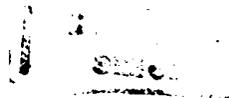


05.13.18

М 693



На правах рукописи

Миханькова Юлия Олеговна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ
РЕЖИМОВ ТРУБОПРОВОДОВ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

**Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы
программ»**

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

Челябинск
2002

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Панферов В.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники
Российской Федерации
Торопов Евгений Васильевич;
кандидат технических наук
Ветров Вячеслав Иванович.

Ведущая организация – ОАО «Челябинские тепловые сети».

Защита диссертации состоится 22 мая 2002 г., в 14 часов,
на заседании диссертационного совета Д212.298.02 по присуждению
ученых степеней в Южно-Уральском государственном университете
по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-
Уральского государственного университета.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, просим
выслать по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76,
ЮУрГУ, ученый совет, тел.39-91-23.

Автореферат разослан «___» апреля 2002 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук,
профессор



Чернявский А.О.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Современные системы теплоснабжения представляют собой сложный комплекс установок и устройств, работа которых характеризуется взаимосвязанностью режимов. Нарушение нормального режима работы в одном из звеньев системы неизбежно отражается на работе остальных ее частей. Положение осложняется также и тем, что тепловые сети обычно отличаются большой протяженностью и разветвленностью трубопроводных схем: радиусы теплоснабжения достигают 15 – 20 км, а единими системами теплоснабжения охватываются крупные промышленные центры и жилые массивы. Нагрузка систем теплоснабжения изменяется как в течении суток и по дням недели, так и в зависимости от температуры наружного воздуха. В указанных условиях надежная и экономичная работа систем теплоснабжения возможна только при применении современных систем автоматизированного управления. К сожалению, применяемые в настоящее время системы управления процессами теплоснабжения недостаточно совершенны, поэтому необходимы разработка и внедрение наиболее эффективных систем с обратной связью по параметрам теплового и гидравлического режимов. Вместе с тем, решение этой крупной проблемы сдерживается, в основном, из-за отсутствия надежного алгоритмического обеспечения таких систем. Известные в литературе модели и алгоритмы контроля и управления процессами теплоснабжения получены зачастую путем использования ряда серьезных упрощений, вследствие этого они недостаточно точны и имеют ограниченную область применения. Это, как правило, аналитические соотношения, полученные в 60 – 70 годы. В связи с этим, крайне необходимо решение задач синтеза уточненных структур (с детальным учетом физики процессов) и настройки моделей применительно к современным системам управления процессами теплоснабжения.

Целью работы является синтез структуры и разработка алгоритмов параметрической идентификации моделей применительно к современным системам управления процессами теплоснабжения. Поставленная цель предопределила аппарат исследования: математическое моделирование тепловых режимов процессов теплоснабжения, численные методы решения дифференциальных уравнений и нелинейного программирования, теория идентификации математических моделей, теория алгоритмов и экспериментальная проверка полученных результатов.

Научная новизна

В соответствии с физикой процессов определены структуры моделей охлаждения и замерзания отключенного теплопровода и разработаны численные варианты этих моделей. Модели позволяют, в частности, учитывать зависимость теплофизических свойств участников теплообмена от температуры и другие нелинейные соотношения.

Разработаны и апробированы различные варианты алгоритмов параметрической идентификации моделей тепловых режимов (как стационарных, так и нестационарных). Решена задача определения координаты начала оледенения и оценки минимально допустимой скорости движения теплоносителя. Разработана численная модель разогрева холодного теплопровода при его заполнении, позволяющая, в частности, оценить координату замерзания переднего фронта теплоносителя.

На защиту выносятся:

- 1). математические модели процессов охлаждения и замерзания неподвижного теплоносителя;
- 2). алгоритмы и результаты идентификации модели охлаждения отключенного теплопровода;
- 3). алгоритмы идентификации стационарного распределения температуры теплоносителя рабочего теплопровода;
- 4). алгоритм расчета координаты замерзания движущегося теплоносителя по нормативным удельным теплотерям;
- 5). алгоритм расчета разогрева холодного трубопровода при его заполнении.

