамках базовой части государственного задания. Проект № 13.9179.2017. Тема проекта: «Разработка математического обеспечения для построения суточных графиков отпуска тепловой энергии в системах централизованного теплоснабжения и их экспериментальная верификация», тема первого этапа: «Разработка и экспериментальная верификация математической модели тепловой инерционности разветвленной системы централизованного теплоснабжения на основе решения последовательности рекуррентных соотношений дифференциальных уравнений первого порядка»

Объектом исследования первого этапа являются системы централизованного теплоснабжения. Предметом исследования являются параметры тепловой инерционности разветвленной системы централизованного теплоснабжения.

Соответствие проводимых исследований:

- приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации : Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика.

- приоритетным направлениям модернизации и технологического развития экономики России: Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика.

- критическим технологиям: Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии.

Научные результаты этапа: Разработка и экспериментальная верификация математической модели тепловой инерционности разветвленной системы централизованного теплоснабжения на основе решения последовательности рекуррентных соотношений дифференциальных уравнений первого порядка.

СОДЕРЖАНИЕ

Обозначения и сокращения	6
Введение	7
1. Аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках НИР	8
2. Получение решения последовательности рекуррентных соотношений дифференциальных уравнений первого порядка	12
2.1. Получение последовательности рекуррентно связанных соотношений	12
2.2. Выявление общей закономерности решений	14
2.3. Получение решения в общем виде	14
2.4. Получение решения с учетом составляющих начальных и установившихся состояний	18
3. Разработка математической модели тепловой инерционности разветвленной системы централизованного теплоснабжения на основе решения последовательности рекуррентных соотношений дифференциальных уравнений первого порядка	26
4. Экспериментальная верификация математической модели тепловой инерционности разветвленной системы централизованного теплоснабжения	31
4.1. Подготовка и проведение испытаний	33
4.2. Обработка данных испытаний	34
4.3. Сравнение данных испытаний и результатов расчетов по математической модели тепловой инерционности разветвленной системы централизованного теплоснабжения	36
Заключение	39
Список использованных источников	40
Приложения	45

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ГРЭС – государственная районная электрическая станция;

НИР – научно-исследовательская работа;

РД – регламентирующий документ;

РФ – Российская Федерация;

СПО – союзное производственное объединение;

СЦТ – системы централизованного теплоснабжения.

ВВЕДЕНИЕ

Целью НИР являлось: повышение эффективности систем централизованного теплоснабжения на основе разработки и внедрения алгоритмов для построения суточных графиков отпуска тепловой энергии.

Задачи НИР: - разработка и экспериментальная верификация математической модели тепловой инерционности разветвленной системы централизованного теплоснабжения на основе решения последовательности рекуррентных соотношений дифференциальных уравнений первого порядка; - разработка и экспериментальная верификация комплексной математической модели теплоаккумулирующих свойств тепловых сетей и ограждающих конструкций потребителей при построении суточных графиков отпуска тепловой энергии в системах централизованного теплоснабжения; - разработка математического обеспечения для построения суточных графиков отпуска тепловой энергии в системах централизованного теплоснабжения и их экспериментальная верификация.

Краткое содержание научной работы:

- аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках НИР;
- получение решения последовательности рекуррентных соотношений дифференциальных уравнений первого порядка;
- разработка математической модели тепловой инерционности разветвленной системы централизованного теплоснабжения на основе решения последовательности рекуррентных соотношений дифференциальных уравнений первого порядка;
- экспериментальная верификация математической модели тепловой инерционности разветвленной системы централизованного теплоснабжения на основе решения последовательности рекуррентных соотношений дифференциальных уравнений первого порядка.

1 Аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках НИР

Проблема математического обеспечения для построения суточных графиков отпуска тепловой энергии в системах централизованного теплоснабжения (СЦТ) в западных странах рассматривалась незначительно, поскольку до последнего времени данные системы у них не находили широкого распространения. Значительное количество работ отечественных авторов посвящены построению сезонных графиков отпуска теплоты в СЦТ. К ведущим авторам в данной отрасли следует отнести Соколова Е.Я., который теоретически обосновал методики формирования графиков отпуска тепловой энергии. Современное состояние СЦТ характеризуется значительной неравномерностью суточного потребления. Это вызвано резким снижением промышленного потребления, повышением комфортности строящегося жилья (повышение доли горячего водоснабжения), увеличением доли потребителей, оборудованных сложными системами автоматического регулирования и повсеместным внедрением коммерческого учета тепловой энергии (в связи с изменением нормативной базы). Неравномерность суточных потреблений тепловой энергии в СЦТ требует внедрения регулирования в течение суток – суточного регулирования. Проблема формирования суточных графиков отпуска тепловой энергии связана с отсутствием готовых алгоритмов их построения. Данные алгоритмы должны отражать тепловую инерционность тепловых сетей с учетом их теплофизических свойств, разветвленности и гидравлических режимов. Кроме того, данные математические модели должны учитывать теплоаккумулирующие свойства потребителей тепловой энергии.

В общем виде модели тепловой инерционности тепловых сетей решены

К таким задачам можно отнести: модели термодинамического анализа [1-7], модели теплоэнергетических систем [8-12], модели горения [13-18], модели локальных теплообменных систем (например, солнечных коллекторов [19-24]) и др.

В настоящее время системы однородных и неоднородных дифференциальных уравнений являются одним из основных инструментов математического моделирования физических процессов [10]. В [11] рассматривается система однородных дифференциальных уравнений для управления адсорбционными чиллерами. Решение рассматривается градиентными шагами и не представлено в виде прямой аналитической зависимости. Richard Kicsiny в ряде последних работ [10, 12] рассматривает современные математические модели систем отопления с трубами на основе дифференциальных уравнений закона Ньютона для остывания трубы. Достаточно распространенной задачей для повышения эффективности городских тепловых сетей является построение их динамических моделей. В их основе, как правило, заложены системы дифференциальных уравнений, и их решение сводится либо к численным решениям [25, 26], либо к значительному упрощению модели и рассмотрению ее через одно - два уравнения для средних параметров решаемые по известным зависимостям [27].

Системы однородных и неоднородных дифференциальных лежат в основе теории описывающей процессы горения. Например, при построении надежных математических моделей газификации частиц твердого топлива составляются системы дифференциальных уравнений, содержащие сотни уравнений [28]. Как правило, данные системы приводятся методом конечных разностей к обыкновенным уравнениям, что приводит к относительной потере точности и отсутствию прямых аналитических решений [15].

Рост использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в мире сформировал отдельное направление теории математического моделирования моделирование работы солнечных коллекторов. Как правило,

их моделирование сводится к решению систем и отдельных дифференциальных уравнений. В работе [25] улучшен метод многократной линейной регрессии для решения дифференциальных уравнений моделирующих солнечный коллектор. В статье [19] представлено численное и экспериментальное исследование плоского солнечного коллектора. При этом гидродинамика и теплообмен в панели коллектора определяются посредством преобразования дифференциальных уравнений методом конечных разностей. В статье [29] описывается математическая модель для моделирования переходных процессов, возникающих в нагреваемой жидкости плоского коллектора. Модель основана на решении системы связанных дифференциальных уравнений, описывающих тепловые процессы остекления, воздушного зазора, жидкости и т.д. Система дифференциальных уравнений решается итерационно в программе MATLAB. К численному решению систем дифференциальных уравнений в данной системе [30] и ей подобным сводится большинство задач моделирования. Примером таких исследований могут служить проекты по моделированию (на основе численных решений) гибридных солнечных фотоэлектрическо-тепловых систем [31-33]. Основным недостатком данных численных решений является отсутствие возможности использовать их в более сложных моделях.

К основным недостаткам известных подходов при решении систем и отдельных дифференциальных уравнений в прикладных задачах математического моделирования физических процессов можно отнести численные методы, которые имеют ограниченную точность решения и высокие требования к вычислительным средствам их осуществляющим для многомерных систем, а также ограничение возможности использования полученных решений в более сложных моделях. Для исключения этих недостатков необходимо получение прямого аналитического решения.

2 Получение решения последовательности рекуррентных соотношений дифференциальных уравнений первого порядка

2.1 Получение последовательности рекуррентно связанных соотношений

Частное решение системы (1), как правило, обусловлено последовательностью начальных распределений параметра y_1, \dots, y_N при $x = 0$:

$$\begin{cases} y_1 = y_1^H; \\ y_2 = y_2^H; \\ y_3 = y_3^H; \\ \dots\dots\dots \\ y_N = y_N^H. \end{cases} \quad (2)$$

Решением системы дифференциальных уравнений (1) является система рекуррентно связанных интегральных решений:

$$\begin{cases} y_1 = e^{A_1 \cdot x} \cdot \left[C_1 + \int e^{-A_1 \cdot x} \cdot (\alpha_1 \cdot y_0 + \beta_1) \cdot dx \right] \\ y_2 = e^{A_2 \cdot x} \cdot \left[C_2 + \int e^{-A_2 \cdot x} \cdot (\alpha_2 \cdot y_1 + \beta_2) \cdot dx \right] \\ y_3 = e^{A_3 \cdot x} \cdot \left[C_3 + \int e^{-A_3 \cdot x} \cdot (\alpha_3 \cdot y_2 + \beta_3) \cdot dx \right] \\ \dots\dots\dots \\ y_{(N-1)} = e^{A_{(N-1)} \cdot x} \cdot \left[C_{(N-1)} + \int e^{-A_{(N-1)} \cdot x} \cdot (\alpha_{(N-1)} \cdot y_{(N-2)} + \beta_{(N-1)}) \cdot dx \right]; \\ y_N = e^{A_N \cdot x} \cdot \left[C_N + \int e^{-A_N \cdot x} \cdot (\alpha_N \cdot y_{(N-1)} + \beta_N) \cdot dx \right] \end{cases} \quad (3)$$

где

C_1, \dots, C_N – константы интегрирования.

Подставляя значения начальных распределений параметра y_1, \dots, y_N при $x = 0$ (2) получаем значения констант интегрирования C_1, \dots, C_N :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 = y_1^H - \int_{x=0}^{-A_1 \cdot x} e^{-A_1 \cdot x} \cdot (\alpha_1 \cdot y_0 + \beta_1) \cdot dx \quad ; \\ C_2 = y_2^H - \int_{x=0}^{-A_2 \cdot x} e^{-A_2 \cdot x} \cdot (\alpha_2 \cdot y_1 + \beta_2) \cdot dx \quad ; \\ C_3 = y_3^H - \int_{x=0}^{-A_3 \cdot x} e^{-A_3 \cdot x} \cdot (\alpha_3 \cdot y_2 + \beta_3) \cdot dx \quad ; \\ \dots \\ C_{(N-1)} = y_{(N-1)}^H - \int_{x=0}^{-A_{(N-1)} \cdot x} e^{-A_{(N-1)} \cdot x} \cdot (\alpha_{(N-1)} \cdot y_{(N-2)} + \beta_{(N-1)}) \cdot dx \quad ; \\ C_N = y_N^H - \int_{x=0}^{-A_N \cdot x} e^{-A_N \cdot x} \cdot (\alpha_N \cdot y_{(N-1)} + \beta_N) \cdot dx \quad . \end{array} \right. \quad (4)$$

Подставляя выражения (4) в уравнения (3) получаем последовательность рекуррентных соотношений:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1 = e^{A_1 \cdot x} \cdot \left[y_1^H - \int_{x=0}^{-A_1 \cdot x} e^{-A_1 \cdot x} \cdot (\alpha_1 \cdot y_0 + \beta_1) \cdot dx + \int e^{-A_1 \cdot x} \cdot (\alpha_1 \cdot y_0 + \beta_1) \cdot dx \right]; \\ y_2 = e^{A_2 \cdot x} \cdot \left[y_2^H - \int_{x=0}^{-A_2 \cdot x} e^{-A_2 \cdot x} \cdot (\alpha_2 \cdot y_1 + \beta_2) \cdot dx + \int e^{-A_2 \cdot x} \cdot (\alpha_2 \cdot y_1 + \beta_2) \cdot dx \right]; \\ y_3 = e^{A_3 \cdot x} \cdot \left[y_3^H - \int_{x=0}^{-A_3 \cdot x} e^{-A_3 \cdot x} \cdot (\alpha_3 \cdot y_2 + \beta_3) \cdot dx + \int e^{-A_3 \cdot x} \cdot (\alpha_3 \cdot y_2 + \beta_3) \cdot dx \right]; \\ \dots \\ y_{(N-1)} = e^{A_{(N-1)} \cdot x} \cdot \left[y_{(N-1)}^H - \int_{x=0}^{-A_{(N-1)} \cdot x} e^{-A_{(N-1)} \cdot x} \cdot (\alpha_{(N-1)} \cdot y_{(N-2)} + \beta_{(N-1)}) \cdot dx + \int e^{-A_{(N-1)} \cdot x} \cdot (\alpha_{(N-1)} \cdot y_{(N-2)} + \beta_{(N-1)}) \cdot dx \right]; \\ y_N = e^{A_N \cdot x} \cdot \left[y_N^H - \int_{x=0}^{-A_N \cdot x} e^{-A_N \cdot x} \cdot (\alpha_N \cdot y_{(N-1)} + \beta_N) \cdot dx + \int e^{-A_N \cdot x} \cdot (\alpha_N \cdot y_{(N-1)} + \beta_N) \cdot dx \right]. \end{array} \right. \quad (5)$$

