

На правах рукописи

**КОРЯГИН Алексей Николаевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ  
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА  
ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ И ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ  
ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ**

Специальность 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика»

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Иваново 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

**Научный руководитель** доктор технических наук, профессор  
Созинов Владимир Петрович

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
Султангузин Ильдар Айдарович,  
кандидат технических наук, доцент  
Крупнов Евгений Иванович

**Ведущая организация** ОАО «Оргэнергогаз»  
г. Москва

Защита состоится «21» октября 2011 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, аудитория Б-237

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34, Учёный совет ИГЭУ.  
Тел. (4932) 38–57–12, факс (4932) 38–57–01.  
e-mail: uch\_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», с авторефератом – на сайте ИГЭУ [www.ispu.ru](http://www.ispu.ru)

Автореферат разослан «21» сентября 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук,  
профессор



А.В. Мошкарин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность темы*

Анализ мирового опыта в решении проблемы энергосбережения показывает, что экономия топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) является стратегической задачей любого государства, так как гарантирует его энергетическую безопасность.

В ноябре 2009 года вышел новый Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», определяющий широкомасштабные действия во всех областях промышленности и жилищно-коммунальном секторе. Особое внимание уделено вопросам учета энергоносителей, контроля их потребления и транспортировки.

С 2009 года в России введен новый порядок расчета и обоснования нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии (приказ Минэнерго РФ от 30 декабря 2008 г. № 325). Согласно этому документу для каждой тепловой сети должны разрабатываться нормативы технологических потерь при передаче тепловой энергии, которые применяются при проведении объективного анализа работы теплосетевого оборудования и определении тарифов на отпускаемую потребителям тепловую энергию. Эффективность практической реализации установленного порядка расчета технологических потерь в тепловых сетях напрямую зависит от точности измерения тепловых потерь в реальных условиях эксплуатации. Сдерживающим фактором является отсутствие эффективного и доступного метода контроля состояния изоляции, а также простого и надежного способа испытаний тепловых сетей на предмет определения тепловых потерь трубопроводами в условиях эксплуатации.

Снижение тепловых потерь в жилищно-коммунальном хозяйстве и промышленности регламентируется новыми, более жесткими требованиями СНиП 41-03-2003 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов». Для достижения нормативных значений требуется обоснованный технико-экономический выбор рациональной конструкции тепловой изоляции. Подобный выбор часто бывает весьма затруднен из-за большого количества видов тепловой изоляции, присутствующих на современном рынке. Объем рынка теплоизоляционных материалов в России возрос с 6-7 млн м<sup>3</sup> в 1998 году до 28-30 млн м<sup>3</sup> в 2009 году, т. е. более чем в 4 раза. Появились материалы, имеющие хорошие теплозащитные характеристики, но продаваемые по высоким ценам. При этом каждый раз приходится делать выбор по соотношению цена-качество, не имея обоснованного подхода к решению данного вопроса.

Сложившаяся система нормирования тепловых потерь не позволяет учитывать ряд факторов, определяющих эффективность работы системы теплоснабжения. Более правильным в современных условиях представляется переход к практике гибкого нормирования, учитывающего конъюнктуру цен на тепловую энергию и теплоизоляционные материалы, а также специфику условий эксплуатации теплоизоляционных конструкций, характерных для различных регионов страны.

Все сказанное позволяет сделать вывод, что настало время радикального пересмотра принципов выбора изоляционных конструкций тепловых сетей, так как применение традиционных для России технических решений не обеспечивает требуемые по современным требованиям теплопотери.

**Цель диссертационной работы** заключается в повышении эффективности систем теплоснабжения за счет сокращения тепловых потерь, достигаемого путем мониторинга и оптимизации параметров тепловой изоляции.

Для достижения указанной цели были решены следующие *задачи*:

- Выполнена оценка достоверности существующих методик экспериментального определения тепловых потерь на основе анализа фактических данных по материалам, конструкциям, состоянию тепловой изоляции и величинам теплопотерь в различных условиях эксплуатации.

- Разработана методика мониторинга тепловых потерь в тепловых сетях с использованием данных о динамике эволюции искусственно генерируемой «тепловой волны».

- Разработана методика определения оптимальных значений параметров тепловой изоляции тепловых сетей при её проектировании, учитывающая наибольшее количество влияющих факторов.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. Разработана математическая модель эволюции искусственно генерируемой «тепловой волны».

2. Выполнена экспериментальная проверка данной математической модели и предложена формула для расчета расхода теплоносителя по скорости распространения «тепловой волны».

3. Разработан способ тепловых испытаний систем теплоснабжения методом «тепловой волны».

4. Получена формула для расчета оптимальной величины удельных тепловых потерь через изоляцию трубопроводов водяных тепловых сетей.

**Практическая ценность работы заключается в следующем:**

- разработан удобный и надежный способ экспериментального определения тепловых потерь на участках тепловых сетей, не требующий отключения абонентов;

- разработана методика мониторинга тепловых сетей, позволяющая своевременно обнаруживать участки со сверхнормативными тепловыми потерями;

- разработана методика поиска оптимальных значений конструкционных параметров тепловой изоляции на стадии её проектирования;

- разработана методика определения расхода теплоносителя в участках тепловых сетей по скорости распространения в них «тепловой волны».

Разработанная математическая модель, способ экспериментального определения фактических тепловых потерь на участках тепловых сетей, инженерный метод расчета оптимальных конструкционных характеристик тепловой изоляции для различных условий эксплуатации тепловых сетей, а также средства компьютерной поддержки нашли практическое применение в работах по проектированию, энергетическому обследованию и предложению энергосберегающих мероприятий ООО Научно-технический центр «Промышленная Энергетика», ООО «Промэнергоконсалтинг», ООО Инженерно-технический центр «Газпром трансгаз Екатеринбург», ЗАО Научно-технический центр «ЛАГ Инжиниринг», ООО «Газпромэнерго».

Результаты диссертационного исследования использованы при выполнении научно-исследовательской работы «Разработка программного обеспечения и базы данных по расчету потерь тепловой энергии при ее передаче в сетях ООО «Газпромэнерго»».

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается:

- организацией экспериментальных исследований с учетом требований отраслевых нормативных документов, государственных и международных стандартов в области метрологии, теплотехнического контроля;

- применением стандартизованных методов измерений и обработки экспериментальных данных, использованием поверенных средств измерений;

- проведением исследований в условиях промышленной эксплуатации методом активного эксперимента;
- сопоставлением полученных данных с результатами вычислительных экспериментов.

**Объектом исследования** являются тепловые и гидравлические процессы в теплоизолированных трубопроводах систем теплоснабжения.

**Предмет исследования** – температурные и гидравлические режимы теплоизолированных трубопроводов тепловых сетей, возможности их оптимизации и управления ими.

### ***Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика»***

#### ***Соответствие диссертации формуле специальности***

В соответствии с формулой специальности 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика», объединяющей исследования по совершенствованию промышленных теплоэнергетических систем, по разработке и созданию нового и наиболее совершенного теплотехнического и теплового технологического оборудования, в диссертационном исследовании разработана математическая модель теплогидравлического процесса течения жидкости в трубопроводе при искусственном генерировании тепловой нестационарности в виде температурной волны, определены связи между гидравлическими и тепловыми параметрами при движении теплоносителя в трубопроводе в виде формул для определения скорости движения теплоносителя в зависимости от скорости распространения температурной волны в трубопроводе. На основе разработанной математической модели предложен способ определения тепловых потерь, позволяющий своевременно обнаруживать участки со сверхнормативными тепловыми потерями, что обеспечит сбережение как энергетических, так и материальных ресурсов, а также защиту окружающей среды от тепловых выбросов.

#### ***Соответствие диссертации области исследования специальности***

Отражённые в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика»: поиск структур и принципов действия теплотехнического оборудования, которые обеспечивают сбережение энергетических ресурсов, уменьшение энергетических затрат на единицу продукции, сбережение материальных ресурсов, направляемых на изготовление теплопередающего и теплоиспользующего оборудования, защиту окружающей среды.

Пункту 1 «Разработка научных основ сбережения энергетических ресурсов в промышленных теплоэнергетических устройствах и использующих тепло системах и установках» соответствует следующий результат диссертации, отражённый в поставленных задачах и имеющий научную новизну:

✓ математическая модель распространения тепловой волны по участку трубопровода позволяет исследовать связи между гидравлическими и тепловыми процессами, происходящими при турбулентном режиме движения теплоносителя. На основании полученной зависимости разработан способ испытаний тепловых сетей методом «температурной волны».

Пункту 3 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепло- и массопереноса в тепловых системах и установках, использующих тепло. Совершенствование методов расчета тепловых сетей и установок с целью улучшения их технико-экономических характеристик, экономии энергетических ресурсов» соответствует следующий результат диссертации:

✓ теоретические и экспериментальные исследования термогидравлических процессов в трубопроводах тепловых сетей позволяют получить формулу, отражающую зависимость между скоростями распространения «тепловой волны» и движением теплоносителя.

Пункту 7 «Разработка теоретических аспектов и методов интенсивного энергосбережения в тепловых технологических системах» соответствует следующий результат диссертации:

✓ разработанная на основе теоретических и экспериментальных исследований методика определения фактических тепловых потерь в тепловых сетях позволяет своевременно обнаружить участки с завышенными теплотерями.

#### ***На защиту выносятся:***

- метод выбора оптимальных параметров тепловой изоляции трубопроводов тепловой сети, учитывающий конструктивные, климатические, экономические и эксплуатационные факторы;

- зависимость скорости распространения температурной волны от гидродинамического режима течения жидкости в трубопроводе;

- результаты экспериментальных исследований движения температурных волн при различных скоростях жидкости и времени генерирования тепловой нестационарности;

- способ определения поучастковых тепловых потерь в тепловых сетях, позволяющий оперативно оценивать состояние тепловой изоляции без изменения гидродинамических параметров систем теплоснабжения в реальных условиях эксплуатации.