Практическая ценность работы. Результаты работы могут быть использованы для контроля и управления тепловыми режимами процессов теплоснабжения, в частности, для выбора наиболее экономичного варианта ликвидации аварийных ситуаций (со сливом или без слива теплоносителя из отключенного теплопровода). Алгоритм определения координаты начала замерзания теплоносителя по длине трубопровода рекомендуется для вычисления минимально допустимой скорости его движения, например, в развивающихся (проектируемых) системах. Алгоритм идентификации стационарного распределения температуры по длине теплопровода может быть использован как для оценки термического сопротивления тепловой изоляции, что достаточно интересно для служб эксплуатации, так и для проверки качества выполнения теплоизоляционных работ. Алгоритм расчета разогрева холодного трубопровода позволяет оценить возможность безаварий-

ного запуска, например, систем отопления зданий в зимний период, т.е. без разрушения заполняемых трубопроводов замерзшим теплоносителем.

Конкретные модели и алгоритмы их параметрической настройки прошли модельные испытания и рекомендуются для использования в АСУ процессами теплоснабжения. Использование этих алгоритмов в учебном процессе вузов и колледжей позволит существенно повысить качество подготовки специалистов, ее эффективность.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции «Энергетики и металлурги настоящему и будущему России» (г. Магнитогорск, 1998 г.); на XVIII Российской школе по проблемам проектирования неоднородных конструкций, посвященной 75-летию со дня рождения академика В.П. Макеева (г. Миасс, 1999 г.); на Всероссийской XXX научно-технической конференции «Актуальные проблемы современного строительства» (г. Пенза, 1999 г.); на II Всероссийской научно-технической конференции «Компьютерные технологии в науке, проектировании и производстве» (г. Нижний Новгород, 2000 г.); на Международной конференции, посвященной 300-летию металлургии Урала и 80-летию металлургического факультета и кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» (г. Екатеринбург, 2000 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы из 122 наименований. Объем работы составляет 138 страниц.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы работы и формулируются основные направления исследований.

В первой главе приводится анализ состояния проблемы разработки моделей и алгоритмов для оценки теплового режима трубопроводов, их настройки и использования применительно к современным системам управления процессами теплоснабжения (работы Богословского П.А., Пеховича А.И., Жидких В.М., Попова Ю.А., Хижнякова С.В., Шаталиной И.Н., Грудзинского М.М., Прохорова Е.И., Донова А.А., Терехова Л.Д. и др.). Показано, что известные модели и алго-

ритмы, как правило, являются узкоспециализированными и практически мало пригодны для решения поставленных задач, при этом, например, алгоритмов параметрической идентификации моделей рассматриваемых процессов по экспериментальным данным в литературе, по существу, нет. Для надежного и качественного контроля и управления процессами теплоснабжения данные задачи необходимо решать на основе современных информационных технологий с использованием средств вычислительной техники.

Во второй главе представлены математические модели процессов охлаждения и образования льда на внутренней поверхности отключенных трубопроводов в условиях надземной прокладки.

Математическая модель процесса охлаждения представлена следующими дифференциальными уравнениями:

$$c_{ст} \cdot \rho_{ст} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{ст} \cdot r \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad r_B < r < r_H, \quad 0 < \tau < \tau_{кр}, \quad (1)$$

$$\frac{d t_B(\tau)}{d \tau} = \frac{2 \alpha_B}{(\rho_{ст} \cdot c_{ст} \cdot r_B)} \times [t(r_B, \tau) - t_B(\tau)], \quad (2)$$

$$t(r, 0) = t_{ст}^0(r, 0), \quad r_B < r < r_H, \quad (3)$$

$$t_B(r_B, 0) = t_B^0, \quad (4)$$

$$-\lambda_{ст} \cdot \frac{\partial t(r_B, \tau)}{\partial r} = \alpha_B [t_B(\tau) - t(r_B, \tau)], \quad (5)$$

$$\lambda_{ст} \cdot \frac{\partial t(r_H, \tau)}{\partial r} = \alpha_H [t_H - t(r_H, \tau)]. \quad (6)$$