2.2 Выявление общей закономерности решений

Для выявления общей закономерности запишем первые три решения:

$$y_1 = e^{A_1 \cdot x} \cdot \left[y_1^H - \frac{1}{0 - A_1} \cdot (\alpha_1 \cdot y_0 + \beta_1) \right] + \frac{1}{0 - A_1} \cdot (\alpha_1 \cdot y_0 + \beta_1); \quad (6)$$

$$y_2 = e^{A_2 \cdot x} \cdot \left[y_2^H - \left\{ \begin{aligned} &\frac{1}{A_1 - A_2} \cdot \left(\alpha_2 \cdot y_1^H - \alpha_2 \cdot \frac{1}{0 - A_1} \cdot (\alpha_1 \cdot y_0 + \beta_1) \right) + \\ &+ \frac{1}{0 - A_2} \cdot \left(\alpha_2 \cdot \frac{1}{0 - A_1} \cdot (\alpha_1 \cdot y_0 + \beta_1) + \beta_2 \right) \end{aligned} \right\} + \right] + e^{A_1 \cdot x} \cdot \left[\frac{1}{A_1 - A_2} \cdot \left(\alpha_2 \cdot y_1^H - \alpha_2 \cdot \frac{1}{0 - A_1} \cdot (\alpha_1 \cdot y_0 + \beta_1) \right) \right] + e^{0 \cdot x} \cdot \left[\frac{1}{0 - A_2} \cdot \left(\alpha_2 \cdot \frac{1}{0 - A_1} \cdot (\alpha_1 \cdot y_0 + \beta_1) + \beta_2 \right) \right]; \quad (7)$$

$$y_3 = e^{A_3 \cdot x} \cdot \left[y_3^H - \left\{ \begin{aligned} &\frac{1}{A_2 - A_3} \cdot \alpha_3 \cdot \left(y_2^H - \left(\frac{1}{A_1 - A_2} \cdot \alpha_2 \cdot \left(y_1^H - \frac{1}{0 - A_1} \cdot (\alpha_1 \cdot y_0 + \beta_1) \right) + \right. \right. \right. \\ &\left. \left. \left. + \frac{1}{0 - A_2} \cdot \left(\alpha_2 \cdot \frac{1}{0 - A_1} \cdot (\alpha_1 \cdot y_0 + \beta_1) + \beta_2 \right) \right) \right) \right\} + \right. \\ &\left. + \frac{1}{A_1 - A_3} \cdot \alpha_3 \cdot \frac{1}{A_1 - A_2} \cdot \left(\alpha_2 \cdot y_1^H - \alpha_2 \cdot \frac{1}{0 - A_1} \cdot (\alpha_1 \cdot y_0 + \beta_1) \right) + \right. \\ &\left. + \frac{1}{0 - A_3} \cdot \left[\alpha_3 \cdot \frac{1}{0 - A_2} \cdot \left(\alpha_2 \cdot \frac{1}{0 - A_1} \cdot (\alpha_1 \cdot y_0 + \beta_1) + \beta_2 \right) + \beta_3 \right] \right] + e^{A_2 \cdot x} \cdot \left[\frac{1}{A_2 - A_3} \cdot \alpha_3 \cdot \left(y_2^H - \left(\frac{1}{A_1 - A_2} \cdot \alpha_2 \cdot \left(y_1^H - \frac{1}{0 - A_1} \cdot (\alpha_1 \cdot y_0 + \beta_1) \right) + \right. \right. \right. \\ &\left. \left. \left. + \frac{1}{0 - A_2} \cdot \left(\alpha_2 \cdot \frac{1}{0 - A_1} \cdot (\alpha_1 \cdot y_0 + \beta_1) + \beta_2 \right) \right) \right) \right] + e^{A_1 \cdot x} \cdot \left[\frac{1}{A_1 - A_3} \cdot \alpha_3 \cdot \frac{1}{A_1 - A_2} \cdot e^{A_1 \cdot x} \cdot \left(\alpha_2 \cdot y_1^H - \alpha_2 \cdot \frac{1}{0 - A_1} \cdot (\alpha_1 \cdot y_0 + \beta_1) \right) \right] + e^{0 \cdot x} \cdot \frac{1}{0 - A_3} \cdot \left[\alpha_3 \cdot \frac{1}{0 - A_2} \cdot \left(\alpha_2 \cdot \frac{1}{0 - A_1} \cdot (\alpha_1 \cdot y_0 + \beta_1) + \beta_2 \right) + \beta_3 \right]. \quad (8)$$

Представление в ступенчатой форме (рис. 2) наглядно интерпретирует возможную методику нахождения γ_S^P . Обозначим ψ_S^P сумму произведений крайних левых множителей:

$$\psi_S^P = \frac{1}{A_{(P-1)} - A_P} \cdot \alpha_P \cdot \sum_{S=0}^{P-1} \gamma_S^{P-1}, \quad (10)$$

где:

P – номер слоя, $P = 0, \dots, N$;

S – номер столбца, $S = 0, \dots, N-1$.

Тогда γ_S^P могут быть найдены как:

$$\gamma_S^{P=N} = \psi^{P=S+1} \cdot \prod_{R=(S+1)+1}^N \left[\frac{1}{A_S - A_R} \cdot \alpha_R \right]. \quad (11)$$

В (11) неизвестны ψ_S^P . Их нахождение сводится к определению суммы произведений весов древовидного графа (рис. 2) на соответствующем слое.

Запишем значение ψ_S^P для нескольких слоев:

$$\psi_0^1 = \frac{1}{0 - A_1} \cdot \alpha_1; \quad (12)$$

$$\psi_1^2 = \frac{1}{0 - A_1} \cdot \alpha_1 \cdot \frac{1}{A_1 - A_2} \cdot \alpha_2; \quad (13)$$

$$\psi_2^3 = \left[\frac{1}{0 - A_1} \cdot \alpha_1 \cdot \frac{1}{A_1 - A_2} \cdot \alpha_2 + \frac{1}{0 - A_1} \cdot \alpha_1 \cdot \frac{1}{0 - A_2} \cdot \alpha_2 \right] \cdot \frac{1}{A_2 - A_3} \cdot \alpha_3; \quad (14)$$

$$\psi_3^4 = \frac{1}{A_3 - A_4} \cdot \alpha_4 \cdot \left[\begin{aligned} & \frac{1}{0 - A_1} \cdot \alpha_1 \cdot \frac{1}{A_1 - A_2} \cdot \alpha_2 \cdot \frac{1}{A_2 - A_3} \cdot \alpha_3 + \\ & + \frac{1}{0 - A_1} \cdot \alpha_1 \cdot \frac{1}{A_1 - A_2} \cdot \alpha_2 \cdot \frac{1}{A_1 - A_3} \cdot \alpha_3 + \\ & + \frac{1}{0 - A_1} \cdot \alpha_1 \cdot \frac{1}{0 - A_2} \cdot \alpha_2 \cdot \frac{1}{A_2 - A_3} \cdot \alpha_3 + \\ & + \frac{1}{0 - A_1} \cdot \alpha_1 \cdot \frac{1}{0 - A_2} \cdot \alpha_2 \cdot \frac{1}{0 - A_3} \cdot \alpha_3 \end{aligned} \right]. \quad (15)$$

В общем виде сумма произведений весов древовидного графа на соответствующем слое может быть найдена:

$P=1$:

$$\psi_0^1 = \prod_{i=1}^P \left[\frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_i \right], \quad (16)$$

где $A_0=0$.

$P=2$:

$$\psi_1^2 = \left\{ \begin{aligned} & \prod_{i=1}^P \left[\frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_i \right] + \\ & + \sum_{j=1}^{P-1} \left(\prod_{i=1}^j \left[\frac{1}{A_{j-1} - A_i} \cdot \alpha_{i_1} \right] \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^P \left[\frac{1}{A_{i_2-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \right) \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

$P=3$:

$$\psi_2^3 = \left\{ \begin{aligned} & \prod_{i=1}^P \left[\frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_i \right] + \\ & + \sum_{j=1}^{P-1} \left(\prod_{i_1=1}^j \left[\frac{1}{A_{j-1} - A_{i_1}} \cdot \alpha_{i_1} \right] \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^P \left[\frac{1}{A_{i_2-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \right) + \\ & + \sum_{j_1=1}^{P-2} \sum_{j_2=j_1+1}^{P-1} \left(\prod_{i_1=1}^{j_1} \left[\frac{1}{A_{j_1-1} - A_{i_1}} \cdot \alpha_{i_1} \right] \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^{j_2} \left[\frac{1}{A_{i_2-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \cdot \prod_{i_3=i_2+1}^P \left[\frac{1}{A_{j_2-1} - A_{i_3}} \cdot \alpha_{i_3} \right] \right) \end{aligned} \right\}. \quad (18)$$

$P=4$:

$$\psi_3^4 = \left\{ \begin{aligned} & \prod_{i=1}^P \left[\frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_i \right] + \\ & + \sum_{j=1}^{P-1} \left(\prod_{i_1=1}^j \left[\frac{1}{A_{j-1} - A_{i_1}} \cdot \alpha_{i_1} \right] \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^P \left[\frac{1}{A_{i_2-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \right) + \\ & + \sum_{j_1=1}^{P-2} \sum_{j_2=j_1+1}^{P-1} \left(\prod_{i_1=1}^{j_1} \left[\frac{1}{A_{j_1-1} - A_{i_1}} \cdot \alpha_{i_1} \right] \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^{j_2} \left[\frac{1}{A_{i_2-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \cdot \prod_{i_3=i_2+1}^P \left[\frac{1}{A_{j_2-1} - A_{i_3}} \cdot \alpha_{i_3} \right] \right) + \\ & + \sum_{j_1=1}^{P-3} \sum_{j_2=j_1+1}^{P-2} \sum_{j_3=j_2+1}^{P-1} \left(\prod_{i_1=1}^{j_1} \left[\frac{1}{A_{j_1-1} - A_{i_1}} \cdot \alpha_{i_1} \right] \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^{j_2} \left[\frac{1}{A_{i_2-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \cdot \right. \\ & \left. \cdot \prod_{i_3=i_2+1}^{j_3} \left[\frac{1}{A_{j_2-1} - A_{i_3}} \cdot \alpha_{i_3} \right] \cdot \prod_{i_4=i_3+1}^P \left[\frac{1}{A_{i_4-1} - A_{i_4}} \cdot \alpha_{i_4} \right] \right) \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

Тогда обобщая для $P=N$ получаем:

$$\left. \begin{aligned}
& \prod_{i=1}^N \left[\frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_i \right] + \\
& + \sum_{j=1}^{N-1} \left(\prod_{i=1}^j \left[\frac{1}{A_{j-1} - A_i} \cdot \alpha_i \right] \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^N \left[\frac{1}{A_{i_2-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \right) + \\
& + \sum_{j_1=1}^{N-2} \sum_{j_2=j_1+1}^{N-1} \left(\prod_{i=1}^{j_1} \left[\frac{1}{A_{j_1-1} - A_i} \cdot \alpha_i \right] \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^{j_2} \left[\frac{1}{A_{i_2-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \cdot \prod_{i_3=i_2+1}^N \left[\frac{1}{A_{i_3-1} - A_{i_3}} \cdot \alpha_{i_3} \right] \right) + \\
& \dots \\
& + \sum_{j_1=1}^{N-(N-1)} \sum_{j_2=j_1+1}^{N-(N-2)} \dots \left(\prod_{i=1}^{j_1} \left[\frac{1}{A_{j_1-1} - A_i} \cdot \alpha_i \right] \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^{j_2} \left[\frac{1}{A_{i_2-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \cdot \right. \\
& \left. \prod_{i_{(N-1)}=i_{(N-2)}+1}^{j_{(N-1)}} \left[\frac{1}{A_{i_{(N-2)}-1} - A_{i_{(N-1)}}} \cdot \alpha_{i_{(N-1)}} \right] \cdot \right. \\
& \left. \prod_{i_N=i_{(N-1)}+1}^N \left[\frac{1}{A_{i_N-1} - A_{i_N}} \cdot \alpha_{i_N} \right] \right)
\end{aligned} \right\} N. \quad (20)$$

2.4 Получение решения с учетом составляющих начальных и установившихся состояний

Для определения общего вида решения (9) для слоя $- N$, разделяем γ_s^N на три составляющих:

$$\gamma_s^N = \gamma_s^N(y_0) + \gamma_s^N(y^H) + \gamma_s^N(\beta). \quad (21)$$

Поскольку при нахождение $\gamma_s^N(\beta)$ на каждом слое дерева графов вводится дополнительный β_i , то необходимо ввести обозначение для суммы произведений весов древовидного графа на соответствующем слое не с первого слоя, а с заданного:

$\psi_{P=1}^{P=R}$ – сумма произведений весов древовидного графа на соответствующем слое $P=R$, начиная с первого $P=1$ (определен в общем виде (20));

$\prod_{P=R_1}^{P=R_2}$ – сумма произведений весов древовидного графа на соответствующем слое $P = R_2$, начиная с заданного $P = R_1$.

Значение суммы произведений весов древовидного графа на соответствующем слое $P = N$, начиная с заданного $P = R_1$, может быть определено:

$$\Psi_n^{P=N, P=R_1} = \left\{ \begin{array}{l} \prod_{i=R_1}^N \left[\frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_i \right] + \\ + \sum_{j=R_1}^{N-1} \left(\prod_{i=R_1}^j \left[\frac{1}{A_{j-1} - A_i} \cdot \alpha_j \right] \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^N \left[\frac{1}{A_{i_2-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \right) + \\ + \sum_{j_1=R_1}^{N-2} \sum_{j_2=j_1+1}^{N-1} \left(\prod_{i=R_1}^{j_1} \left[\frac{1}{A_{j_1-1} - A_i} \cdot \alpha_{i_1} \right] \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^{j_2} \left[\frac{1}{A_{i_2-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \cdot \prod_{i_3=i_2+1}^N \left[\frac{1}{A_{j_2-1} - A_{i_3}} \cdot \alpha_{i_3} \right] \right) + \\ \dots \\ + \sum_{j_1=R_1}^{N-(N-1)} \sum_{j_2=j_1+1}^{N-(N-2)} \dots \left(\prod_{i=R_1}^{j_1} \left[\frac{1}{A_{j_1-1} - A_i} \cdot \alpha_{i_1} \right] \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^{j_2} \left[\frac{1}{A_{i_2-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \cdot \right. \\ \left. \prod_{i_{(N-1)}=i_{(N-2)}+1}^{j_{(N-1)}} \left[\frac{1}{A_{i_{(N-2)}-1} - A_{i_{(N-1)}}} \cdot \alpha_{i_{(N-1)}} \right] \cdot \right. \\ \left. \prod_{i_N=i_{(N-1)}+1}^N \left[\frac{1}{A_{i_N-1} - A_{i_N}} \cdot \alpha_{i_N} \right] \right) \end{array} \right\}^{N-R_1} \quad (22)$$

Для определения $\gamma_S^N(y^H)$ необходимо ввести определение суммы произведений весов древовидного графа на соответствующем слое «справа» или «слева».