#### ***Апробация работы***

Основные положения диссертации доложены и обсуждены на следующих конференциях: Межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов «Молодые ученые – развитию текстильной и легкой промышленности» (Иваново, 2005 г.), Всероссийской научной конференции студентов и аспирантов «Молодые исследователи регионам» (Вологда 2006 г.), Региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Теплоэнергетика» (Иваново 2006-2007 гг.), XIII Международной научно-технической конференции «Информационная среда вуза» (Иваново, 2006 г.), III Российской Школы-семинара молодых ученых и специалистов «Энергосбережение – теория и практика» (Москва, 2006 г.), III Ивановском инновационном салоне научных достижений Ивановской области «Инновации-2006» (Иваново, 2006 г.), VII Московском международном салоне инноваций и инвестиций (Москва, 2007 г.), Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии – XIV и XVI Бенардосовские чтения» (Иваново, 2007, 2011 гг.), Международной научно-технической конференции «Энергетика 2008: инновации, решения, перспективы» (Казань, 2008 г.), V Всероссийской научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования» (Иваново, 2010 г.). Работа была отмечена дипломами и награждена золотой медалью.

#### ***Публикации***

Основное содержание диссертации опубликовано в 14 печатных работах, в том числе в 3 изданиях, предусмотренных перечнем ВАК.

### ***Структура и объем работы***

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка использованных источников (150 наименований работ) и приложений. Работа содержит 155 страниц, в том числе 117 страниц основного текста и приложения на 38 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее цель и задачи исследования, указаны научная новизна, практическая ценность и основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена анализу современного состояния методов определения и оптимизации тепловых потерь в водяных тепловых сетях.

Вопросами теплоснабжения в нашей стране в разное время занимались С.Ф. Копьев, А.П. Сафонов, Е.Я. Соколов, В.В. Левкович и другие. Ими были заложены принципы создания энергоэффективных и экономичных систем теплоснабжения, разработаны методы испытаний тепловых сетей. В силу особых климатических условий большинства регионов нашей страны и значительной протяженности тепловых сетей вопрос энергосбережения в них особенно актуален. Однако за последние 50 лет методики оптимизации тепловых потерь трубопроводами и проведения испытаний тепловых сетей почти не изменилась.

В настоящее время исследования ведутся в двух основных направлениях: на стадии проектирования – определение оптимальных нормативных тепловых потерь и выбор надежной конструкции тепловой изоляции; на стадии эксплуатации – обеспечение контроля состояния тепловой изоляции в целях поддержания ее теплозащитных свойств в течение продолжительного времени.

Все теплоснабжающие предприятия должны проводить испытания тепловых сетей для определения фактических тепловых потерь согласно РД 34.09.255-97 при отключенных абонентах с обеспечением циркуляции теплоносителя через перемычки на абонентских тепловых пунктах при постоянном расходе теплоносителя и установившемся перепаде температур 8-10 °С. Соблюдение этих требований приводит к необходимости одновременного испытания весьма значительных районов тепловых сетей с большими эксплуатационными затратами. Данная методика не пригодна для участковых испытаний. В то же время тепловые сети ремонтируются частями, с большой разницей во времени. Состояние тепловой изоляции на отдельных участках неодинаково, и поэтому необходимо знать наиболее проблематичные места. Кроме того, желательно проводить испытания без вскрытия теплоизоляционных конструкций и в эксплуатационном режиме.

В разное время предлагались различные способы определения тепловых потерь в водяных тепловых сетях. Все они требуют использования расходомерных устройств и подразумевают проведение измерений в режимах, значительно отличающихся от номинальных, что не может не привести к существенным погрешностям.

Из современных методик следует отметить попытку определять тепловые потери по результатам тепловизионной съёмки. Однако этот метод не даёт достаточной точности в условиях подземной прокладки, так как температура грунта над тепло-трассой зависит не только от теплопотерь в трубопроводах, но и от влажности и состава грунта, глубины залегания и конструкции теплосети, состояния канала и дренажа, утечек в трубопроводах, времени года и других факторов.

Представляет интерес метод, примененный Л.А. Гинтером для определения падения температуры в магистрали водяных тепловых сетей ГРЭС-3 в Ленинградской области (ныне Дубровская ТЭЦ-8 ОАО «ТГК-1»). Падение температуры определялось как разность высот гребней сходственных полуволн на графиках, построенных для концевых сечений участка магистрали. По сути этот метод можно назвать методом «температурной волны», однако в те годы он не нашел должного теоретического и практического обоснования.

Из всего сказанного следует, что в настоящее время не существует надежных методов мониторинга состояния и оптимизации параметров тепловой изоляции водяных тепловых сетей в процессе их эксплуатации, обеспечивающих высокую точность результатов.

В заключении главы сформулированы задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена вопросам оптимизации нормативов тепловых потерь в водяных тепловых сетях и выбору конструкции тепловой изоляции в целях повышения энергетической эффективности системы теплоснабжения.

В качестве критерия оптимальности используется величина совокупных дисконтированных затрат:

$$Z = K_{инв} + \sum_{t=0}^T \frac{\mathcal{E}_t}{(1+R)^t}, \quad (1)$$

где  $K_{инв}$  – капитальные затраты, руб.;  $T$  – горизонт расчета;  $t$  – расчетный год;  $\mathcal{E}_t$  – годовые эксплуатационные расходы, руб.;  $R$  – норма дисконта.

Капитальные затраты определяются типом изоляционной конструкции, диаметром и длиной трубопровода, а также стоимостью монтажа. Эксплуатационные расходы определяются как стоимость годовых тепловых потерь трубопроводами.

Капитальные и эксплуатационные расходы можно выразить либо через удельные тепловые потери, либо через толщину изоляции, тогда можно оптимизировать либо норматив тепловых потерь, либо конструкцию тепловой изоляции.

После преобразований выражение (1) примет вид

$$Z(q) = k_{mp} k_m c_{из} \pi \left[ d_n + \left( e^{\frac{2\pi\lambda_{из} (K(\tau-t_n) - R_n^L)}{q}} - 1 \right) \frac{d_n}{2} \right] \times \\ \times \left( e^{\frac{2\pi\lambda_{из} (K(\tau-t_n) - R_n^L)}{q}} - 1 \right) \frac{d_n}{2} L + \frac{C_m q L n_o 3600 \cdot 10^{-9}}{(1+R)^t}, \quad (2)$$

где  $k_{mp}$  – коэффициент, учитывающий транспортные расходы;  $k_m$  – коэффициент, учитывающий монтажные работы;  $c_{из}$  – стоимость изоляции, руб/м<sup>3</sup>;  $d_n$  – наружный диаметр стенки трубопровода, м;  $\lambda_{из}$  – теплопроводность теплоизоляционного материала в конструкции, Вт / (м · °С);  $K$  – коэффициент дополнительных потерь, учитывающий теплопотери через теплопроводные включения в теплоизоляционных конструкциях, обусловленных наличием в них крепежных деталей и опор;  $\tau$  – температура теплоносителя, °С;  $t_n$  – температура окружающей среды, °С;  $q$  – линейная плотность теплового потока, Вт/п.м;  $R_n^L$  – линейное термическое сопротивление теплопередаче на наружной поверхности изоляции, м°С/Вт;  $C_m$  – стоимость тепловой энергии, руб/ГДж;  $L$  – протяженность теплопровода, м;  $n_o$  – число часов работы теплопровода в год, ч.

Графическое изображение функции  $Z(q)$  представлено на рис. 1.

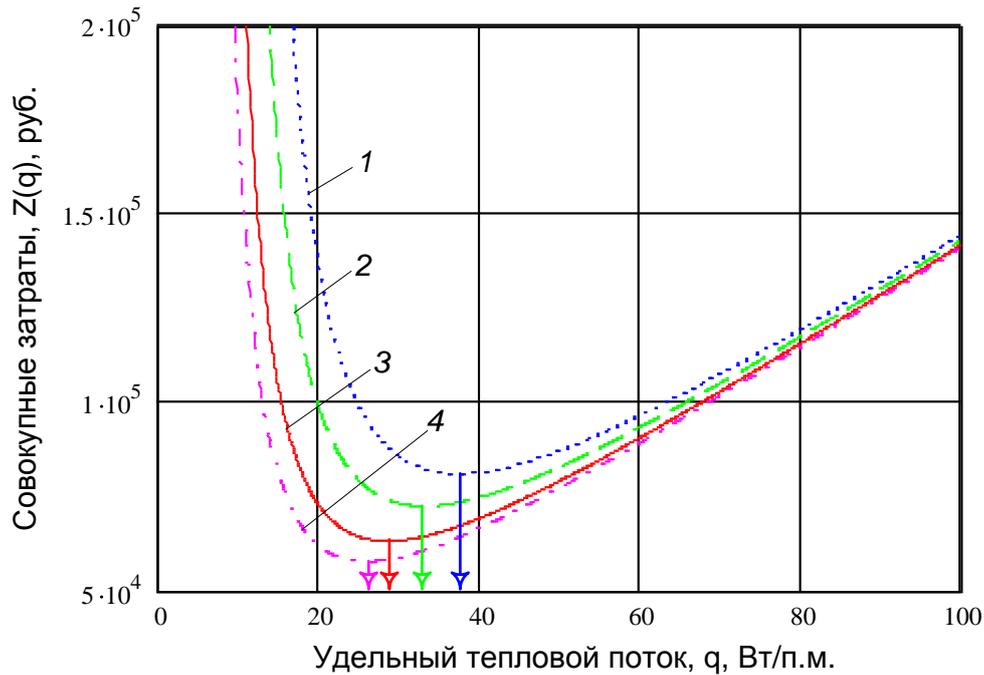


Рис. 1. График зависимости совокупных затрат от удельных линейных тепловых потерь для различных систем теплоснабжения:

1 – Воронежская обл.; 2 – Ивановская обл.(уголь); 3 – Ухта; 4 – Ивановская обл.(газ)

Для каждой конкретной системы теплоснабжения существует свой оптимум

удельных тепловых потерь, соответствующий условию  $\frac{dZ}{dq} = 0$ .

$$\frac{dZ}{dq} = -\frac{1}{250000} \cdot L \cdot \frac{-2500000 k_{mp} k_m c_{uz} \pi^2 \lambda d^2 \tau K e^{-4\pi\lambda \frac{-K\tau + Kt_n + Rq}{q}}}{q^2} +$$

$$+ \frac{2500000 k_{mp} k_m c_{uz} \pi^2 \lambda d^2 t_n K e^{-4\pi\lambda \frac{-K\tau + Kt_n + Rq}{q}}}{q^2} + \frac{9C_m n_o}{(1+R)^t} \quad (3)$$

Оптимальное значение удельных тепловых потерь рассчитывается путем решения уравнения (3). Это дает возможность проводить технико-экономический анализ мероприятий по замене изоляции с выбором теплоизоляционной конструкции.