Здесь и далее условные обозначения величин, входящих в уравнения, приведены на с. 20. Уравнение (2) выведено на основании теплового баланса, записанного для элементарного объема теплоносителя в теплопроводе. Отметим, что в литературе рекомендуется температуру внутренней поверхности теплопровода принимать равной температуре теплоносителя, т.е. для внутренней поверхности теплопровода допускается использовать не условие (5), а граничное условие (ГУ) первого рода. Однако в таком случае модель (1) - (6) не была бы достаточно универсальной, поскольку ее нельзя было бы применить для расчета процесса охлаждения отключенного теплопровода.

Для численного интегрирования система уравнений (1) - (6) аппроксимировалась неявной разностной схемой второго порядка точности, которая решалась методом прогонки. При этом, используя справочные данные, учитывали зависимость коэффициента теплопро-

водности стенки трубопровода от ее средней температуры $\lambda = f(t_{cp})$. Программа расчета разработана в среде Visual Basic.

При охлаждении теплоносителя до температуры его кристаллизации $t_{кр}$, начинается процесс образования слоя льда на внутренней поверхности отключенного теплопровода. Система уравнений, описывающая процесс охлаждения и кристаллизации неподвижного теплоносителя, представлена ниже:

$$c_{ст} \cdot \rho_{ст} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{ст} \cdot r \cdot \frac{\partial t_{ст}}{\partial r} \right), \quad r_B < r < r_H, \quad (7)$$

$$c_n \cdot \rho_n \cdot \frac{\partial t_n}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_n \cdot r \cdot \frac{\partial t_n}{\partial r} \right), \quad r_n(\tau) < r < r_B, \quad (8)$$

$$\frac{dt_B}{d\tau} = \frac{2\alpha_B}{\rho_{ст} \cdot c_{ст} \cdot r_n(\tau)} \times [t_n(r_n(\tau), \tau) - t_B], \quad (9)$$

$$t_n(r, 0) = t_n^0(r), \quad r_n(0) \leq r \leq r_B, \quad (10)$$

$$t_{ст}(r, 0) = t_{ст}^0(r), \quad r_B \leq r \leq r_H, \quad (11)$$

$$\lambda_{ст} \cdot \frac{\partial t(r_H, \tau)}{\partial r} = \alpha_H [t_H - t(r_H, \tau)], \quad (12)$$

$$-\lambda_n \frac{\partial t_n(r_n(\tau), \tau)}{\partial r} = \alpha_n (t_B - t_{кр}) - q_{кр} \times \rho_n \left[\frac{dr_n(\tau)}{d\tau} \right], \quad (13)$$

$$\lambda_n \frac{\partial t_n(r_B, \tau)}{\partial r} = \lambda_{ст} \frac{\partial t_{ст}(r_B, \tau)}{\partial r}, \quad (14)$$

$$t_n(r_B, \tau) = t_{ст}(r_B, \tau), \quad (15)$$

Уравнение (13) описывает динамику процесса оледенения с учетом выделения на границе фазового превращения теплоты кристаллизации. Если следовать рекомендациям А.В. Лыкова и считать, что в жидком теплоносителе за счет совершенной конвекции имеет место постоянство температуры, т.е. переноса теплоты от незатвердевшего теплоносителя к поверхности льда нет (температура жидкости везде одинакова и равна температуре кристаллизации), то вместо уравнений (9) и (13) нужно использовать следующие соотношения:

$$t_n[r_n(\tau), \tau] = t_{кр}, \quad (16)$$

$$\lambda_n \frac{\partial t_n[r_n(\tau), \tau]}{\partial r} = q_{кр} \times \rho_n \left[\frac{dr_n(\tau)}{d\tau} \right]. \quad (17)$$