$\Psi_n^{P=N, P=R_1}$ «справа» определяется по формуле (20) и отличается от «слева», видом первых произведений.

Понятие «справа» определяется на древовидном графе в ступенчатой форме (рис. 2)

$\prod_{i=R_1}^N \left[\frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_i \right] = \prod_{i=R_1}^N \left[\frac{1}{0 - A_i} \cdot \alpha_i \right]$ находятся справа. Для определение суммы произведений весов древовидного графа на соответствующем слое «слева», произведем замену формы первых произведений:

$$\psi_{\mathcal{L}} = \left\{ \begin{array}{l} \prod_{i=1}^N \left[\frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_i \right] + \\ + \sum_{j=1}^{N-1} \left(\prod_{i=1}^j \left[\frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_{i_1} \right] \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^N \left[\frac{1}{A_{i_2-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \right) + \\ + \sum_{j_1=1}^{N-2} \sum_{j_2=j_1+1}^{N-1} \left(\prod_{i=1}^{j_1} \left[\frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_{i_1} \right] \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^{j_2} \left[\frac{1}{A_{i_2-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \cdot \prod_{i_3=i_2+1}^N \left[\frac{1}{A_{i_3-1} - A_{i_3}} \cdot \alpha_{i_3} \right] \right) + \\ \dots \\ + \sum_{j_1=1}^{N-(N-1)} \sum_{j_2=j_1+1}^{N-(N-2)} \dots \dots \dots \\ + \underbrace{\sum_{j_{(N-3)}=j_{(N-3)}+1}^{N-3} \sum_{j_{(N-2)}=j_{(N-3)}+1}^{N-2} \sum_{j_{(N-1)}=j_{(N-2)}+1}^{N-1}}_{N-1} \left(\prod_{i=1}^{j_1} \left[\frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_{i_1} \right] \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^{j_2} \left[\frac{1}{A_{i_2-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \cdot \dots \right. \\ \left. \cdot \prod_{i_{(N-1)}=i_{(N-2)}+1}^{j_{(N-1)}} \left[\frac{1}{A_{j_{(N-1)}-1} - A_{i_{(N-1)}}} \cdot \alpha_{i_{(N-1)}} \right] \cdot \dots \right. \\ \left. \cdot \prod_{i_N=i_{(N-1)}+1}^N \left[\frac{1}{A_{i_{(N-1)}-1} - A_{i_N}} \cdot \alpha_{i_N} \right] \right) \end{array} \right\} N. \quad (23)$$

Частные решения уравнения (1) представленные в (3) характеризуются частично попеременной сменой знаков. Древоподобный граф последовательных произведений при y_0 , с учетом смены знаков представлен на рис. 3.

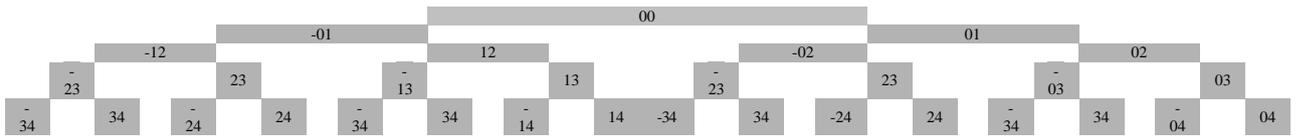


Рисунок 3 - Древоподобный граф в стандартной форме, с учетом распределения знаков

Для последующего изложения введем следующее обозначение:

$$\prod_{i=n}^N [F(i)] = \begin{cases} f(i), & \text{при } N = n; \\ f(i) \cdot \prod_{i=n+1}^N [F(i)], & \text{при } N > n. \end{cases} \quad (24)$$

Тогда сумма произведений весов древовидного графа (рис. 3) на соответствующем слое, с учетом смены знака и условия обхода «слева» равно:

$$\begin{aligned}
 \psi_{\mathcal{L}}^{P=N} = & \left(\prod_{i=0}^N \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_i \right] + \right. \\
 & + \sum_{j=0}^{N-1} \left(\prod_{i=0}^j \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_{i_1} \right] \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^N \left[\frac{1}{A_{i_1-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \right) + \\
 & + \sum_{j_1=0}^{N-2} \sum_{j_2=j_1+1}^{N-1} \left(\prod_{i=0}^{j_1} \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_{i_1} \right] \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^{j_2} \left[\frac{1}{A_{i_1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \cdot \right. \\
 & \left. \cdot \prod_{i_3=i_2+1}^N \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i_1} - A_{i_3}} \cdot \alpha_{i_3} \right] \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i_3-1} - A_{i_3}} \cdot \alpha_{i_3} \right] \right) + \\
 & \dots \\
 & + \sum_{j_1=0}^{N-(N-1)} \sum_{j_2=j_1+1}^{N-(N-2)} \dots \\
 & + \underbrace{\sum_{j_{(N-3)}=j_{(N-3)}+1}^{N-3} \sum_{j_{(N-2)}=j_{(N-3)}+1}^{N-2} \sum_{j_{(N-1)}=j_{(N-2)}+1}^{N-1}}_{N-1} \left(\prod_{i=0}^{j_1} \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_{i_1} \right] \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^{j_2} \left[\frac{1}{A_{i_1-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \cdot \right. \\
 & \dots \\
 & \left. \cdot \prod_{i_{(N-1)}=i_{(N-2)}+1}^{j_{(N-1)}} \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i_{(N-2)}} - A_{i_{(N-1)}}} \cdot \alpha_{i_{(N-1)}} \right] \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{j_{(N-1)}-1} - A_{i_{(N-1)}}} \cdot \alpha_{i_{(N-1)}} \right] \cdot \right. \\
 & \left. \cdot \prod_{i_N=i_{(N-1)}+1}^N \left[\frac{1}{A_{i_{(N-1)}-1} - A_{i_N}} \cdot \alpha_{i_N} \right] \right) \quad (25)
 \end{aligned}$$

С учетом (25) сумма произведений весов древовидного графа (рис. 3) на соответствующем слое, с учетом смены знака и условия обхода «справа» равно:

$$\begin{aligned}
& \left. \begin{aligned}
& \prod_{i=R_1-1}^N \left[\frac{1}{A_{1-1} - A_i} \cdot \alpha_i \right] + \\
& + \sum_{j=R_1-1}^{N-1} \left(\prod_{i=R_1-1}^j \left[\frac{1}{A_{1-1} - A_i} \cdot \alpha_i \right] \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^N \left[\frac{(-1)^{\frac{1}{A_{1-1}-A_{i_2}}}} \right] \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i_2-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \right) + \\
& + \sum_{j_1=R_1-1}^{N-2} \sum_{j_2=j_1+1}^{N-1} \left(\prod_{i_1=R_1-1}^{j_1} \left[\frac{1}{A_{1-1} - A_{i_1}} \cdot \alpha_{i_1} \right] \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^{j_2} \left[\frac{(-1)^{\frac{1}{A_{1-1}-A_{i_2}}}} \right] \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i_2-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \cdot \right. \\
& \left. \cdot \prod_{i_3=i_2+1}^N \left[\frac{1}{A_{i_2} - A_{i_3}} \cdot \alpha_{i_3} \right] \right) + \\
& \dots \\
& \left. \begin{aligned}
& \prod_{i=R_1-1}^{j_1} \left[\frac{1}{A_{1-1} - A_i} \cdot \alpha_i \right] \cdot \\
& \cdot \prod_{i_2=i_1+1}^{j_2} \left[\frac{(-1)^{\frac{1}{A_{1-1}-A_{i_2}}}} \right] \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i_2-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \cdot \\
& \dots \\
& \cdot \prod_{i_{(N-1)}=i_{(N-2)}+1}^{j_{(N-1)}} \left[\frac{(-1)^{\frac{1}{A_{i_{(N-1-2)}} - A_{i_{(N-1)}}}}}{\alpha_{i_{(N-1)}}} \right] \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{j_{(N-1)}-1} - A_{i_{(N-1)}}} \cdot \alpha_{i_{(N-1)}} \right] \cdot \\
& \cdot \prod_{i_N=i_{(N-1)}+1}^N \left[\frac{1}{A_{i_{(N-1)}-1} - A_{i_N}} \cdot \alpha_{i_N} \right] \\
& \underbrace{\hspace{10em}}_{N-R_1}
\end{aligned} \right) \quad (27)
\end{aligned}
\right\} \psi_n^{P=N, P=R_1}
\end{aligned}$$

Условие смены знаков (рис. 3) определяет то, что в формулу для определения $\gamma_S^N(y_0)$ (9) входят $\psi_L^{S+1, P=0}$ как сумма, не всех произведений древовидного графа на соответствующем слое, а только с отрицательными знаками у последних множителей. Для учета этого введем дополнительные обозначения:

$\psi_L^{P=N, P=R_1} (-)$ – это произведений весов древовидного графа на

соответствующем слое $P = N$, начиная с заданного $P = R_1$, при учете знаков и условия обхода «слева», последние множители которых имеют знак $(-)$:

$$\begin{aligned}
& \left[\prod_{i=R_1-1}^N \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_{i_1} \right] + \right. \\
& \left. + \sum_{j_1=R_1-1}^{N-2} \sum_{j_2=j_1+1}^{N-1} \left(\prod_{i=R_1-1}^{j_1} \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_{i_1} \right] \cdot \prod_{i_2=j_1+1}^{j_2} \left[\frac{1}{A_{i_1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \cdot \right. \\
& \left. \left. \cdot \prod_{i_3=i_2+1}^N \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i_1} - A_{i_3}} \cdot \alpha_{i_3} \right] \right) \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i_3-1} - A_{i_3}} \cdot \alpha_{i_3} \right] \right] + \\
& \dots \\
& \left. + \sum_{j_1=R_1-1}^{N-(N-1)N-(N-2)} \dots \dots \dots \prod_{i=R_1-1}^{j_1} \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_{i_1} \right] \cdot \prod_{i_2=j_1+1}^{j_2} \left[\frac{1}{A_{i_1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \cdot \right. \\
& \left. + \underbrace{\sum_{j_{(N-3)}=j_{(N-3)}+1}^{N-3} \sum_{j_{(N-2)}=j_{(N-3)}+1}^{N-2} \sum_{j_{(N-1)}=j_{(N-2)}+1}^{N-1}}_{(N-1)-R_1} \cdot \prod_{i_{(N)}=i_{(N-1)}+1}^N \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i_{(N-2)}} - A_{i_{(N)}}} \cdot \alpha_{i_{(N)}} \right] \right] \cdot \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{j_{(N-1)}-1} - A_{i_{(N)}}} \cdot \alpha_{i_{(N)}} \right] \cdot \quad (28)
\end{aligned}$$

$\psi_{n, P=R_1}^{P=N}(-)$ – это произведений весов древовидного графа на

соответствующем слое $P = N$, начиная с заданного $P = R_1$, при учете знаков и условия обхода «справа», последние множители которых имеют знак (-):

$$\begin{aligned}
& \left[+ \sum_{j=R_1-1}^{N-1} \left(\prod_{i=R_1-1}^j \left[\frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_i \right] \cdot \prod_{i_2=i+1}^N \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i_1-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \right) \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i_2-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \right] + \\
& \left. + \sum_{j_1=R_1-1}^{N-3} \sum_{j_2=j_1+1}^{N-2} \sum_{j_3=j_2+1}^{N-1} \left(\prod_{i=R_1-1}^{j_1} \left[\frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_i \right] \cdot \prod_{i_2=j_1+1}^{j_2} \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i_1-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \right) \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i_2-1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \cdot \right. \\
& \left. \left(\prod_{i_3=j_2+1}^{j_3} \left[\frac{1}{A_{i_2} - A_{i_3}} \cdot \alpha_{i_3} \right] \cdot \prod_{i_4=j_3+1}^N \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i_3-1} - A_{i_4}} \cdot \alpha_{i_4} \right] \right) \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i_4-1} - A_{i_4}} \cdot \alpha_{i_4} \right] \right] + \\
& \dots \\
& \left. + \sum_{j_1=R_1-1}^{N-(N-1)N-(N-2)} \dots \dots \dots \prod_{i=R_1-1}^{j_1} \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i-1} - A_i} \cdot \alpha_{i_1} \right] \cdot \prod_{i_2=j_1+1}^{j_2} \left[\frac{1}{A_{i_1} - A_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \cdot \right. \\
& \left. + \underbrace{\sum_{j_{(N-3)}=j_{(N-3)}+1}^{N-3} \sum_{j_{(N-2)}=j_{(N-3)}+1}^{N-2} \sum_{j_{(N-1)}=j_{(N-2)}+1}^{N-1}}_{(N-1)-R_1} \cdot \prod_{i_{(N)}=i_{(N-1)}+1}^N \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{i_{(N-2)}} - A_{i_{(N)}}} \cdot \alpha_{i_{(N)}} \right] \right] \cdot \left[(-1) \cdot \frac{1}{A_{j_{(N-1)}-1} - A_{i_{(N)}}} \cdot \alpha_{i_{(N)}} \right] \cdot \quad (29)
\end{aligned}$$