**Третья глава** посвящена математическому моделированию процесса распространения тепловой волны в трубопроводах при движении в них теплоносителя. Под тепловой волной понимают распространение искусственно созданного на входе в трубопровод кратковременного повышения температуры теплоносителя по длине этого трубопровода и эволюцию его во времени.

Для описания процесса используется ячеечная модель, хорошо зарекомендовавшая себя при моделировании тепломассообмена. Теплота от теплоносителя к стенке трубы передаётся конвекцией, вдоль трубы – теплопроводностью, а от трубы в окружающую среду – также теплопроводностью (через слой теплоизоляции) и конвекцией с наружной поверхности теплоизоляции. Начальное распределение температуры по

длине трассы (в жидкости, трубе и теплоизоляции) рассчитывается для исходного, не возмущенного прохождением тепловой волны, режима.

Если генерация тепловой волны происходит в течение нескольких временных этапов/переходов  $k_v$ , то время, в течение которого в теплопровод поступает перегретый теплоноситель, равно  $k_v \cdot \Delta\tau$ . Здесь  $\Delta\tau$  – продолжительность одного временного этапа (время перехода), в течение которого в трубе произойдут следующие изменения: вода передаст часть теплоты ячейкам стенки трубы, в канал поступит новая порция воды, и вода переместится вдоль канала. Два первых события описываются через функции (векторы) источников:

$$m_{wf}^k = \begin{bmatrix} G_w^k \Delta\tau \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad Q_{wf}^k = \begin{bmatrix} c_w t_{win} G_w^k \Delta\tau \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

считается, что вода подается в первую ячейку. Если расход и температура воды постоянны, то постоянны и оба этих вектора. При генерации тепловой волны температура  $t_{win}$  увеличивается. Для рассматриваемого случая

$$\text{при } k \leq k_v \quad t_{win}^k = \begin{bmatrix} t_{wm} \\ t_{wm} \\ \dots \\ t_{wm} \end{bmatrix}, \quad \text{при } k > k_v \quad t_{win}^k = \begin{bmatrix} t_{w0} \\ t_{w0} \\ \dots \\ t_{w0} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $t_{wm}$  – температура теплоносителя при генерации тепловой волны;  $t_{w0}$  – номинальная температура теплоносителя.

Перемещение воды вдоль канала, то есть вдоль соответствующей ему цепи ячеек, описывается переходной матрицей

$$M_w = \begin{bmatrix} 1-v_{w1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ v_{w1} & 1-v_{w2} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & v_{w2} & 1-v_{w3} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_{w3} & 1-v_{w4} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1-v_{w(n-1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & v_{w(n-1)} & 1-v_{wn} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где  $v_{wi}$  – доля массы воды в ячейке, переходящая в следующую по ходу движения ячейку за один временной переход (предполагается, что обратные переходы, вызванные, например, турбулентностью, отсутствуют или пренебрежимо малы).

$$v_{wi} = V_{wi} \frac{\Delta\tau}{\Delta y} = \frac{G_w \Delta\tau}{m_{wi}}. \quad (7)$$

Элементы матрицы (6) не должны быть отрицательными, что накладывает ограничение на выбор времени перехода при принятом числе ячеек, которое следует из (7) при условии  $v_{wi} \leq 1$ :

$$\Delta\tau \leq \Delta y / V_{wi}, \quad (8)$$

где  $V_{wi}$  – скорость воды.

Уравнения баланса массы и теплоты за один переход описываются матричными соотношениями:

$$\Delta Q^k = \alpha_c^k l \Delta y (t_w^k - t_f^k) \Delta\tau, \quad (9)$$

$$m_w^{k+1} = M_w^k m_w^k + m_{wf}^k, \quad (10)$$

$$Q_w^{k+1} = M_w^k Q_w^k + Q_{wf}^k - \Delta Q^k, \quad (11)$$

$$t_w^{k+1} = \frac{Q_w^{k+1}}{c_w m_w^{k+1}}, \quad (12)$$

где  $\alpha_c^k$  – вектор коэффициентов конвективной теплоотдачи, который может отличаться от одного временного перехода к другому и от одной ячейки к другой;  $l \Delta y$  – площадь поверхности теплоотдачи в одной ячейке.

В это описание входит изменяющаяся температура ячеек стенки трубы  $t_f^k$ , которая должна рассчитываться по модели распространения теплоты в ней.

Распространение теплоты в стенке трубы путем теплопроводности задается переходной матрицей

$$M_f = \begin{bmatrix} 1-d & d & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ d & 1-2d & d & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & d & 1-2d & d & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d & 1-2d & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1-2d & d \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & d & 1-d \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где

$$d = \frac{\lambda_f}{c_f \rho_f} \frac{\Delta\tau}{\Delta y^2} = a_f \frac{\Delta\tau}{\Delta y^2} \quad (14)$$

– доля теплоты, переносимая путем теплопроводности в соседние ячейки из данной за один временной переход ( $\lambda_f$  – коэффициент теплопроводности материала стенки трубы,  $a_f$  – коэффициент ее температуропроводности).

Сама матрица  $M_f$  не предполагает потери или приобретения теплоты, и сумма всех ее элементов по столбцам равна 1. Из условия неотрицательности ее элементов следует еще одно ограничение на выбор  $\Delta\tau$ :

$$\Delta\tau \leq \frac{1}{2} \frac{\Delta y^2}{a_f}, \quad (15)$$

причем из двух  $\Delta\tau$  по (8) и по (15) должно выбираться наименьшее.

Передача теплоты от стенки трубы в окружающую среду описывается соотношением

$$\Delta Q_e^k = \frac{1}{R_i + R_0} \Delta y (t_f^k - t_0) \Delta\tau, \quad (16)$$

где  $R_i$  и  $R_0$  – термические сопротивления 1 погонного метра тепловой изоляции и наружной поверхности изоляции соответственно.

Таким образом, эволюция теплоты и температуры в ячейках стенки трубы задается матричными равенствами

$$Q_f^{k+1} = M_f Q_f^k + \Delta Q^k - \Delta Q_e^k, \quad (17)$$

$$t_f^{k+1} = \frac{Q_f^{k+1}}{c_f m_f}, \quad (18)$$

где считается, что теплофизические свойства материала стенки не зависят от температуры и постоянны, что определяет и постоянство матрицы  $M_f$ , а  $\Delta Q^k$  рассчитывается по формуле (9).

Уравнения (9)–(12), дополненные (16)–(18), представляют полную расчетную модель процесса в одномерном приближении, которая при известном начальном состоянии системы позволяет рассчитывать изменение во времени ее уже распределенных в продольном направлении теплофизических параметров. Данная расчетная модель реализована в виде компьютерной программы, с помощью которой проведены вычислительные эксперименты. На рис. 2 в качестве примера представлены результаты моделирования эволюции тепловой волны для участка трубопровода длиной 450 м, диаметром 159х4,5 мм с нанесенным на него слоем теплоизоляции толщиной 50 мм с теплопроводностью 0,055 Вт/мК. Скорость теплоносителя (воды) – 1 м/с, номинальная температура 70 °С. Тепловая волна генерируется в течение 15 секунд с температурой 90 °С.

Расчеты показали, что скорость распространения температурной волны (скорость перемещения максимума на кривой  $t_w(l)$ ) меньше скорости движения теплоносителя, что наблюдалось во всех известных экспериментальных исследованиях. Практический интерес представляет исследование зависимости величины  $w = \frac{v_q}{v_w}$  – отношения скорости распространения тепловой волны к скорости потока теплоносителя, от параметров процесса.

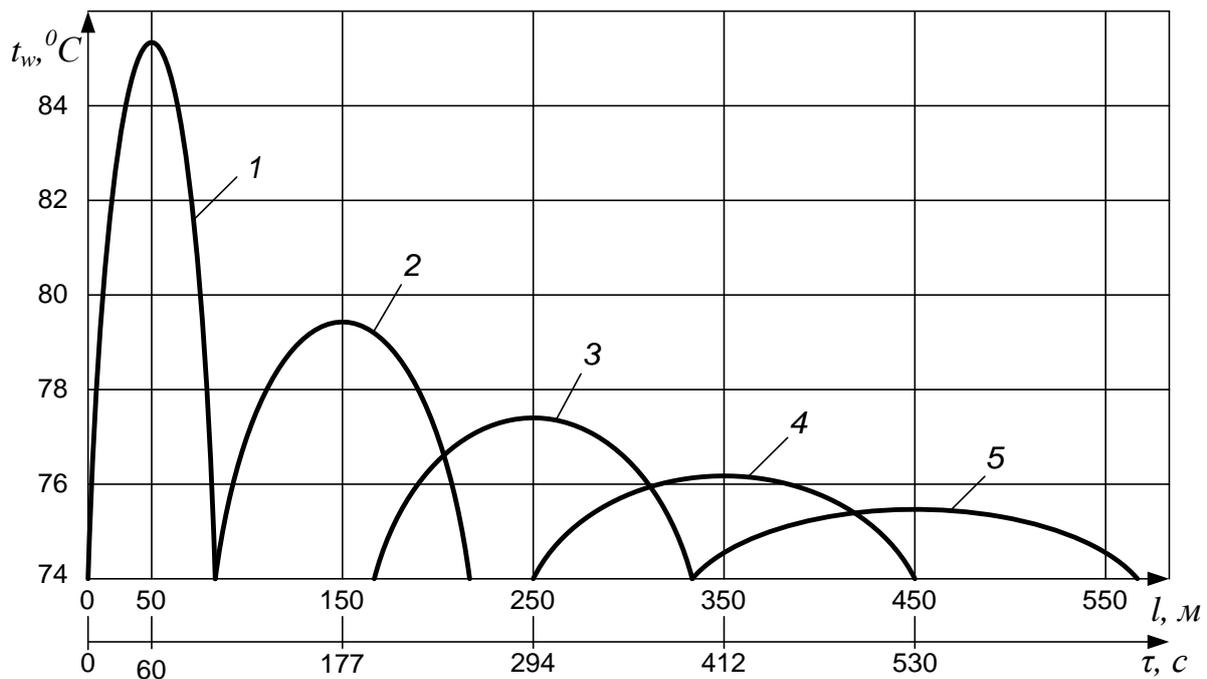


Рис. 2. Эволюция тепловой волны в теплоизолированном трубопроводе:  
 1 – через 60 с после генерации; 2 – 177 с; 3 – 294 с; 4 – 412 с;  
 5 – 530 с (когда поток теплоносителя достиг конца участка)

В результате вычислительных экспериментов установлено, что:

1) увеличение коэффициента теплоотдачи от потока к стенке трубы приводит к отставанию тепловой волны от потока, то есть к уменьшению  $w$ ;

2) влияние толщины стенки трубопровода на величину  $w$  можно учесть параметром  $\delta_0 = \frac{D c_w \rho_w}{\delta c_f \rho_f}$  или, при постоянных плотностях и теплоёмкостях теплоносителя и материала стенки, отношением  $D/\delta$ ;

3) состояние теплоизоляции трубопровода (величина теплопотерь) не влияет на величину  $w$ ;

4) влияние переноса теплоты теплопроводностью вдоль стенки трубы пренебрежимо мало.

Полученные результаты позволяют дать качественное описание исследуемого процесса. При прохождении тепловой волны через некоторое сечение теплопровода теплоноситель, имеющий температуру  $t_{wm}$ , передает теплоту стенке трубы, увеличивая её температуру до величины  $t_{fv} > t_{wo}$ , и, потеряв часть своей теплоты и охладившись, движется вниз по потоку, продолжая и дальше постепенно охлаждаться до температуры  $t_{wo}$ . На освободившееся место приходит жидкость с температурой  $t_{wo}$ , которая получает теплоту от стенки. Таким образом, температура жидкости, находящейся во фронте тепловой волны, уменьшается от  $t_{wm}$  до  $t_{wo}$ , а температура жидкости, движущейся за фронтом, увеличивается. При этом максимальное значение температуры теплоносителя уменьшается, а длина участка, на котором наблюдается повышение температуры, увеличивается.

Так как вычислительный эксперимент выявил зависимость исследуемой величины  $w$  от двух параметров процесса –  $\alpha_c$  и  $\delta_0$ , и, учитывая, что при вынужденной конвекции  $\alpha_c \sim Re^{0,8}$ , будем искать расчетную формулу в виде  $w=f(Re, \delta)$ .

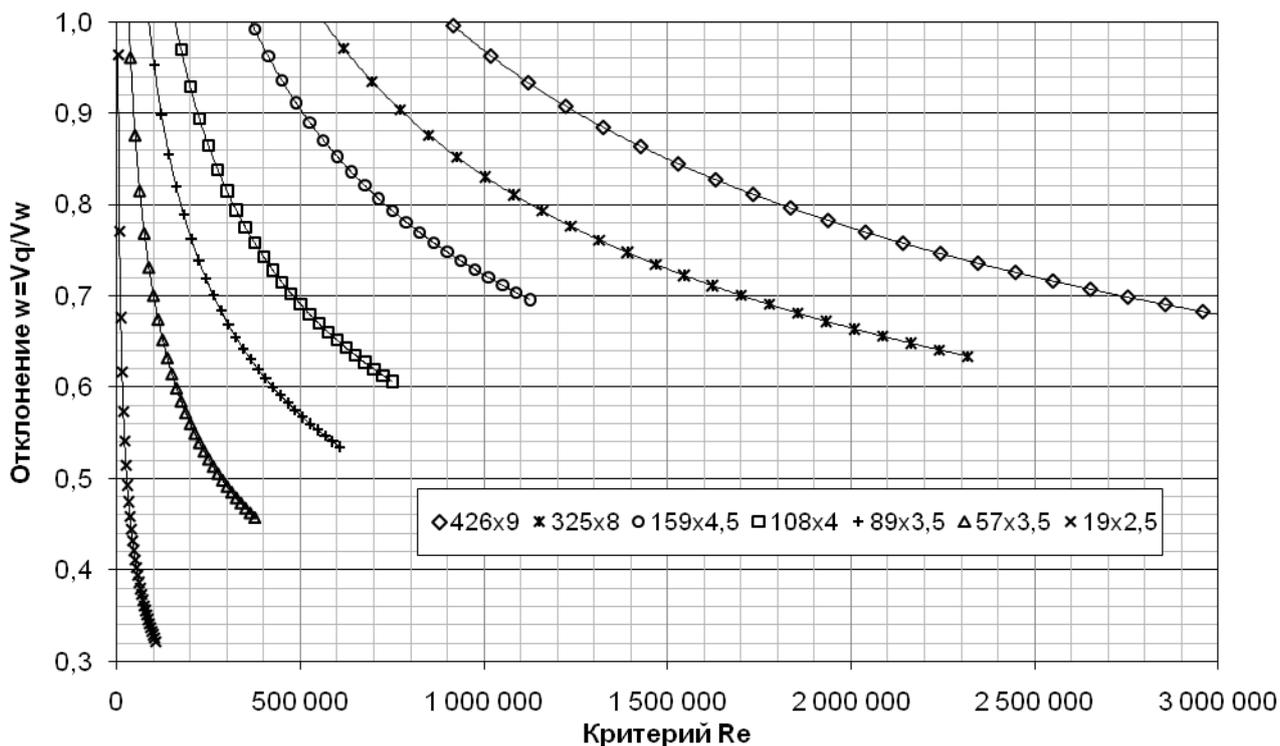


Рис. 3. Результаты вычислительного эксперимента по предлагаемой методике – зависимость  $w=f(Re)$  для различных диаметров труб

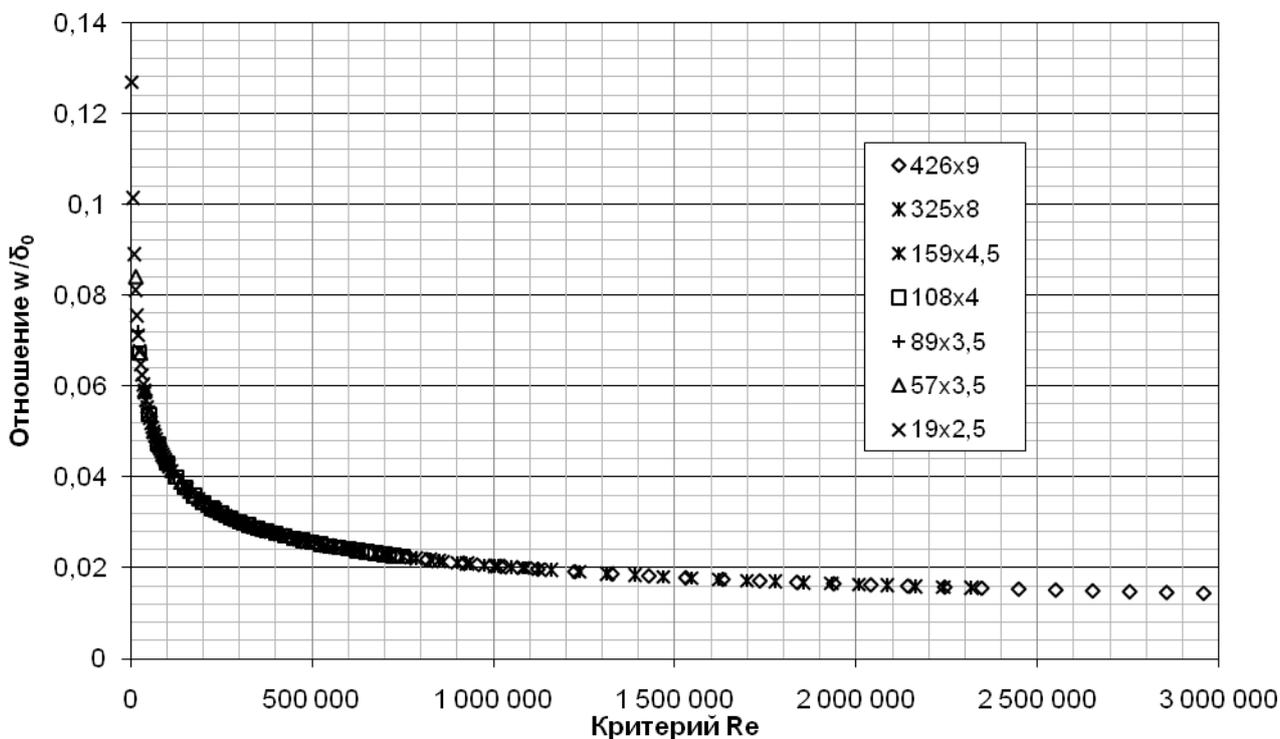


Рис. 4. Обобщение результатов вычислительных экспериментов в координатах  $w/\delta_0=f(Re)$

На рис. 3 в координатах  $w$  и  $Re$  представлены результаты вычислительных экспериментов по предлагаемой методике для различных диаметров труб. Обобщение

этих результатов в координатах  $w/\delta_0$  и  $Re$  (рис. 4) показывает, что влияние геометрических размеров трубопровода полностью учитывается параметром  $\delta_0$ .