Тогда, с учетом (9) и (28-29) составляющие γ_S^N могут быть определены:

$$\gamma_S^N(y_0) = y_0 \cdot \left(\psi_{L, P=0}^{S(-)} \cdot \prod_{R=S+1}^N \left[\frac{1}{A_S - A_R} \cdot \alpha_R \right] \right); \quad (30)$$

$$\gamma_S^N(\beta) = \sum_{I=1}^S \left[\frac{\beta_I}{\alpha_I} \cdot \psi_{n, P=I-1}^{S(-)} \cdot \prod_{R=S+1}^N \left(\frac{1}{A_S - A_R} \cdot \alpha_R \right) \right]; \quad (31)$$

$$\gamma_S^N(y^H) = \sum_{I=1}^S \left[y_I^H \cdot \psi_{L, P=I}^{S(-)} \cdot \prod_{R=S+1}^N \left(\frac{1}{A_S - A_R} \cdot \alpha_R \right) \right]. \quad (32)$$

С учетом (30-32) записываем решение исходной системы (1):

$$y_N = e^{A_N x} \cdot y_N^H + \sum_{S=0}^{N-1} \left[\left(e^{A_S x} - e^{A_N x} \right) \cdot \left(\gamma_S^N(y_0) + \gamma_S^N(y^H) + \gamma_S^N(\beta) \right) \right] \quad (33)$$

Необходимо отметить, что частным случаем, является значения составляющих γ_S^N при $S = 0$:

$$\gamma_0^N(y_0) = y_0 \cdot \prod_{I=1}^N \left(\frac{1}{A_0 - A_I} \cdot \alpha_I \right); \quad (34)$$

$$\gamma_0^N(\beta) = \sum_{I=1}^S \left[\frac{\beta_I}{\alpha_I} \cdot \prod_{R=I}^N \left(\frac{1}{A_0 - A_R} \cdot \alpha_R \right) \right]; \quad (35)$$

$$\gamma_0^N(y^H) = 0. \quad (36)$$

3 Разработка математической модели тепловой инерционности разветвленной системы централизованного теплоснабжения на основе решения последовательности рекуррентных соотношений дифференциальных уравнений первого порядка

Тепловой баланс потока сетевой воды на конце участка тепловых сетей при температурном возмущении на его начале можно записать в следующей форме:

$$V_1 \cdot c_p \cdot \rho_B \cdot dt_1 = -v_1 \cdot c_p \cdot \rho_B \cdot (t_1 - t_1^y) \cdot d\tau, \quad (37)$$

где: c_p – теплоёмкость сетевой воды, кДж/кг·°С;

ρ_B – плотность сетевой воды, кг/м³;

t_1 – температура воды на конце участка тепловых сетей в момент времени $d\tau$, °С;

t_1^y – температура воды на конце участка тепловых сетей в момент времени $\tau \rightarrow \infty$, °С;

V_1 – объём участка теплосети, м³;

v_1 – объёмный расход воды на участке, м³/с.

Теплопотери на рассматриваемом участке можно учесть записав уравнение баланса теплоты в установившемся режиме:

$$(t_0 - t_1^y) \cdot v_1 \cdot c_p \cdot \rho_B = K_1 \cdot \pi \cdot l_1 \cdot (1 + \mu_1) \cdot (\bar{t}_1^y - t_n), \quad (38)$$

где: t_0 – температурное возмущение в начале участка тепловых сетей, °С;

\bar{t}_1^y – средняя температура сетевой воды на участке тепловых сетей, °С;

v_1 – объёмный расход воды на участке, м³/с.

μ_1 – коэффициент местных потерь теплоты участка тепловых сетей;

$K_1 \cdot \pi$ – линейные потери теплоты;

l_1 – длина трубопровода участка тепловых сетей, м.

Решая уравнение (38) относительно t_1^y с учётом того, что $\bar{t}_1^y = \frac{t_1^y + t_0}{2}$,

получаем следующее:

$$t_1^y = t_0 \cdot \frac{2 - \varepsilon_{TC1}}{2 + \varepsilon_{TC1}} + 2 \cdot t_n \cdot \frac{\varepsilon_{TC1}}{2 + \varepsilon_{TC1}}, \quad (39)$$

где $\varepsilon_{TC1} = \frac{K_1 \cdot \pi \cdot l_1 \cdot (1 + \mu_1)}{v_1 \cdot c_p \cdot \rho_B}$ – безразмерный комплекс, характеризующий отношение потерь теплоты через тепловую изоляцию участка теплосети к потоку проходящему через неё.

С учётом (39) уравнение (37) можно записать так:

$$V_1 \cdot c_p \cdot \rho_B \cdot dt_1 = -v_1 \cdot c_p \cdot \rho_B \cdot \left(t_1 - t_0 \cdot \frac{2 - \varepsilon_{TC1}}{2 + \varepsilon_{TC1}} - 2 \cdot t_n \cdot \frac{\varepsilon_{TC1}}{2 + \varepsilon_{TC1}} \right) \cdot d\tau. \quad (40)$$

Или в форме однородного дифференциального уравнения первой степени

$$\begin{cases} q_1 \cdot t_1' = f_1 \cdot t_1 + \phi_1; \\ \phi_1 = - \left(t_0 \cdot \frac{2 - \varepsilon_{TC1}}{2 + \varepsilon_{TC1}} + 2 \cdot t_n \cdot \frac{\varepsilon_{TC1}}{2 + \varepsilon_{TC1}} \right); \\ f_1 = 1; \\ q_1 = -\frac{1}{\varphi_1}; \end{cases} \quad (41)$$

где: $\varphi_1 = \frac{v_1}{V_1}$ – относительный расход.

Решение уравнения (41) записывается в следующем виде:

$$t_1 = t_0 \cdot \frac{2 - \varepsilon_{TC1}}{2 + \varepsilon_{TC1}} \cdot \left(1 - e^{-\varphi_1 \cdot \tau} \right) + t_1^n \cdot e^{-\varphi_1 \cdot \tau} + 2 \cdot t_n \cdot \frac{\varepsilon_{TC1}}{2 + \varepsilon_{TC1}} \cdot \left(1 - e^{-\varphi_1 \cdot \tau} \right) \quad (42)$$

Для моделирования нестационарного теплового режима тепловых сетей с учетом их теплоаккумулирующих свойств и многовариантной конфигурации необходимо рассмотреть тепловой режим комплекса последовательных участков от источника теплоснабжения до конкретного потребителя. Рассмотрим решение данной задачи в приближенном виде, через усредненные параметры теплосети. Для этого необходимо получить решение в виде $t_{nTC} = f(t_0, \tau)$ уравнения

$$\sum_{i=1}^{n_{TC}} \frac{1}{\varphi_i} \cdot dt_{nTC} = - \left(t_{nTC} - t_{nTC}^y \right) \cdot d\tau. \quad (43)$$

Величина t_{nTC}^y может быть найдена из решения системы

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ БАЛАНСОВ:

$$\begin{cases} (t_0 - t_1^y) \cdot v_1 \cdot c_p \cdot \rho_B = K_1 \cdot \pi \cdot l_1 \cdot (1 + \mu_1) \cdot (t_1^y - t_n^y) \\ (t_1 - t_2^y) \cdot v_2 \cdot c_p \cdot \rho_B = K_2 \cdot \pi \cdot l_2 \cdot (1 + \mu_2) \cdot (t_2^y - t_n^y) \\ \dots \\ (t_{n_{TC}-1} - t_{n_{TC}}^y) \cdot v_{n_{TC}} \cdot c_p \cdot \rho_B = K_{n_{TC}} \cdot \pi \cdot l_{n_{TC}} \cdot (1 + \mu_{n_{TC}}) \cdot (t_{n_{TC}}^y - t_n^y) \end{cases} \quad (44)$$

Система (44) преобразуется с учётом перехода к безразмерному комплексу

$$\begin{cases} (t_0 - t_1^y) = \varepsilon_{TC(1)} \cdot (t_1^y - t_n^y) \\ (t_1 - t_2^y) = \varepsilon_{TC(2)} \cdot (t_2^y - t_n^y) \\ \dots \\ (t_{n_{TC}-1} - t_{n_{TC}}^y) = \varepsilon_{TC(n_{TC})} \cdot (t_{n_{TC}}^y - t_n^y) \end{cases} \quad (45)$$

Система (45) преобразуется в рекуррентное соотношение

$$\begin{cases} t_1^y = t_0 \cdot \frac{2 - \varepsilon_{TC(1)}}{2 + \varepsilon_{TC(1)}} + 2 \cdot t_n^y \cdot \frac{\varepsilon_{TC(1)}}{2 + \varepsilon_{TC(1)}}; \\ t_2^y = t_1^y \cdot \frac{2 - \varepsilon_{TC(2)}}{2 + \varepsilon_{TC(2)}} + 2 \cdot t_n^y \cdot \frac{\varepsilon_{TC(2)}}{2 + \varepsilon_{TC(2)}}; \\ \dots \\ t_{n_{TC}}^y = t_{n_{TC}-1}^y \cdot \frac{2 - \varepsilon_{TC(n_{TC})}}{2 + \varepsilon_{TC(n_{TC})}} + 2 \cdot t_n^y \cdot \frac{\varepsilon_{TC(n_{TC})}}{2 + \varepsilon_{TC(n_{TC})}}. \end{cases} \quad (46)$$

Решение соотношения (46) было получено в следующем виде:

$$\begin{aligned} t_{n_{TC}} = t_{n_{TC}}^n \cdot \exp\left(-\frac{1}{\sum_{i=1}^{n_{TC}} \frac{1}{\varphi_i}} \cdot \tau\right) + \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{\sum_{i=1}^{n_{TC}} \frac{1}{\varphi_i}} \cdot \tau\right)\right) \cdot \left(t_0 \cdot \prod_{i=1}^{n_{TC}} \left[\frac{2 - \varepsilon_{TC(i)}}{2 + \varepsilon_{TC(i)}}\right]\right) + \\ + \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{\sum_{i=1}^{n_{TC}} \frac{1}{\varphi_i}} \cdot \tau\right)\right) \cdot \left(2 \cdot t_n^y \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_{TC}-1} \prod_{j=i+1}^{n_{TC}} \left[\frac{2 - \varepsilon_{TC(j)}}{2 + \varepsilon_{TC(j)}} \cdot \frac{\varepsilon_{TC(i)}}{2 + \varepsilon_{TC(i)}}\right] + \frac{\varepsilon_{TC(n_{TC})}}{2 + \varepsilon_{TC(n_{TC})}}\right)\right). \end{aligned} \quad (47)$$

Точное решение задачи моделирования нестационарного теплового режима тепловых сетей с учётом их теплоаккумулирующих свойств и многовариантной конфигурации (необходимо рассмотреть тепловой режим комплекса последовательных участков от источника теплоснабжения до конкретного потребителя) может быть получено при решении рекуррентно связанной системы n_{TC} дифференциальных уравнений

$$\gamma_S^{n_{TC}}(t_0) = t_0 \cdot \left(\Psi_{\mathcal{L}}^{(-)} \cdot \prod_{R=S+1}^S \left[\frac{1}{A_S - A_R} \cdot \alpha_R \right] \right); \quad (55)$$

$$\gamma_S^{n_{TC}}(\beta) = \sum_{I=1}^S \left[\frac{\beta_I}{\alpha_I} \cdot \Psi_{\mathcal{L}}^{(-)} \cdot \prod_{R=S+1}^S \left(\frac{1}{A_S - A_R} \cdot \alpha_R \right) \right]; \quad (56)$$

$$\gamma_S^{n_{TC}}(t^H) = \sum_{I=1}^S \left[t_I^H \cdot \Psi_{\mathcal{L}}^{(-)} \cdot \prod_{R=S+1}^S \left(\frac{1}{A_S - A_R} \cdot \alpha_R \right) \right]; \quad (57)$$

при $S = 0$

$$\gamma_0^{n_{TC}}(t_0) = t_0 \cdot \prod_{I=1}^{n_{TC}} \left(\frac{1}{A_0 - A_I} \cdot \alpha_I \right); \quad (58)$$

$$\gamma_0^{n_{TC}}(\beta) = \sum_{I=1}^S \left[\frac{\beta_I}{\alpha_I} \cdot \prod_{R=I}^{n_{TC}} \left(\frac{1}{A_0 - A_R} \cdot \alpha_R \right) \right]; \quad (59)$$

$$\gamma_0^{n_{TC}}(t^H) = 0. \quad (60)$$

С учётом обозначения

$$\gamma_S^{n_{TC}} = \gamma_S^{n_{TC}}(t_0) + \gamma_S^{n_{TC}}(t^H) + \gamma_S^{n_{TC}}(\beta). \quad (61)$$

Общий вид решения системы (44) удобно представить как

$$t_{n_{TC}} = e^{A_{n_{TC}} \cdot \tau} \cdot t_{n_{TC}}^H + \sum_{S=0}^{n_{TC}-1} \left[\left(e^{A_S \cdot \tau} - e^{A_{n_{TC}} \cdot \tau} \right) \cdot \gamma_S^{n_{TC}} \right]. \quad (62)$$

Полученное решение очень удобно как для непосредственного использования, так и в более сложных математических моделях. В отличие от известных способов решения систем дифференциальных уравнений первого порядка, полученная прямая аналитическая зависимость (62) может быть использована в более сложных моделях. Общий вид решения легко интегрируется и дифференцируется.