Полученная зависимость  $w/\delta_0=f(Re)$  вполне удовлетворительно описывается формулой

$$w/\delta_0=1,7642 \cdot Re^{-0,3226}. \quad (19)$$

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям, анализу результатов и достоверности предлагаемого метода определения потерь тепловой энергии через изоляцию трубопроводов.

Для проведения экспериментальных исследований была создана лабораторная установка, схема которой представлена на рис. 5.

Экспериментальные исследования проводились следующим образом: при определенном расходе теплоносителя тепловая волна генерировалась путем включения-отключения водонагревателя на различное время, с различной амплитудой и различной мощностью, затем расход жидкости изменялся и испытания повторялись. Следует отметить, что на одних параметрах расхода жидкости, времени включения и отключения источника теплоты, мощности водонагревателя в каждом режиме эксперимент повторялся не менее 9 раз. Следующим этапом экспериментальных исследований являлось нанесение теплоизоляционного слоя на подающую линию (7) экспериментальной установки и испытания повторялись. На завершающем этапе исследований эксперименты производились после замены стальных трубопроводов на другие виды, применяемые в теплоснабжении (полипропилен, металлопластик).

Контроль теплотехнических параметров осуществлялся с помощью современных поверенных высокоточных приборов различного принципа действия. Измерения температур на концах участков проводились датчиками термосопротивления (9, 10). Все датчики были предварительно откалиброваны. Результаты замеров корректировались с учетом калибровки. Время начала замеров всем регистраторам задавалось одинаковым, замеры проводились с шагом в 1 секунду и фиксировались в памяти прибора-регистратора (5). Расход теплоносителя замерялся расходомером вихревого типа (3) и контролировался портативным ультразвуковым расходомером (14). Тепловая мощность водонагревателя контролировалась ваттметром. Инфракрасная картина прохождения тепловой волны фиксировалась с помощью тепловизора матричного типа. Данные со всех измерительных приборов поступали в ЭВМ, после чего обрабатывались.

Общий вид серии тепловых волн при равных значениях времени включения и отключения источника генерации тепловых волн (водонагревателя) представлен на рис. 6.

Время движения тепловой волны определялось по времени движения пика гребня волны (рис. 7).

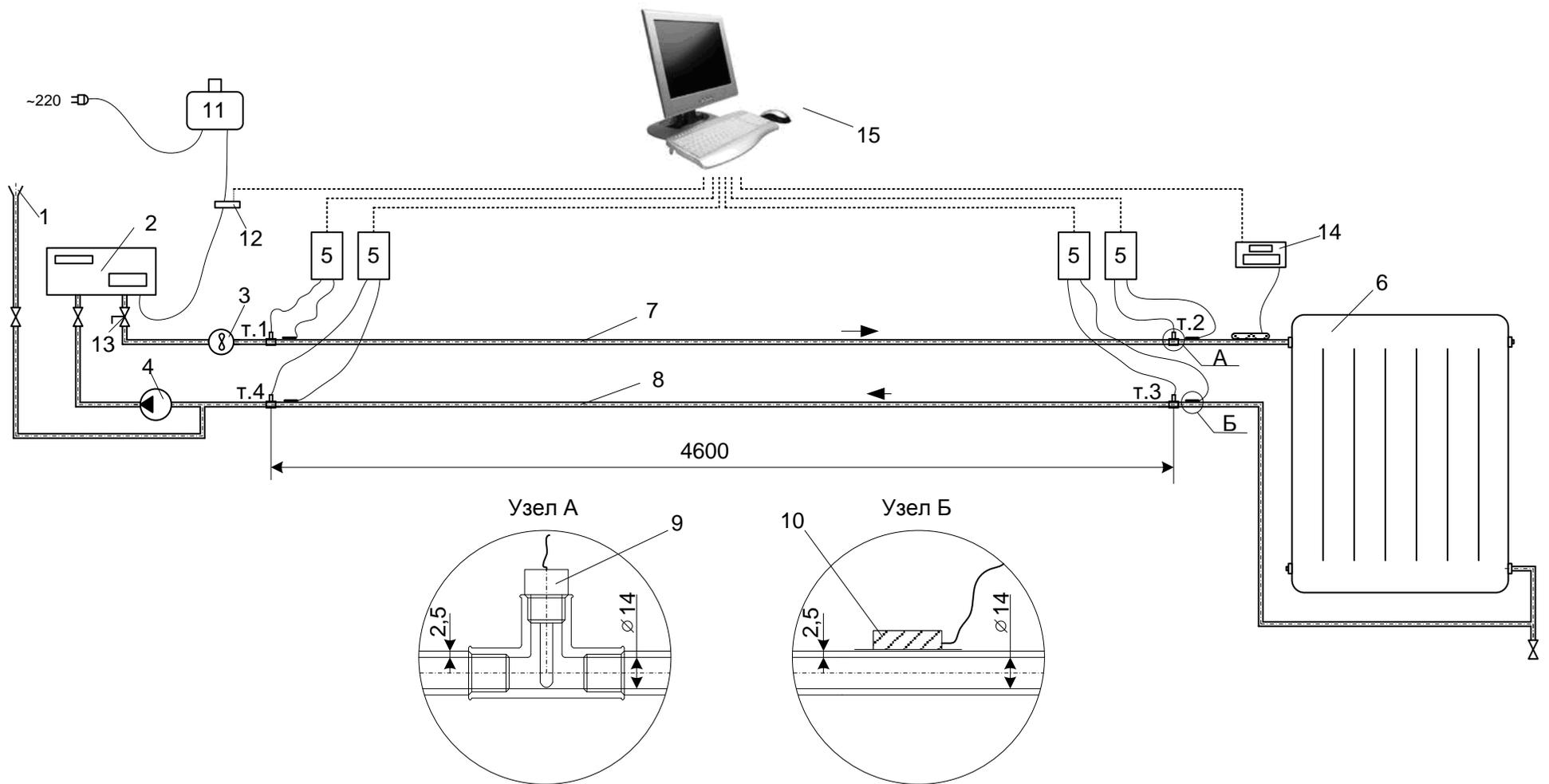


Рис. 5. Схема экспериментальной установки:

- 1 – заливная воронка; 2 – регулируемый электрический водонагреватель; 3 – расходомер; 4 – циркуляционный насос;  
 5 – регистратор температуры; 6 – алюминиевый радиатор; 7 – прямой трубопровод; 8 – обратный трубопровод;  
 9 – термосопротивление погружного типа; 10 – термосопротивление поверхностного (накладного) типа;  
 11 – лабораторный автотрансформатор (латтер); 12 – ваттметр; 13 – регулирующая арматура;  
 14 – ультразвуковой расходомер; 15 – ЭВМ; т.1 – т.4 – места измерения температур