4 Экспериментальная верификация математической модели тепловой инерционности разветвленной системы централизованного теплоснабжения

Экспериментальная верификация математической модели тепловой инерционности разветвленной системы централизованного теплоснабжения осуществлялась в рамках периодических испытаний на тепловые потери тепломагистралей пгт. Ясногорск Забайкальского края. Краткая характеристика объекта испытаний приведена в таблице 1.

Таблица 1

Наименование	Тепломагистраль	
	Подающий	Обратный
1	2	3
Схема тепловых сетей	Закрытая, тупиковая	Закрытая, тупиковая
Количество трубопроводов	1	1
Протяженность, км	2.881	2.881
Диаметр условный, мм	500.0; 400.0; 300.0	500.0; 400.0; 300.0
Тип прокладки трубопроводов на участке	надземная на низко- стоящих опорах и подземная в непроходных каналах	надземная на низко- стоящих опорах и подземная в непроходных каналах
Конструкция тепловой изоляции	минераловатные маты 1990	минераловатные маты 1990
Год прокладки	95 – 70	1990
Температурный график, °С	60	95 – 70
Спрявление на Г.В., °С	8520	60
Продолжительность работы трубопроводов в году, ч	с 15 августа по 24 августа	с 15 августа по 24 августа
Период (месяц) ремонта теплопроводов	с 25 августа по 14 августа	с 25 августа по 14 августа
Продолжительность отопительного сезона		

Для осуществления нагрева и циркуляции воды в трубопроводах тепломагистралей в составе теплоподготовительной установки имеется следующее оборудование (таблица 2-3). Измерение расхода сетевой воды в испытываемом контуре производится с помощью переносных расходомеров. Материальная характеристика теплопроводов приведена в таблице 4.

Таблица 2

Наименование оборудования	Количество, шт	Тип	Расход воды, т/ч	Поверхность нагрева, м ²
Основной подогреватель БО-1	1	ПСВ-315-3-23	1130	315

Таблица 3

Наименование оборудования	Кол-во, шт	Тип	Номинальная мощность, кВт	Расход, т/ч	Напор, м
СЭН-1, 2	2	модернизированный ЦН-400-210М (снято 2 колеса)	290	400	21
Подпитка деаэратором НПТС-1, 2	2	ДА-100	-	-	-
	2	К-45-55	15	45	5,5

Таблица 4

Наименование участка теплосети	Тип прокладки, конструкция изоляции	Диаметр трубопровода			Длина тр-да l, м	Мат. хар-ка dн*l, м ²	Площадь сечения f, м ²	Объём тр-да V, м ³
		условный	внутрен.	наружный				
		d _у , м	d _{вн} , м	d _н , м				
ГРЭС - ПНС	надземная; прошивные минераловатные маты; защ. слой - стеклоткань	0,500	0,510	0,530	1794,0	950,8	0,2043	366,48
ПНС - ТК-6	подземная; стекловата и минераловатные маты; стеклопластик	0,400	0,406	0,426	565,0	240,7	0,1297	73,29
ТК-6 - ТК-12		0,300	0,315	0,325	522,0	169,7	0,0779	40,68
Итого по надземной прокладке:					1794,0	950,8	---	366,5
Итого по подземной прокладке:					1087,0	410,3	---	114,0
Всего по испытанным участкам:633					2881,0	1361,2	---	480,5

Программа настоящих работ предусматривала выполнение следующих этапов:

- 1) проведение натурного обследования испытываемой тепломагистрали и теплоподготовительной установки;
- 2) разработка технической и рабочей программ испытаний (приложение Б и В);
- 3) подготовка и проведение испытаний на тепловые потери;
- 4) обработка и анализ результатов испытаний;
- 5) разработка рекомендаций по результатам испытаний.

Работа проведена в полном объеме в соответствии с технической и рабочей программами испытаний (см. приложение Б и В).

Краткая характеристика испытываемой сети и теплоподготовительной установки эксплуатации приведены в разделе 1 приложения Б.

4.1 Подготовка и проведение испытаний

На основании технической документации, предоставленной заказчиком и результатов натурного обследования теплоподготовительной установки и тепловой сети, была разработана техническая программа испытаний тепломагистрали на тепловые потери от источника теплоснабжения. Программа испытаний была принята к выполнению в срок до 10 августа 2017 года.

Проведенная в августе 2017 года проверка выполнения мероприятий, указанных в перечне подготовительных работ (раздел 2 приложения Б), показала готовность объекта к испытаниям.

Испытания на тепловые потери проведены в период с 15 по 17 сентября включительно, в полном объеме и в соответствии с технической и рабочей программами испытаний (см. приложение Б и В).

Параметры испытаний на всех этапах поддерживались на источнике возможно близкими к заданным величинам:

- температура в подающем теплопроводе:

по расчету – 87,04 °С;

по факту – 85,9 °С;

- расход в подающем теплопроводе:

по расчету – 53,87 т/ч;

по факту – 52,91 т/ч.

На заключительном этапе испытаний температура воды на выходе с ГРЭС повышалась в течение сорока минут на 15,0 °С. Прохождение «температурной волны» по испытываемому кольцу было зафиксировано в каждой контрольной точке.

Измерение расхода сетевой воды одновременно в подающем и обратном теплопроводах, а также подпитки теплосети с деаэратора, позволило определить и сравнить величину утечки из испытываемого кольца, которая составила в среднем 0,26 т/ч; разница прямого измерения и определения подпитки разницей расходов составила 0,05 т/ч.

Измерение расхода и температуры сетевой воды при испытаниях производилось средствами измерений, характеристика которых указана в приложении Б.

4.2 Обработка данных испытаний

Обработка данных испытаний проводилась в соответствии с Методическими указаниями [34, 35, 36].

По каждому наблюдательному пункту с учётом фактического пробега воды между точками наблюдений (табл. Г2), определённого методом «температурной волны», были усреднены значения температуры воды, полученные при 20 последовательных измерениях в основном периоде испытаний (с 20.00 ч. 16.08.17 г. по 20.00 ч. 17.08.17 г.).

Значения расходов сетевой воды в подающем и обратном теплопроводах испытываемого кольца усреднены по показаниям расходомеров.

Усреднённые температуры в начале и конце каждого периода испытываемого участка $t_{п}^H$, $t_{п}^K$, $t_{о}^H$, $t_{о}^K$, расходы сетевой воды приведены в таблице Г1.

Там же приведены результаты расчётов фактических потерь тепла по подающей и обратной линиям $Q_{п.и}$ и $Q_{о.и}$, среднегодовых потерь тепла $Q_{н.п.и}^{ср.г}$ и $Q_{н.о.и}^{ср.г}$ и отношений этих потерь тепла к нормативным $K_{п}$, $K_{о}$ для каждого участка испытанного кольца.

Определение среднегодовых тепловых потерь на испытанных участках сетей и отношение этих потерь тепла к нормативным проведено с погрешностью 4,3 %.

Определение погрешности вычисления показателей по результатам измерений производилось по формуле:

$$\delta = \delta Q_{н.и}^{ср.г} = \delta Q_{и} = \delta G_{п}^2 + \delta G_{о}^2 + \delta \Delta^2 t = 3,0^2 + 3,0^2 + 0,28^2 = 4,3 \%,$$

где δ – относительная погрешность вычисления, %;

$\delta Q_{н.и}^{ср.г}$ – относительная погрешность вычисления среднегодовых потерь, %;

$\delta Q_{и}$ – относительная погрешность вычисления тепловых потерь при испытаниях по результатам измерений расхода сетевой воды и температуры воды;

$\delta G_{п}$, $\delta G_{о}$ – относительная допускаемая погрешность измерения расходов сетевой воды.

Относительная погрешность измерения расхода воды определялась из характеристик прибора для измерения расхода.

Относительная погрешность измерения температуры воды определялась по формуле:

$$\delta \Delta t = 2 * (\delta t)^2 = 2 * (0,2)^2 = 0,28 \%,$$

где δt – относительная допускаемая погрешность при измерении температуры.

4.3 Сравнение данных испытаний и результатов расчетов по математической модели тепловой инерционности разветвленной системы централизованного теплоснабжения

Расчет тепловой инерционности и значений температуры сетевой воды в разветвленной системе централизованного теплоснабжения осуществлялось по модели (55-62) при разбиении тепловой сети на 1, 5, 10, 20 и 100 участков.

Сравнение данных испытаний и результатов расчетов (см. рис 4) показывают, что отклонение результатов расчетов по модели от фактических значений лежит в рамках погрешности измерения уже при разбиении на 20 участков для сети протяженностью 2881 м. Что говорит о высокой степени достоверности разработанной модели.

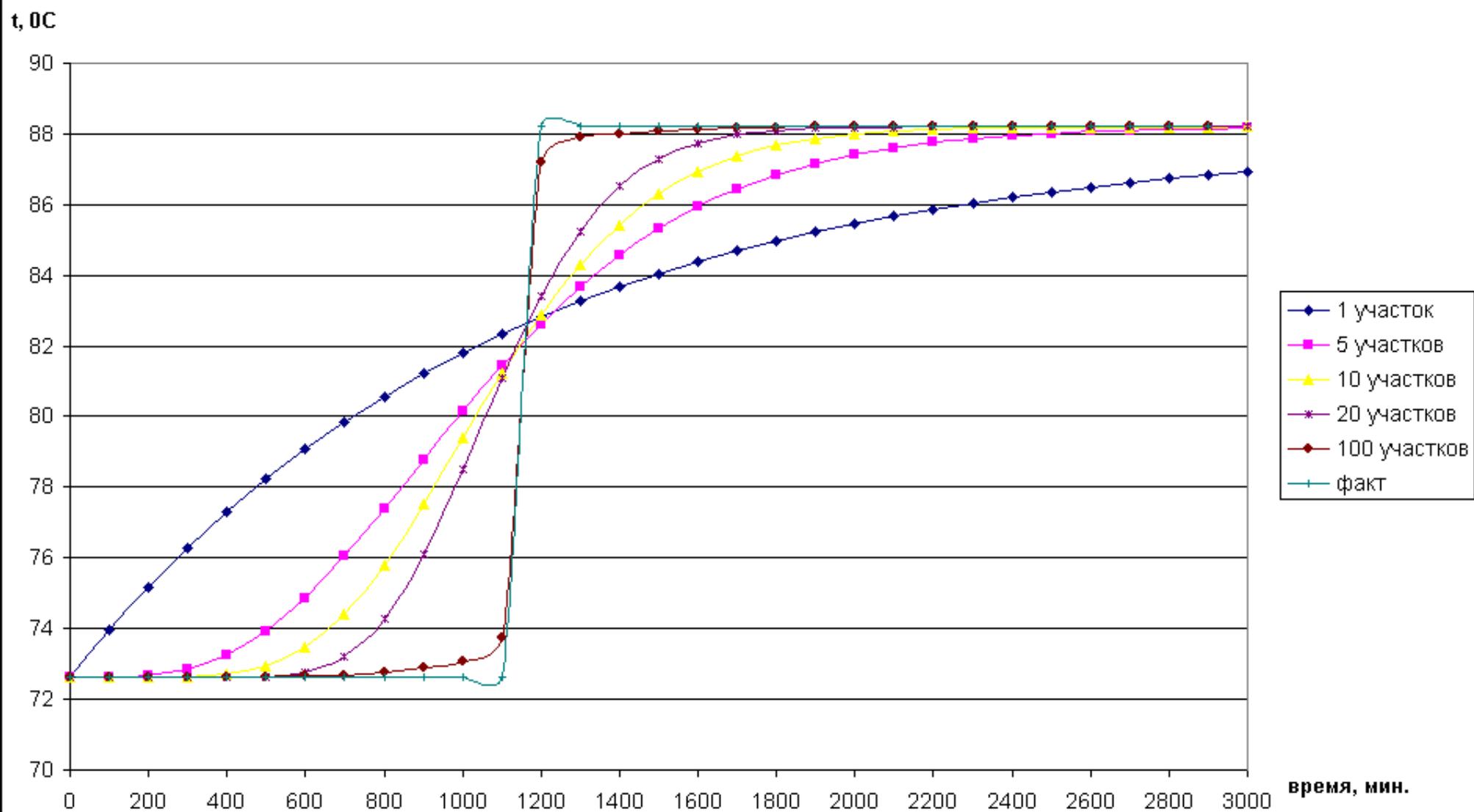


Рисунок 4 - Сравнение данных испытаний и результатов расчетов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения НИР были выполнены следующие этапы исследования:

1. Аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках НИР;

2. Получение решения последовательности рекуррентных соотношений дифференциальных уравнений первого порядка;

3. Разработка математической модели тепловой инерционности разветвленной системы централизованного теплоснабжения на основе решения последовательности рекуррентных соотношений дифференциальных уравнений первого порядка;

4. Экспериментальная верификация математической модели тепловой инерционности разветвленной системы централизованного теплоснабжения на основе решения последовательности рекуррентных соотношений дифференциальных уравнений первого порядка.

В ходе выполнения НИР были получены следующие научные результаты: Разработана и экспериментально верифицирована математическая модель тепловой инерционности разветвленной системы централизованного теплоснабжения на основе решения последовательности рекуррентных соотношений дифференциальных уравнений первого порядка. Результаты сравнения моделирования и экспериментальных исследований показали высокую степень сходимости полученной модели.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Sheng, Shiqi, and Z. C. Tu. Universality of energy conversion efficiency for optimal tight-coupling heat engines and refrigerators. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* 46.40 (2013): 402001. doi:10.1088/1751-8113/46/40/402001.
2. Bolatturk A. Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey. *Appl Therm Eng* 2006; 26(11, 12):1301–9. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.10.019.
3. Kalema, T., Jóhannesson, G., Pylsy, P., & Hagengran, P. (2008 October) Accuracy of Energy Analysis of Buildings: A Comparison of a Monthly Energy Balance Method and Simulation Methods in Calculating the Energy Consumption and the Effect of Thermal Mass. 32 (2), pp.101-130. doi: 10.1177/1744259108093920.
4. Stepanov Vladimir, Natalia Starikova, and Tatiana Stepanova. Indices for estimation of energy conservation in space heating. *Energy and buildings* 31.3 (2000): pp.189-193. DOI: 10.1016/S0378-7788(99)00013-4.
5. Valero, A. Exergy accounting: capabilities and drawbacks. *Energy* 31.1 (2006): 164-180. DOI: 10.1016/j.energy.2004.04.054.
6. Torío, Herena, Adriana Angelotti, and Dietrich Schmidt. Exergy analysis of renewable energy-based climatisation systems for buildings: a critical view. *Energy and Buildings* 41.3 (2009): pp.248-271. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.10.006.
7. Romero, José Carlos, and Pedro Linares. Exergy as a global energy sustainability indicator. A review of the state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33 (2014): pp.427-442. DOI: 10.1016/j.rser.2014.02.012.
8. Bass, M.S. and Batukhtin, A.G., 2011. An Integrated Approach for Optimizing the Operation of Modern Heat Supply Systems. *Thermal Engineering*, Vol. 58, 8, pp. 678–681.

9. Goryachikh N.V., Batukhtin A.G., and Ivanov S.A. Some Methods for Making Cogeneration Stations More Maneuverable – Thermal Engineering, 2010, Vol. 57, No. 10, pp. 892–896.
10. R. Kicsiny, New delay differential equation models for heating systems with pipes, Int. J. Heat Mass Transfer 79 (2014) pp.807–815. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.058.
11. Bau, U., Braatz, AL., Lanzerath, F., Herty, M., Bardow, A. Control of adsorption chillers by a gradient descent method for optimal cycle time allocation INTERNATIONAL JOURNAL OF REFRIGERATION-REVUE INTERNATIONALE DU FROID 56 (2015) pp.52-64/ DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.03.026.
12. Kicsiny, R. Grey-box model for pipe temperature based on linear regression INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER 107 (2017) pp.13-20/ DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.033/
13. Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B., Lavrichshev O.A. Plasma preparation of coal to combustion in power boilers // Fuel Processing Technology. - March 2013. - V 107. - pp. 93–98. DOI: 10.1016/j.fuproc.2012.07.001.
14. Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B. Plasma Assisted Power Coal Combustion in the Furnace of Utility Boiler: Numerical Modelling and Full-Scale Test // Fuel, 2014. - Vol. 126. - pp. 294-300. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.02.047.
15. Messerle V.E., Mosse A.L., Ustimenko A.B. Municipal Solid Waste Plasma Processing: Thermodynamic Computation and Experiment // IEEE Transactions on Plasma Science. - 2016. - V. PP, No.99. - P. 1-6. DOI: 10.1109/TPS.2016.2601107
16. Messerle V.E., Ustimenko A.B., Lavrichshev O.A. Comparative study of coal plasma gasification:Simulation and experiment // Fuel. – 2016. – V. 164. - pp. 172-179.

17. Gao H., Chui E., Runstedler A. et al. Numerical investigation of plasma ignition process in a utility boiler //Proceedings of 6th International Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPAC). - Heilbronn, Germany. - 2010, 13-15 September. - pp. 69.

18. Karpenko E. I., Rinchinov A. P., Karpenko Y. E., Bass, M. S., Batukhtin S. G. The results of the tests of experimental-industrial plasma-cyclone installation. Promyshlennaya Energetika, No. 4, 2016. pp. 24-27.

19. Kaminski, K., Krzyzynski T. Modeling and Simulation of the Solar Collector Using Different Approaches / Mechatronics: Ideas, Challenges, Solutions and Applications (2015) pp. 131-151. DOI: 10.1007/978-3-319-26886-6_9

20. Hussain, MI., Ali, A., Lee, GH. Multi-module concentrated photovoltaic thermal system feasibility for greenhouse heating: Model validation and techno-economic analysis/ SOLAR ENERGY 135 (2016) pp.719-730/ DOI: 10.1016/j.solener.2016.06.053.

21. Beg, O. Anwar; Ali, Nasir; Zaman, Akbar; и др. Computational modeling of heat transfer in an annular porous medium solar energy absorber with the P1-radiative differential. JOURNAL OF THE TAIWAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS Том: 66 (2016) Стр.: 258-268. DOI: 10.1016/j.jtice.2016.06.034

22. Li, H. and Zhe Chen, 2008. "Overview of different wind generator systems and their comparisons." IET Renewable Power Generation, 2.2, 2008, pp. 123-138 . DOI: 10.1049/iet-rpg:20070044

23. Smith, E., Koolnapadol, N. and Promvonge, P., 2012. Heat transfer behavior in a square duct with tandem wire coil element insert. ChinJChem Eng, 20, pp. 863–869. WOS:000311472200008.

24. Thianpong, C., Yongsiri, K., Nanan, K. and Eiamsa-ard, S., 2012. Thermal performance evaluation of heat exchangers fitted with twisted-ring turbulators. IntCommun Heat Mass Transf, 39, pp. 861–868. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.04.004.

25. R. Kicsiny. Improved multiple linear regression based models for solar collectors. *Renewable Energy* 91 (2016) pp.224–232. DOI: 10.1016/j.renene.2016.01.056.
26. V.D. Stevanovic, B. Zivkovic, S. Prica, B. Maslovaric, V. Karamarkovic, V. Trkulja, Prediction of thermal transients in district heating systems. *Energy Convers. Manage.* 50 (2009) pp. 2167–2173. DOI: 10.1016/j.enconman.2009.04.034.
27. Polyanin, A. D. and Zaitsev, V. F., Handbook of Exact Solutions for Ordinary Differential Equations, 2nd Edition , Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 2003.
28. Karpenko E.I., Trusov B.G. A Comparative Analysis of Plasma and Fire Technologies of Pulverized Coal Ignition, Combustion and Gasification Using a Mathematical Model of chemically nonequilibrium system // *Thermophysics and Aeromechanics*. - 1995. - Vol. 2, N23 - P. 245-250.
29. Saleh, AM., Mueller, DW., Abu-Mulaweh, HI. Flat-Plate Solar Collector in Transient Operation: Modeling and Measurements *JOURNAL OF THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING APPLICATIONS* 7 (2015) DOI: 10.1115/1.4028569.
30. D.M. Etter, D. Kuncicky, H. Moore, Introduction to MATLAB 7, Springer, 2004.
31. Khelifa, A., Touafek, K., Ben Moussa, H., Tabet, I. Modeling and detailed study of hybrid photovoltaic thermal (PV/T) solar collector. *SOLAR ENERGY*. 135 (2016) pp.: 169-176. DOI: 10.1016/j.solener.2016.05.048.
32. Gholampour, M., Ameri, M. Design Considerations of Photovoltaic/Thermal Air Systems: Energetic and Exergetic Approaches. *JOURNAL OF SOLAR ENERGY ENGINEERING-TRANSACTIONS OF THE ASME*. Том: 137 (2015) Выпуск: 3 Номер статьи: 031005. DOI: 10.1115/1.4029107
33. Khelifa, A., Touafek, K., Ben M. Approach for the modelling of hybrid photovoltaic-thermal solar collector. *IET RENEWABLE POWER*

GENERATION Том: 9 (2015) Выпуск: 3 pp.: 207-217. DOI: 10.1049/iet-rpg.2014.0076.

34. РД 34.09.255-97. Методические указания по определению тепловых потерь в водяных тепловых сетях. СПО «ОРГРЭС», Москва, 1998.

35. Методические указания по испытанию водяных тепловых сетей на гидравлические потери. М., СПО «Союзтехэнерго», 1989.

36. Приказ министерство энергетики РФ от 30 декабря 2008 года № 325. Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

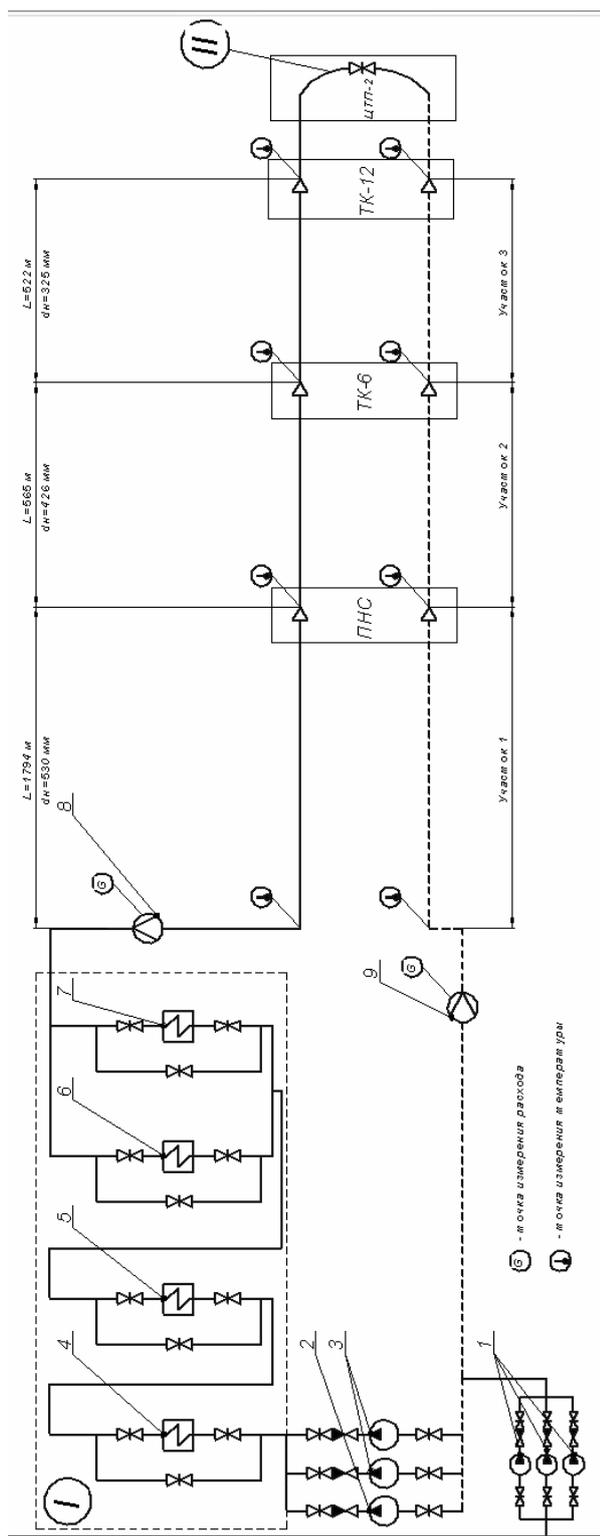


Рисунок А1 - Схема испытуемого циркуляционного кольца

I – теплоподготовительная установка; II – циркуляционная перемычка; 1 – насосы подпитки теплосети; 2 – сетевой насос ЦН-400-210М; 3 – сетевые насосы ЦН-400-210; 4 – ОБ-1; 5 – ОБ-2; 6 – ПБ-1; 7 – ПБ-2; 8,9 – штатная система контроля расхода теплоносителя.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА
ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ
НА ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ
ТЕПЛОМАГИСТРАЛЕЙ ПГТ. ЯСНОГОРСК**

_____ П.Г. Сафронов
начальник ПТО ХарГРЭС;

_____ В.В. Нестеров
начальник КТЦ ХарГРЭС;

_____ А.Г. Батухтин

ЧИТА 2017

1. ЦЕЛЬ, ОСНОВАНИЕ И ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ.

1.1. Цель «тепловых» испытаний - определение тепловых потерь различными типами прокладки и конструкциями изоляции трубопроводов, характерными для тепловых сетей пгт. Ясногорск.

В задачу испытаний входит:

- определение тепловых потерь через изоляцию испытываемыми участками сети при выбранном режиме и сопоставление их с нормативными значениями по тем же участкам;

1.2. Необходимость испытаний вызвана периодичностью их проведения согласно ПТЭ 1 раз в 5 лет и составлением Энергетических характеристик для систем транспорта тепловой энергии.

1.3. По результатам испытаний оцениваются условия работы и состояние изоляции тепловых сетей в целом. Поэтому испытаниям подвергаются трубопроводы тепломагистралей, у которых тип прокладки и конструкция изоляции являются преобладающими для данной сети.

1.4. Краткая характеристика объекта испытаний приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Наименование	Тепломагистраль	
	Подающий	Обратный
1	2	3
Схема тепловых сетей	Закрытая, тупиковая	Закрытая, тупиковая
Количество трубопроводов	1	1
Протяженность, км	2.881	2.881
Диаметр условный, мм	500.0; 400.0; 300.0	500.0; 400.0; 300.0
Тип прокладки трубопроводов на участке	надземная на низко- стоящих опорах и подземная в непроходных каналах	надземная на низко- стоящих опорах и подземная в непроходных каналах
Конструкция тепловой изоляции	минераловатные маты	минераловатные маты
Год прокладки	1990	1990
Температурный график, °С	95 – 70	95 – 70
Спрявление на Г.В., °С	60	60
Продолжительность работы трубопроводов в году, ч	8520	8520
Период (месяц) ремонта тепло- проводов	с 15 августа по 24 августа	с 15 августа по 24 августа
Продолжительность отопительного сезона	с 25 августа по 14 августа	с 25 августа по 14 августа

Таблица 1.2

Наименование оборудования	Количество, шт	Тип	Расход воды, т/ч	Поверхность нагрева, м ²
Основной подогреватель БО-1	1	ПСВ-315-3-23	1130	315

1.5. Для осуществления нагрева и циркуляции воды в трубопроводах тепломагистрали в составе теплоподготовительной установки имеется следующее оборудование (табл. 1.2; 1.3).

1.6. Измерение расхода сетевой воды в испытываемом контуре производится с помощью переносного расходомера.