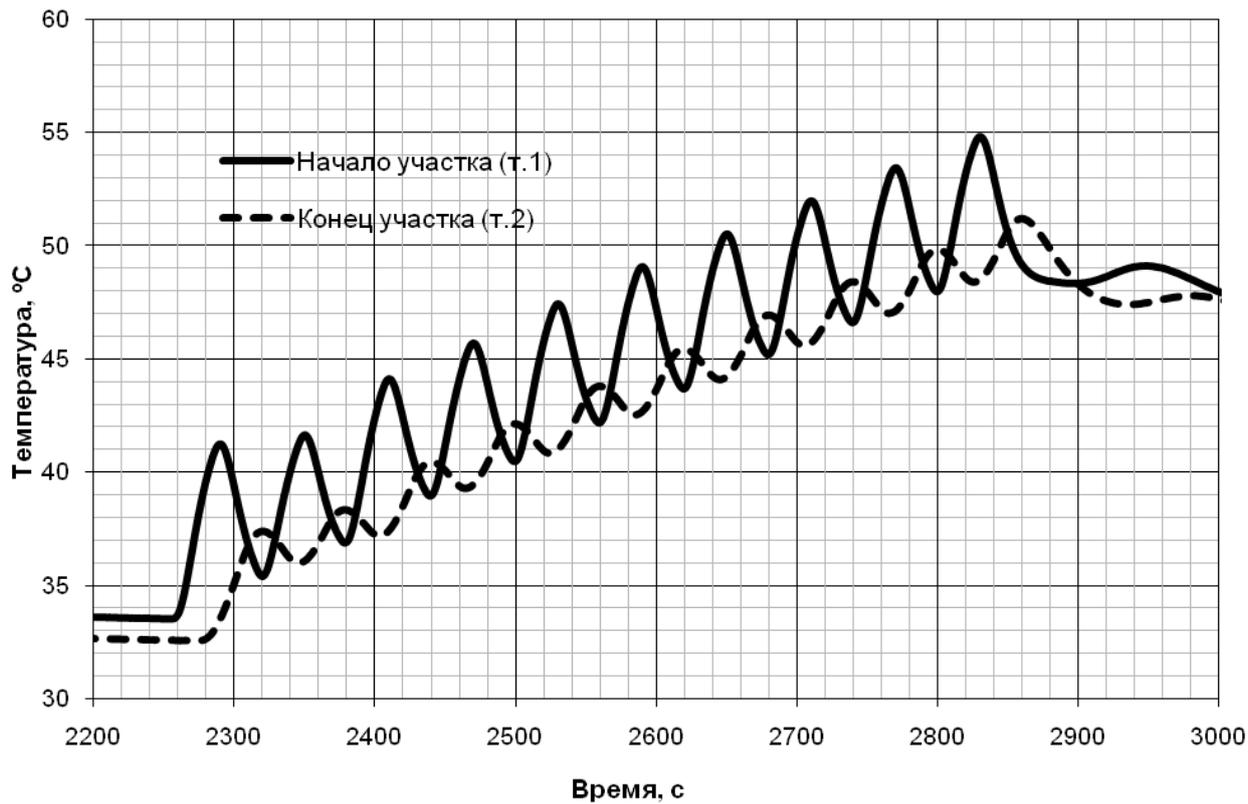


Рис. 6. Общий вид серии тепловых волн

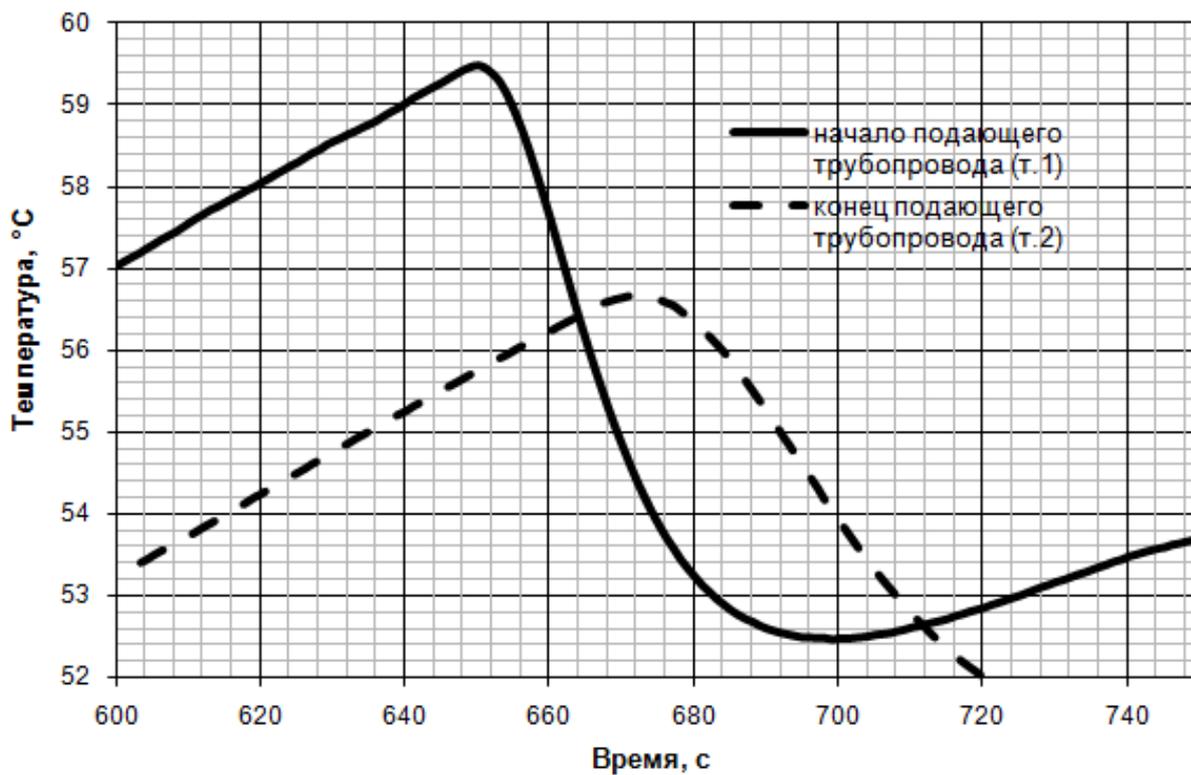


Рис. 7. Пример регистрации движения тепловой волны во времени

Результаты экспериментальных исследований подтвердили теоретически полученное различие времени движения теплоносителя и распространения тепловой волны и позволили установить зависимость между этими параметрами. Обнаружено, что наличие тепловой изоляции незначительно влияет на время прохождения тепловой волны (рис. 8).

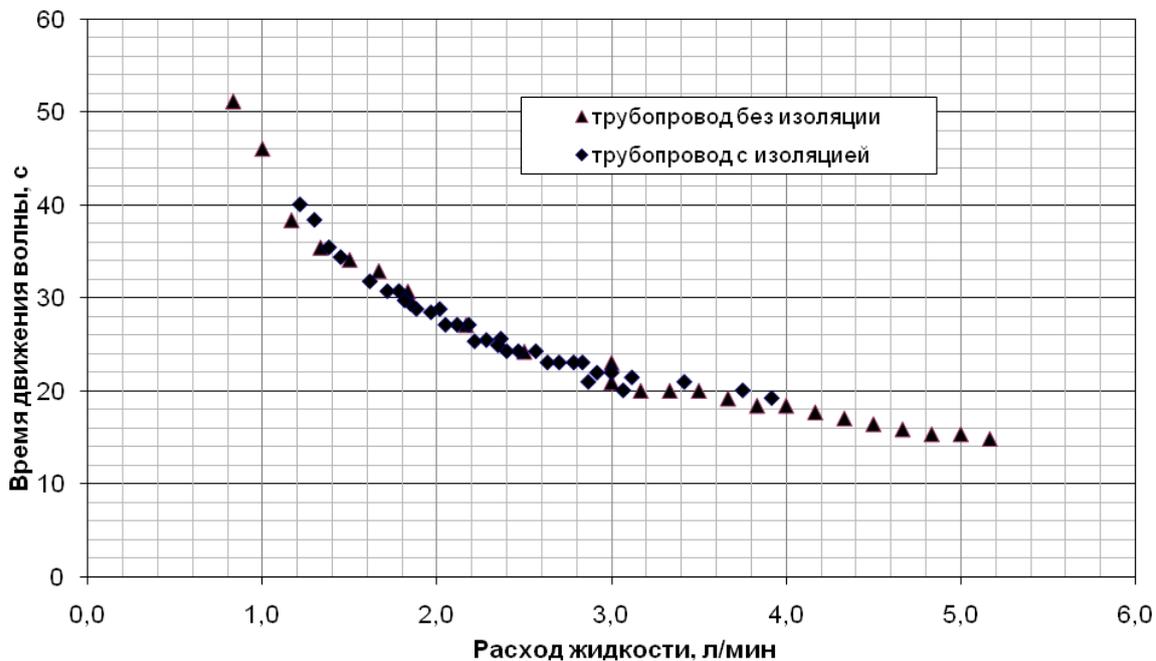


Рис. 8. Результаты экспериментов при наличии и отсутствии тепловой изоляции

На рис. 9 представлено сопоставление теоретических и экспериментальных данных, обнаружившее хорошее совпадение результатов.

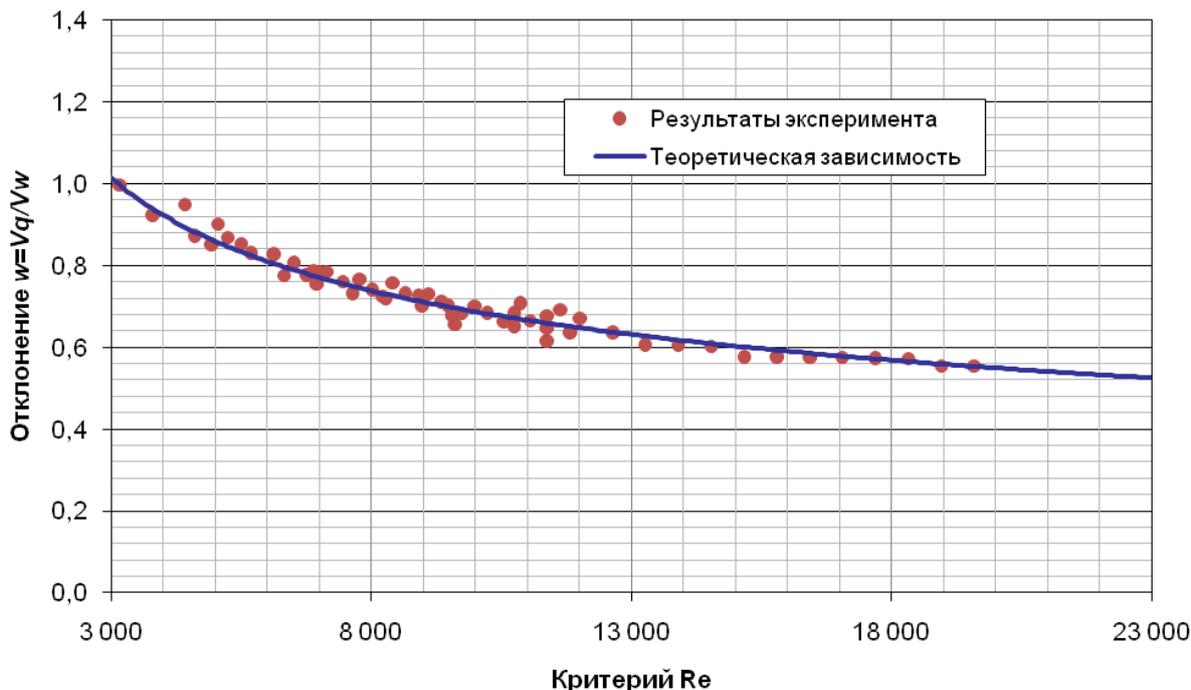


Рис. 9. Сравнение полученной зависимости с результатами экспериментальных исследований

Как видно из рис. 9, расхождение не превышает 3 %.