Таблица 1.3

Наименование оборудования	Кол-во, шт	Тип	Номинальная мощность, кВт	Расход, т/ч	Напор, м
СЭН-1, 2	2	модернизированный ЦН-400-210М (снято 2 колеса)	290	400	21
Подпитка деаэратором	2	ДА-100	-	-	-
НПТС-1, 2	2	К-45-55	15	45	5,5

1.7. В таблице 1.4 приведены среднемесячные и среднегодовые температуры наружного воздуха, грунта и теплоносителя.

Таблица 1.4

Месяцы	Число часов работы		Температура, °С				
	отопит. период	летний период	грунта	наружного воздуха	подающего тр-да	обратного тр-да	холодной воды
Январь	744		-2,7	-23,4	94,9	74,6	5
Февраль	672		-4,3	-17,3	89,7	72,1	5
Март	744		-3,4	-5,57	78,6	68,1	5
Апрель	720		-1	5,1	71,2	59,6	5
Май	216	528	1,2	12,7	69	56,8	8,9
Июнь		720	6	20,3	67,8	58,6	15
Июль		744	10,1	21,8	67	55,7	15
Август		504	11,7	16,2	66,9	55,3	15
Сентябрь	456	264	10,7	8,63	69,2	56,3	10
Октябрь	744		7,7	-2,69	77,7	66,9	5
Ноябрь	720		3,4	-14,7	89,2	71,1	5
Декабрь	744		-0,5	-19,6	94,2	73,8	5
Среднегодовые значения	5760	2760	2,8	0,12	78,5	65,7	7,9
Среднесезонные значения	отопит. период		0,3	-7,35	81,3	67,9	5
	летний период		9,3	15,7	67,6	56,2	12,78

1.8. Материальная характеристика теплопроводов приведена в таблице 1.5.

Таблица 1.5

Наименование участка теплосети	Тип прокладки, конструкция изоляции	Диаметр трубопровода			Длина тр-да l, м	Мат. хар-ка dн*l, м ²	Площадь сечения f, м ²	Объём тр-да V, м ³
		условный	внутрен.	наружный				
		d _у , м	d _{вн} , м	d _н , м				
ГРЭС - ПНС	надземная; прошивные минераловатные маты; защ. слой - стеклоткань	0,500	0,510	0,530	1794,0	950,8	0,2043	366,48
ПНС - ТК-6 ТК-6 - ТК-12	подземная; стекловата и минераловатные маты; стеклопластик	0,400	0,406	0,426	565,0	240,7	0,1297	73,29
		0,300	0,315	0,325	522,0	169,7	0,0779	40,68
Итого по надземной прокладке:					1794,0	950,8	---	366,5
Итого по подземной прокладке:					1087,0	410,3	---	114,0
Всего по испытанным участкам:					2881,0	1361,2	---	480,5

2. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ.

2.1. По тепломагистрали:

2.1.1. Проверить работоспособность и готовность перемычки «А» (d_у = 40 мм и l = 1 м) между подающим и обратным трубопроводами до секционирующих задвижек в ЦТП-2.

2.1.2. Обеспечить пригодность гильз под термометры на подающем и обратном теплопроводах до перемычки «А» по ходу теплотрассы в ПНС, ТК-6, ТК-12. В гильзу залить машинное масло.

Примечание: Гильзы для термометров должны быть заглублены на 200 мм. Высота выступающей части не должна превышать 15 мм. Внутренний диаметр гильзы должен быть не менее 12 мм.

2.1.3. Произвести ревизию запорной арматуры по подающему и обратному трубопроводам на ответвлениях в следующих точках: точка врезки луч 1, точка врезки луч 2, ПНС, ТК-1, ТК-2, ТК-3, ТК-4, ТК-5, ТК-6, ТК-7, ТК-8, ТК-9, УТ-42, УТ-43, УТ-45, ТК-12, ТК-10, ТК-34а, ТК-34, ТК-42, ТК-43, ТК-44, ТК-45. В случае неплотного их отключения предусмотреть замену или наличие дублирующей арматуры.

2.1.4. Закрывать все существующие дренажные устройства.

2.1.5. Открыть смонтированную циркуляционную перемычку.

2.2. Теплоподготовительная установка ГРЭС:

2.2.1. Для создания циркуляции воды по испытываемым тепломагистралям проверить готовность к работе насоса СЭН-1 типа ЦН-400-210М, .

2.2.2. Поддержание заданного давления в обратном трубопроводе, равным $4,5 \text{ кгс/см}^2$ с допустимым отклонением $0,2 \text{ кгс/см}^2$, обеспечить подпиточным насосом НПТС-1 тип К-45-55.

2.2.3. Провести ревизию необходимой запорной арматуры во избежания утечек из циркуляционного контура схемы теплоподготовительной установки при испытаниях.

2.3. Срок проведения подготовительных работ

2.3.1. Подготовительные работы по тепломагистрали должны быть выполнены до 10 августа 2017 г.

2.3.2. Подготовительные работы на теплоподготовительной установке ГРЭС должны быть выполнены до 10 августа 2017 г.

3. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ.

3.1. Испытания подающего и обратного трубопроводов тепломагистрали проводятся при отключенных ответвлениях к потребителям и малом расходе воды, равном 53 т/ч.

Циркуляция воды осуществляется через циркуляционную перемычку «А» $d_y = 40 \text{ мм}$ тепломагистрали в ЦТП-2 и ВПУ ГРЭС.

Начальный участок циркуляционного кольца образуется оборудованием и трубопроводами теплоподготовительной установки ГРЭС.

3.2. Тепловая мощность теплоподготовительного оборудования при испытаниях должна примерно соответствовать значению тепловых потерь циркуляционного кольца ($Q_{п} = 0,686$ Гкал/ч).

3.3. Испытания тепломагистралей проводятся с прекращением отпуска тепла на горячее водоснабжение и отопление потребителям тепломагистралей от ГРЭС.

3.4. Испытания на тепловые потери сводятся к одновременному определению расхода воды и падения температуры на испытываемых участках теплопроводов.

3.5. Испытания проводятся с соблюдением местных инструкций по ТБ на рабочих местах.

4. ПЕРЕЧЕНЬ ЭТАПОВ И РЕЖИМОВ ИСПЫТАНИЙ.

4.1. Испытания на тепловые потери состоят из подготовительного, предварительного, основного и заключительного этапов.

4.1.1. Подготовительный этап.

4.1.2. При подготовке к испытаниям на основании усреднённых температур наружного воздуха и грунта пгт. Ясногорск (табл. 1.4), температурного графика отпуска тепла потребителям, подключенным к ГРЭС, продолжительности работы тепловых сетей, материальной характеристики тепловых сетей (табл. 1.5), в соответствии с [2] произведён расчёт параметров испытаний (приложение 1).

4.1.3. Перед проведением испытаний проверяется выполнение всех подготовительных работ, составляется рабочая программа испытаний.

4.1.4. Осуществление необходимых гидравлических и температурных режимов испытаний тепломагистралей производится в следующем порядке:

- собирается схема теплоподготовительной установки в рабочем порядке, обеспечивающем поддержание необходимых параметров по давлению и температуре сетевой воды при проведении испытаний;

- подпиточным насосом НПТС-1 на всасе сетевого насоса СЭН-1 устанавливается давление, равное $4,5 \text{ кгс/см}^2$, и поддерживается с точностью $0,2 \text{ кгс/см}^2$ в течении всего периода испытаний;

- включается в работу основной подогреватель БО-1, сетевой насос СЭН-1 типа ЦН-400-210М;

- обеспечивается сокращение утечки из испытываемых теплопроводов до минимальной величины, близкой к нулю (не более $4,8 \text{ т/ч}$);

- устанавливается определенный расчетом (см. приложение 1) расход воды по циркуляционному кольцу $G_{и} = 53 \text{ т/ч}$, который поддерживается с отклонением $\pm 2,0 \%$ в течении всего периода испытаний;

- устанавливается определённая расчётом температура воды в подающем теплопроводе $T_{п.и}=86 \text{ }^{\circ}\text{C}$, которая поддерживается с точностью $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в течении всего периода испытаний.

4.1.5. Предварительный этап.

4.1.6. Предварительный этап заключается в прогреве грунта (при расчётных расходе и температуре воды) до достижения тепломагистралью установившегося теплового состояния, показателем которого является выравнивание и длительное постоянство температуры воды на входе в теплоподготовительную установку.

4.1.7. Во время прогрева грунта измеряются расходы циркулирующей воды и температуры ее на входе и выходе ГРЭС и в конце испытываемых тепломагистралей. Результаты измерений фиксируются одновременно через каждые 30 минут.

4.1.8. Ожидаемая продолжительность предварительного этапа не менее 2 часов.

4.1.9. Основной этап.

4.1.10. Основной этап испытаний начинается с того момента, когда температура воды в обратном теплопроводе устанавливается постоянной.

Начиная с этого момента, измерение температуры воды производится во всех намеченных точках наблюдения: ГРЭС, в ПНС, ТК-6, ТК-12 и фиксируются в журналы наблюдений через каждые 10 минут.

4.1.11. Ожидаемая продолжительность основного этапа не менее 20 часов или одних суток.

4.1.12. Заключительный этап.

4.1.13. На заключительном этапе испытаний методом «температурной волны» уточняется время пробега частиц воды по участкам. На этом этапе температуры воды на выходе с ГРЭС за 40 минут повышается (понижается) на 15 °С и поддерживается постоянной на этом уровне в течении одного часа. Затем с той же скоростью температура понижается (повышается) до первоначальной величины.

4.1.14. Движение «температурной волны» по испытываемому кольцу фиксируется во всех точках наблюдения с интервалом 10 минут.

4.1.15. Испытания могут быть закончены лишь после того, как «температурная волна» будет отмечена на входе ГРЭС.

4.1.16. Гидравлический режим испытаний при прохождении «температурной волны» остается неизменным.

4.1.17. Ожидаемая продолжительность заключительного этапа испытаний не менее 14 часов.

4.1.18. По окончании испытаний в теплопроводах тепломагистрали устанавливается статический режим с поддержанием давления на ГРЭС, равным 0,40 МПа (4,0 кгс/см²). Затем по указанию НССа ГРЭС теплофикационное оборудование ГРЭС переводится на обычную схему работы.

4.2. Ожидаемая продолжительность испытания в целом.

4.2.1. Ожидаемая продолжительность испытания в целом составляет не менее 38 часов.

5. РАЗРАБОТКА, СОГЛАСОВАНИЕ И УТВЕРЖДЕНИЕ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ ИСПЫТАНИЙ.

6.1. Непосредственно перед испытаниями, после проверки выполнения подготовительных работ, ответственный предприятия-разработчика совместно с ответственными за подготовку оборудования ГРЭС и тепловых сетей разрабатывают рабочую программу испытаний.

6. ОБРАБОТКА И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ.

7.1. Обработка результатов испытаний сводится к расчёту фактических часовых тепловых потерь, имевших место при установившемся тепловом состоянии на испытываемых участках циркуляционного кольца, пересчёту их на среднегодовые условия, определению отношения фактических тепловых потерь на испытанных участках к нормативным.

7.2. Обработка данных производится в соответствии с «Методическими указаниями по определению тепловых потерь в водяных тепловых сетях» (РД 34.09.255-97, СПО «ОРГРЭС», Москва, 1998) и «Методическими указаниями по составлению энергетических характеристик для систем транспорта тепловой энергии» (РД 153-34.0 20.523-98, СПО «ОРГРЭС», Москва, 1999).

7.3. Результаты испытаний пгт. Ясногорск будут оформлены в виде технического отчёта.

7. ОСНОВНЫЕ МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ.

8.1. При подготовке и проведении испытаний тепловых сетей на тепловые потери необходимо соблюдать требования безопасности согласно «Правилам техники безопасности при эксплуатации тепломеханического оборудования электростанций и тепловых сетей» (М., 2003).

8.2. Перед началом испытаний выделяются наблюдатели. Они проходят инструктаж и расставляются в пунктах наблюдения со сверенными часами.

8.3. Потребители должны быть предупреждены о времени проведения испытаний и сроке отключения с указанием мер безопасности за три дня до начала испытаний.

8. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Методические указания по составлению энергетических характеристик для систем транспорта тепловой энергии (в трех частях): РД 153-34.0-20.523-98.- М.: СПО ОРГРЭС, 1999.
2. Методические указания по определению тепловых потерь в водяных тепловых сетях: РД 34.09.255-97.-М.: СПО ОРГРЭС, 1998.
3. Методические указания по испытанию водяных тепловых сетей на гидравлические потери: М.: СПО ОРГРЭС, 1989.
4. СО 153-34.20.501-2003 «Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей»
5. РД 153-34.1-09.164-00 «Типовая программа проведения энергетических обследований транспорта и распределения тепловой энергии».
6. МУ 34-70-080-84 «Методические указания по определению тепловых потерь в водяных и паровых сетях».