На рис. 10 показаны результаты экспериментальной проверки влияния толщины стенки на скорость распространения тепловой волны. Совпадение с теоретическими результатами очень хорошее.

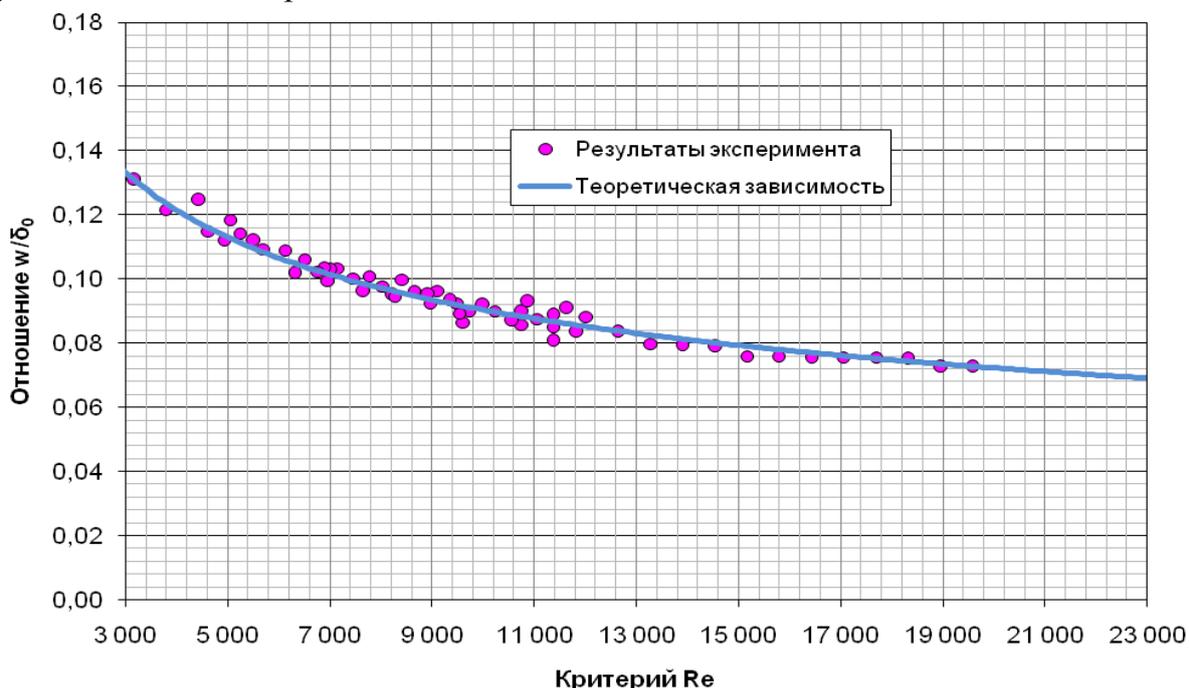


Рис. 10. Результаты экспериментов на стальном трубопроводе

При проведении экспериментальных исследований на пластиковых трубопроводах зависимость отношения скоростей  $w$  от критерия  $Re$  имеет вид, представленный на рис. 11.

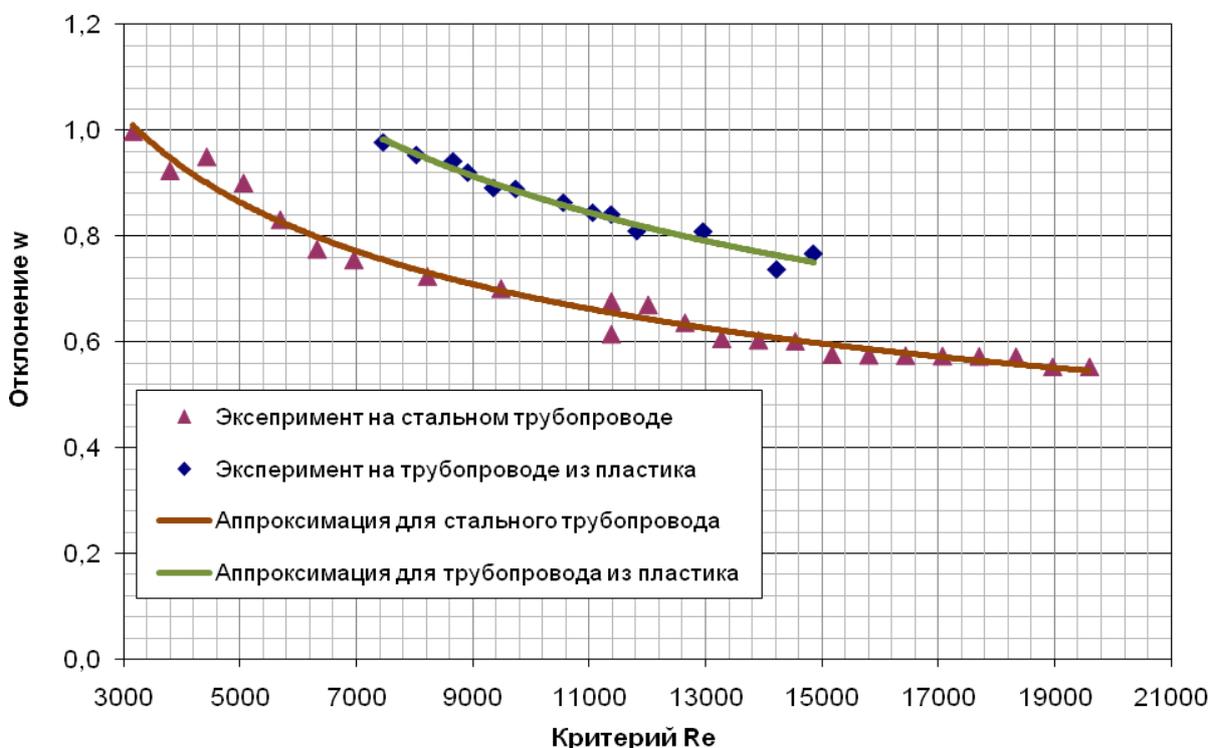


Рис. 11. Экспериментальная зависимость отношения скоростей движения тепловой волны и жидкости от числа  $Re$

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования на лабораторной установке полностью подтвердили теоретически полученную зависимость (19).

В целях подтверждения достоверности полученных результатов выполнено их сопоставление с результатами обследования действующих тепловых сетей объектов ОАО «Газпром» и ОАО «СИБУР Холдинг» в реальных условиях эксплуатации. Измерения проводились на участках с различными диаметрами трубопроводов и расходами теплоносителя. Под изоляционную конструкцию устанавливались регистраторы температуры. Тепловая волна генерировалась путем включения дополнительной горелки на котлоагрегате или дополнительного котла либо включением другого теплогенерирующего устройства.

Сводные результаты производственных экспериментов на различных диаметрах трубопроводов, расходах теплоносителя, а также других различных условиях генерирования волны и условий эксплуатации представлены на рис. 12.

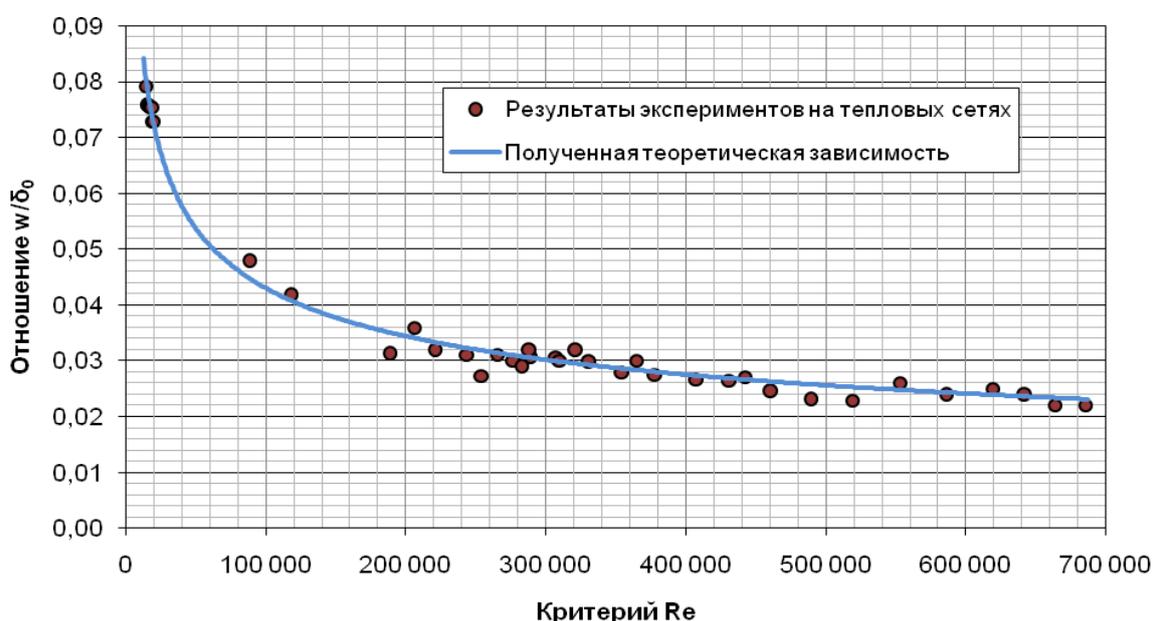


Рис. 12. Сводные результаты производственных экспериментов

Результаты показали, что предлагаемая методика с достаточной точностью может быть успешно использована для определения величины расхода теплоносителя с погрешностью не более 5 %. Оценка погрешности при теплотехнических измерениях производилась согласно действующим нормативным документам и отраслевым стандартам.

**Пятая глава** посвящена разработке способа тепловых испытаний систем теплоснабжения методом «тепловой волны».

В методике описаны ограничения на использование данного способа, условия применения, представлены формулы для расчета длительности генерирования волны, расстояния между датчиками для конкретных участков тепловой сети.

Методика включает три этапа: подготовка к испытаниям, проведение испытаний и обработка результатов.

На подготовительном этапе производится ознакомление с обстановкой предстоящих испытаний, согласовывается вопрос о длине, высоте и количестве полуволн и волн, которые необходимо осуществить в процессе испытания. При этом необходимо, чтобы полуволны имели возможно большую продолжительность (но не свыше часа) и меньшую высоту, чтобы форма волны приближалась к симметричной, т.е.

чтобы продолжительность возрастания температур приближалась к продолжительности их убывания.

При выборе времени для проведения испытаний на участках открытых водяных сетей, во избежание погрешностей, обусловленных переменным расходом теплоносителя, необходимо, чтобы это время не совпало с часами суток, когда происходит резкое изменение расхода теплоносителя.

В подготовительный период также производится определение минимального количества отсчетов температур и максимального интервала времени между отсчетами.

В процессе испытаний производится генерирование ряда температурных волн и регистрирование их термометрами в начальном и конечном сечениях участка.

Для того чтобы потери тепловой энергии, определенные по данным испытания, возможно ближе подходили к действительным, следует выбирать такие дни для проведения испытаний, которым бы предшествовали один-два дня с постоянной температурой воздуха, близкой к температуре в день испытания.

Отсчет температур следует начинать по возможности в период спокойного течения температурного графика. Прекращение отсчетов относится к тому моменту, когда число последних достигнет установленного расчетом минимума.

Обработка результатов проводится следующим образом. На основании данных регистрации температур во времени строятся графики температур в начальном и конечном сечениях трубопровода (рис. 13). На графиках отмечаются сходственные волны, предназначенные для определения скорости движения волны и потерь тепла за время движения волны. Значение времени прохождения температурной волны определяется как расстояние между центрами тяжести сходственных полуволн.

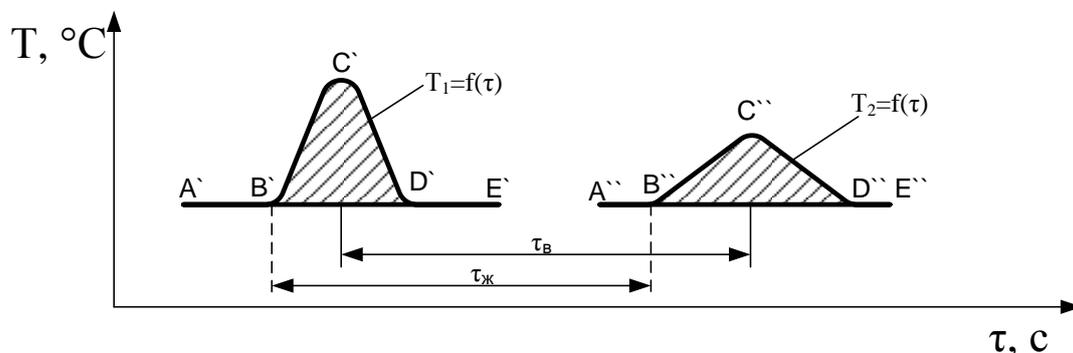


Рис. 13. Размытие волн

Окончательная формула для расчета потерь теплоты в водяных тепловых сетях имеет вид

$$Q_{nom} = \left( \frac{v_q}{a\delta_0} \left( \frac{v_w}{d} \right)^b \right)^{\frac{1}{b+1}} \frac{\pi d^2}{4} c_w \left( \int T_1 d\tau - \int T_2 d\tau \right) \frac{1}{\tau_q}, \quad (20)$$

где  $v_q$  – скорость распространения тепловой волны, м/с;  $a=1,7642$ ,  $b=0,3226$  – эмпирические коэффициенты, полученные в ходе вычислительных экспериментов;  $v_w$  – кинематическая вязкость жидкости,  $m^2/c$ .

Производственные испытания на реальных разветвленных тепловых сетях показали, что предлагаемая методика может быть успешно использована для определения величины потерь тепловой энергии при ее транспортировке, а также с достаточной точностью расхода теплоносителя.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Критический анализ существующих методик экспериментального определения тепловых потерь в водяных тепловых сетях показывает, что имеются трудности в определении точных значений фактических теплотерь ввиду отсутствия эффективного и доступного метода контроля изоляции, а также простого и надежного способа испытаний тепловых сетей в условиях эксплуатации.

2. Разработана математическая модель распространения искусственно генерируемой «тепловой волны» в трубопроводах и выполнена её экспериментальная проверка.

3. Использование математической модели «тепловой волны» позволило получить формулу для расчета расхода теплоносителя на участке трубопровода по измеренной величине скорости «тепловой волны», а также разработать методику для своевременного обнаружения участков тепловой сети со сверхнормативными тепловыми потерями.

4. Разработан простой и надежный способ испытаний тепловых сетей на предмет определения тепловых потерь, не требующий отключения абонентов.

5. Оценка существующих методик нормирования тепловых потерь трубопроводами тепловых сетей говорит о невозможности учитывать ряд факторов, определяющих эффективность работы системы теплоснабжения.

6. Разработана методика определения оптимальных значений параметров тепловой изоляции тепловых сетей на стадии её проектирования, отличающаяся учетом большего количества режимных и конструктивных параметров.

7. Результаты исследований получили практическое использование:

- при проектировании обоснованной конструкции тепловой изоляции тепловых сетей ООО НТЦ «Промышленная Энергетика»;

- испытаниях тепловых сетей на тепловые потери ООО ИТЦ «Газпром трансгаз Екатеринбург»;

- энергетических обследованиях как промышленных, так и жилищно-коммунальных тепловых сетей;

- разработке технико-экономических обоснований по замене тепловой изоляции тепловых сетей;

- выполнении научно-исследовательской работы «Разработка программного обеспечения и базы данных по расчету потерь тепловой энергии при ее передаче в сетях ООО «Газпромэнерго»».

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК*

1. Математическое моделирование процесса распространения тепловой волны в трубопроводах / Н.Н. Елин, А.Н. Корягин // Промышленная энергетика. – 2009. – № 1. – С. 36–40.

2. Оптимизация конструкций тепловой изоляции трубопроводов / В.П. Созинов, С.М. Кулагин, А.Н. Корягин // Энергосбережение и водоподготовка. – 2007. – № 2. – С. 50–51.

3. Техничко-экономическое обоснование выбора удельных тепловых потерь трубопроводами / В.П. Созинов, С.М. Кулагин, А.Н. Корягин // Вестн. ИГЭУ. – 2006. – Вып. 4. – С. 27–29.

### *Основные публикации в других изданиях*

4. Распространение тепловой волны в трубопроводах / А.Н. Корягин // Энергетика – 2008: инновации, решения, перспективы: материалы докл. междунар. науч.-техн. конф. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2008. – С. 85–88.
5. Решение оптимизационных задач в теплоэнергетике с помощью программного средства MATHCAD / С.М. Кулагин, А.Н. Корягин // Информационная среда вуза: материалы XIII междунар. научн.-техн. конф. / Иван. гос. архит.-строит. ун-т. – Иваново, 2006. – С. 570–573.
6. К вопросу об определении потерь при транспортировке теплоносителя / А.Н. Корягин // Состояние и перспективы развития энерготехнологии. XIV Бенардосовские чтения: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2007. – С. 58.
7. Определение поучастковых потерь тепловой энергии / В.П. Созинов, А.Н. Корягин // Состояние и перспективы развития электротехнологии. XVI Бенардосовские чтения: материалы междунар. науч.-техн. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2011. – С. 148–151.
8. Экспериментальное исследование способа тепловых испытаний тепловых сетей методом «температурной волны» / П.А. Шомов, А.А. Генварев, С.М. Кулагин, А.Н. Корягин // Энергосбережение – теория и практика: материалы III Российской Школы-семинара молодых ученых и специалистов. – Москва, 2006. – С. 132–136.
9. К вопросу нормативов тепловых потерь в тепловых сетях / А.Н. Корягин // Молодые исследователи регионам: тр. всерос. науч. конф. студ. и асп. / Вологод. гос. техн. ун-т. – Вологда, 2006. – Т. 1. – С. 203–204.
10. Снижение теплопотерь в тепловых сетях / В.П. Созинов, А.Н. Корягин // Повышение эффективности энергетического оборудования: материалы V Всероссийской науч.-практ. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2010. – С. 280–284.
11. Повышение эффективности теплоснабжения газокompрессорных станций / В.П. Созинов, А.Н. Корягин // Молодые ученые – развитию текстильной и легкой промышленности: тез. докл. межвуз. науч.-техн. конф. асп. и студ. / Иван. гос. текст. акад. – Иваново, 2005. – С. 228–229.
12. Тепловые испытания тепловых сетей методом «температурной волны» / А.Н. Корягин // Теплотехника: тез. докл. регион. науч.-технич. конф. студ. и асп. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2006. – С. 32–33.
13. Анализ методов определения потерь теплоты в водяных сетях / А.Н. Корягин // Теплоэнергетика: тез. докл. регион. науч.-технич. конф. студ. и асп. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2007. – С. 44–46.
14. Повышение эффективности систем теплоснабжения за счет оптимизации и мониторинга тепловых потерь / П.А. Шомов, А.А. Генварев, С.М. Кулагин, А.Н. Корягин // Материалы III Ивановского инновационного салона научных достижений Ивановской области. – Иваново. – 2006. – С. 181–182.

---

**КОРЯГИН Алексей Николаевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ  
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА  
ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ И ОПТИМИЗАЦИИ  
ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ**

Специальность 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

Подписано в печать 19.09.2011. Формат 50X84 1/16.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,39.

Тираж 100 экз. Заказ № 68.

ФГБОУВПО «Ивановский государственный  
энергетический университет имени В.И. Ленина»

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ

153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.