Приложение Б1

РАСЧЁТ ОЖИДАЕМЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ И ПАРАМЕТРОВ ИСПЫТАНИЙ

№	Наименование величины	Обозначение	Единицы измерения	Способ определения	Значение
1	2	3	4	5	6
1	Минимально допустимое снижение температуры	$\Delta t_{\text{мин}}$	°С	принято [2]	2,0
2	Снижение температуры в испытываемом кольце	$\Delta t_{\text{и}}$	°С	$\Delta t_{\text{мин}} / (M_{\text{мин}} / (M_{\text{к.п}} + M_{\text{к.о}}))$	13,3
3	Наименьшая материальная характеристика испытываемого кольца	$M_{\text{мин}}$	-//-	расчёт	410,3
4	Суммарная характеристика подающей и обратной линий всего кольца	$M_{\text{к.п}} + M_{\text{к.о}}$	-//-	расчёт	2722,3
5	Ожидаемая усреднённая по всем участкам температура окружающей среды во время испытаний	$t_{\text{окр.и}}$	°С	$(t_{\text{гр.и}}^{\text{ср.м}} * M_{\text{под}} + t_{\text{в.и}}^{\text{ср.м}} * M_{\text{надз}}) / M_{\text{к}}$	9,23
6	Усреднённая по тем же участкам среднегодовая температура окружающей среды	$t_{\text{окр}}^{\text{ср.г}}$	°С	$(t_{\text{гр}}^{\text{ср.г}} * M_{\text{под}} + t_{\text{в}}^{\text{ср.г}} * M_{\text{надз}}) / M_{\text{к}}$	0,93
7	Температура воды, поддерживаемая при испытаниях в подающей линии	$t_{\text{п.и}}$	°С	$(t_{\text{п}}^{\text{ср.г}} + t_{\text{о}}^{\text{ср.г}}) / 2 + \Delta t_{\text{и}} / 2 + t_{\text{окр.и}} - t_{\text{окр}}^{\text{ср.г}}$	87,04
8	Ожидаемая температура воды в обратной линии испытываемого кольца	$t_{\text{о.и}}$	°С	$t_{\text{п.и}} - \Delta t_{\text{и}}$	73,77
9	Средняя температура воды в подающей линии испытываемого кольца	$t_{\text{п.и}}^{\text{ср}}$	°С	$t_{\text{п.и}} - \Delta t_{\text{и}} / 4$	83,72
10	Средняя температура воды в обратной линии испытываемого кольца	$t_{\text{о.и}}^{\text{ср}}$	°С	$t_{\text{о.и}} - \Delta t_{\text{и}} / 4$	70,45
11	Нормативные удельные тепловые потери подающей линии участка надземной прокладки	$q_{\text{н.п}}^{529}$	ккал/м.ч	по табл.2/прил.2 [2]	128,38

1	2	3	4	5	6
12	Нормативные удельные тепловые потери обратной линии участка надземной прокладки	$q_{н.о}^{529}$	ккал/м.ч	по табл.2/прил.2 [2]	115,58
13	Нормативные удельные тепловые потери суммарно по подающей и обратной линиям для участка подземной прокладки	$q_{н}^{426}$	ккал/м.ч	по табл.1/прил.2 [2]	210,91
	Нормативные удельные тепловые потери суммарно по подающей и обратной линиям для участка подземной прокладки	$q_{н}^{325}$	ккал/м.ч	по табл.1/прил.2 [2]	174,54
14	Ожидаемые удельные тепловые потери для участка надземной прокладки (подающая линия)	$q_{н.п.и}^{529}$	ккал/м.ч	$q_{н.п}^{529} * (t_{п.и}^{cp} - t_{в.и}^{cp.м}) / (t_{п}^{cp.г} - t_{в}^{cp.г})$	116,33
15	Ожидаемые удельные тепловые потери для участка надземной прокладки (обратная линия)	$q_{н.о.и}^{529}$	ккал/м.ч	$q_{н.о}^{529} * (t_{о.и}^{cp} - t_{в.и}^{cp.м}) / (t_{о}^{cp.г} - t_{в}^{cp.г})$	101,79
16	Ожидаемые удельные тепловые потери суммарно по подающей и обратной линиям для участка подземной прокладки	$q_{н.и}^{426}$	ккал/м.ч	$q_{н}^{426} * (t_{п.и}^{cp} + t_{о.и}^{cp} - 2 * t_{гр.и}^{cp.м}) / (t_{п}^{cp.г} + t_{о}^{cp.г} - 2 * t_{гр}^{cp.г})$	230,96
17	Ожидаемые удельные тепловые потери суммарно по подающей и обратной линиям для участка подземной прокладки	$q_{н.и}^{325}$	ккал/м.ч	$q_{н}^{325} * (t_{п.и}^{cp} + t_{о.и}^{cp} - 2 * t_{гр.и}^{cp.м}) / (t_{п}^{cp.г} + t_{о}^{cp.г} - 2 * t_{гр}^{cp.г})$	191,13
18	Ожидаемые тепловые потери на участке испытываемого кольца надземной прокладки	$Q_{над.и}$	ккал/ч	$[(q_{н.п.и}^{529} + q_{н.о.и}^{529}) * l^{529}] * \beta$	44999 4,57
19	Ожидаемые тепловые потери на участке испытываемого кольца подземной прокладки	$Q_{под.и}$	ккал/ч	$(q_{н.и}^{426} * l^{426} + q_{н.и}^{325} * l^{325}) * \beta$	26480 2,4
20	Коэффициент, учитывающий тепловые потери в арматуре, опорах, компенсаторах	β	-//-	принято [2]	1,15

1	2	3	4	5	6
21	Ориентировочное значение тепловых потерь всем циркуляционным контуром	$Q_{и}$	ккал/ч	$Q_{над.и} + Q_{под.и}$	71479 6,97
22	Расчётный расход воды, принимаемый во время испытаний	$G_{и}$	т/ч	$Q_{и} / (\Delta t_{и} * 1000)$	53,87
23	Ожидаемое значение часовой подпитки сети при испытаниях	$G_{п}$	т/ч	$0,5 * V / 100$	4,80
24	Средняя температура воды в контуре	$t_{и}^{cp}$	°С	$(t_{п.и} + t_{о.и}) / 2$	80,4
25	Средняя плотность воды, соответствующая $t_{и}^{cp}$	ρ	кг/м ³	принято [3]	978,83
26	Ожидаемые падения температур на участках: - надземная прокладка (1-ый участок): - прямая	$\Delta t_{п.и}$	°С	$Q_{н.п.и} / (G_{и} * 1000)$	4,46
	- обратка	$\Delta t_{о.и}$		$Q_{н.о.и} / (G_{и} * 1000)$	3,90
	- подземная прокладка (2 и 3-ый участки)	$\Delta t_{п.о.и}$		$Q_{п.и} / (G_{и} * 1000)$	4,92
27	Ожидаемая продолжительность пробега частиц по циркуляционному контуру	$T_{к.}$	ч.	$(V * \rho) / (G_{и} * 1000)$	17,5
28	Время пробега по участкам: 1-ый	* T_1		$(V * \rho) / (G_{и} * 1000)$	13,3
	2-ий и 3-ый	T_{2-3}			4,1
	Продолжительность основного этапа	-		$T_{к.} + 8$	25,5

ПРИЛОЖЕНИЕ В

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА Испытаний теплосети пгт. Ясногорск на тепловые потери

Цель: Тепловые испытания проводятся для определения тепловых потерь различными типами прокладки и конструкциями изоляции трубопроводов, характерными для тепловой сети.

№ п/п	Производимые работы	Время	Примечания
I. Подготовка к проведению испытаний			
1.1	Получить разрешение НСС ГРЭС на проведение испытаний		
1.2	Отключить всех потребителей на участке от ГРЭС до ЦТП-2		
1.3	Открыть перемычку в ЦТП-2. Закрыть задвижки после перемычки.		
1.4	Испытания проводятся с соблюдением местных инструкций по ТБ на рабочих местах.		
1.5	Испытания проводятся специалистами ЗабГУ с привлечением персонала ГРЭС и АО «Коммунальник».		
II. Порядок проведения температурных испытаний.			
Испытания на тепловые потери состоят из подготовительного, предварительного, основного и заключительного этапов. Проводятся после окончательного монтажа циркуляционного кольца испытаний.			
Начало <u>15.08.2017 г. в 19:00</u> Окончание <u>17.08.2017 г. в 20:00</u>			
2.1	ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЙ ЭТАП. Для проведения температурных испытаний собирается циркуляционное кольцо с перемычкой в ЦТП-2.		
2.2	Собирается испытательная схема теплоподготовительной установки в рабочем порядке, обеспечивающем поддержание необходимых параметров по давлению и температуре сетевой воды при проведении испытаний.		
2.3	ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ЭТАП. Предварительный этап заключается в прогреве грунта (при расходе 53 т/ч) и расчетной температуре воды T=86,0°C до достижения тепломагистралью установившегося теплового состояния, показателем которого является выравнивание и длительное постоянство температуры воды на входе в теплоподготовительную установку.	15.08 в 20:00	
2.4	Во время прогрева грунта измеряются расход циркулирующей воды и температуры ее на входе и выходе на ГРЭС и в конце испытываемой тепломагистралей. Результаты измерений фиксируются одновременно через каждые 3 часа днем и 6 часов ночью.		
2.5	Ожидаемая продолжительность предварительного этапа 24 часов.		
2.6	ОСНОВНОЙ ЭТАП.	16.08	

	Основной этап испытаний начинается с того момента, когда температура воды в обратном теплопроводе устанавливается постоянной. Начиная с этого момента, измерения температуры воды производится во всех намеченных точках наблюдения: - ПНС, ТК-6, ТК-12; - на подающем трубопроводе тепломагистральной; - на обратном трубопроводе тепломагистральной.	в 20:00	
2.7	Ожидаемая продолжительность основного этапа 24 часа.		
2.8	ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЙ ЭТАП. На заключительном этапе испытаний методом «температурной волны» уточняется время пробега частиц воды по участкам. На этом этапе температура воды на выходе с ГРЭС за 40 минут повышается (понижается) на 15°С и поддерживается постоянной на этом уровне в течении одного часа. Затем с этой же скоростью температура понижается (повышается) до этой же величины.		
2.9	Движение «температурной волны» по испытываемому кольцу фиксируется во всех точках наблюдения с интервалом в 10 минут.		
2.10	Испытания могут быть закончены лишь после того, как «температурная волна» будет отмечена на входе ГРЭС.	17.08 в 20:00	
2.11	Гидравлический режим испытаний при прохождении «температурной волны» остается неизменным.		
III. ТБ при проведении испытаний.			
3.1	При подготовке и проведении испытаний тепловых сетей на тепловые потери необходимо соблюдать требования безопасности согласно «Правил техники безопасности при эксплуатации тепломеханического оборудования электростанций и тепловых сетей».		
3.2	Перед началом испытаний выделяются наблюдатели. Они проходят инструктаж и расставляются в пунктах наблюдения со сверенными часами.		
3.3	У люков тепловых камер, в которых ведутся наблюдения при испытаниях, должны устанавливаться ограждения и дорожные знаки в обе стороны движения транспорта на расстоянии не менее 5 метров.		

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Расчёт среднегодовых потерь тепла на испытанных участках теплосети и сравнение их с нормативными тепловыми потерями

Таблица Г1

Наименование участка	Тип	Расход сетевой воды		Температура воды в начале и конце участка по подающему и обратному теплопроводам				Тепловые потери теплопроводами при испытании		Среднегодовые температуры теплоносителя и окружающей среды				Температура среды и грунта при исп-ии		Потери, приведенные к среднегодовым условиям		Нормативная величина тепловых потерь		Соотношение $Q_{п.и}/Q_{н.и}$	
		Спод.	Гобр.	$t_{п}^н$	$t_{п}^к$	$t_{о}^н$	$t_{о}^к$	$Q_{п.и}$	$Q_{о.и}$	$t_{п}^{ср.г}$	$t_{о}^{ср.г}$	$t_{окр}^{ср.г}$	$t_{гр}^{ср.г}$	$t_{окр.и}$	$t_{гр.и}$	$Q_{п.и.и}$	$Q_{о.и.и}$	$Q_{п.н}$	$Q_{о.н}$	$K_{п}$	$K_{о}$
		т/ч		°С				ккал/ч		°С				ккал/ч		ккал/ч		---			
ГРЭС - ПНС	надз.	52,91	---	85,9	81,1	---	---	253656,0	---	78,5	65,7	0,1	2,8	7,0	0,8	259889,6	---	264860,8	---	0,98	---
ПНС - ГРЭС		---	52,65	---	---	75,8	71,4	---	231946,0							---	---	228393,7	---	238453,1	---
Итого:								485602,0						488283,3		503313,9		---			
ПНС - ТК-12	подз.	52,91	---	81,1	79,3	---	---	95121		78,5	65,7	0,1	2,8	7,0	0,8	236698,1	241814,0		0,98		
ТК-12 - ПНС		---	52,65	---	---	79,2	75,8		179231												
Итого:								274352,0						236698,1		241814,0		---			
Всего:								759954,0						724981,4		745127,9		---			

Определение времени прохождения воды по участкам испытываемой сети

Таблица Г2

Наименование участка	Диаметр трубопровода, внутренний	Длина участка	Объём трубопровода на участке	Удельный вес воды при расч. тем-ре испытаний	Удельный вес воды при температуре испытаний	Расчётный расход воды на участке	Фактический расход воды на участке	Расчётное время прохождения воды	Фактическое, определяемое температурной волной	Суммарное ожидаемое время	Суммарное фактическое время	
	$d_{вн}$, мм			V , м ³	γ_p , кг/м ³ *							$\gamma_{ф}$, кг/м ³ **
уч. 1	ГРЭС - ПНС	530,0	1794,0	395,8	974,35	977,92	52,9	52,9	437	439	18 ч. 50 мин.	18 ч. 54 мин.
	ПНС - ГРЭС	530,0	1794,0	395,8	975,23	978,49	52,7	52,7	440	441		
уч. 2	ПНС - ТК-6	406,0	565,0	73,1	974,84	979,10	52,9	52,8	81	81		
	ТК-6 - ПНС	406,0	565,0	73,1	975,00	979,63	52,7	52,7	81	82		
уч. 3	ТК-6 - ТК-12	315,0	522,0	40,7	977,16	981,24	52,8	52,7	45	45		
	ТК-12 - ТК-6	315,0	522,0	40,7	981,82	983,04	52,7	52,7	46	46		

Примечание: * - удельный вес воды принят по средней температуре в начале и конце участка при расчётном режиме испытаний;

** - удельный вес воды принят по средней фактической температуре в начале и конце участка во время испытаний.