Численное интегрирование уравнений (7) – (17) выполнялось конечно-разностным методом с подвижными узлами. Программа расчета разработана в среде Visual Basic. При этом решение тестовых задач по охлаждению и оледенению отключенного трубопровода позволило сделать следующие выводы:

– совпадение результатов численного решения данной задачи с точностью до 3% с известным аналитическим решением Естифеева А.М., полученным для простого случая, позволяет сделать вывод о правильном отображении моделью физики процесса охлаждения и замерзания;

– результаты расчета процесса охлаждения и оледенения с использованием ГУ I и ГУ III родов практически совпадают друг с другом, это свидетельствует о достаточно малой значимости конвективного переноса тепла к границе затвердевшего теплоносителя.

Установлено, что результаты численного расчета процессов охлаждения и оледенения при $\lambda_{ст} = const$ хорошо согласуются с данными известного аналитического решения. Учет же зависимости теплофизических свойств материала стенки теплопровода от ее средней температуры позволяет точнее рассчитывать динамику охлаждения и оледенения, что достаточно существенно при выборе наиболее экономичного способа ликвидации аварийных ситуаций в системах теплоснабжения. Это повышает значимость разработанного численного решения.

В третьей главе представлен алгоритм параметрической идентификации модели охлаждения отключенного трубопровода (1) – (6), разработанный с использованием методов золотого сечения и поординатного спуска, а также упрощенный алгоритм идентификации, разработанный на основе аппроксимации экспериментальных данных инерционным звеном первого порядка. При этом, обосновывается выбор вида критерия идентификации и дается сравнение экспериментальных данных с данными численного решения, полученного по настроенным моделям.

Целью параметрической идентификации модели охлаждения является нахождение коэффициентов теплоотдачи для наружной и внутренней поверхностей теплопровода α_n , α_b .

В общем виде критерий настройки модели охлаждения (1) – (6) на реальный процесс (критерий идентификации) определяется следующим образом:

$$I = \sum_{i=1}^N \left| \overline{t^p}(\tau_i) - t^p(\tau_i) \right|^k, \quad (18)$$

где τ_i – момент времени, в который осуществлялось измерение температуры, $i = 1 \dots N$; N – число экспериментальных точек; k – показатель степени (любое положительное число); t^p – расчетная температура на поверхности теплопровода, °C; $\overline{t^p}$ – усредненная по поверхности теплопровода эталонная температура, полученная экспериментально, °C.

Необходимым условием решения задачи идентификации является существование экстремума (минимума) функции (18).

Результаты расчета, проведенного для определения чувствительности критерия идентификации к изменению одного из коэффициентов теплоотдачи (α_2) при различных значениях показателя степени k в формуле (18), показали, что функция (19) является унимодальной и может использоваться в качестве критерия идентификации. Имеется выраженный экстремум данной функции при $k = 1$. Кроме того, значение критерия идентификации будет уменьшаться с увеличением k для любого рассматриваемого момента времени τ_i . При этом, уменьшение величины модуля разности расчетной и экспериментальной температур в окрестности искомого коэффициента теплоотдачи делает экстремум функции (18) более размытым при более высоком k . Кроме того определено, что реально получить более ярко выраженный экстремум функции $I = f(\alpha_2)$ можно с помощью увеличения общего количества измерений температур на рассматриваемом промежутке времени.

Эксперимент по охлаждению отключенного теплопровода проводился в лабораторных условиях. Схемы установки для исследования процесса охлаждения неизолированного и изолированного трубопровода показаны на рис. 1 и 2.

В результате проведения экспериментов по охлаждению отключенного теплопровода и обработки полученных экспериментальных данных установлено, что погрешность результатов достаточно мала и в худшем случае не превышает 10 %.

Для аппроксимации данных, полученных в результате проведения эксперимента, решалась задача структурного синтеза математической модели процесса охлаждения отключенного неизолированного теплопровода.

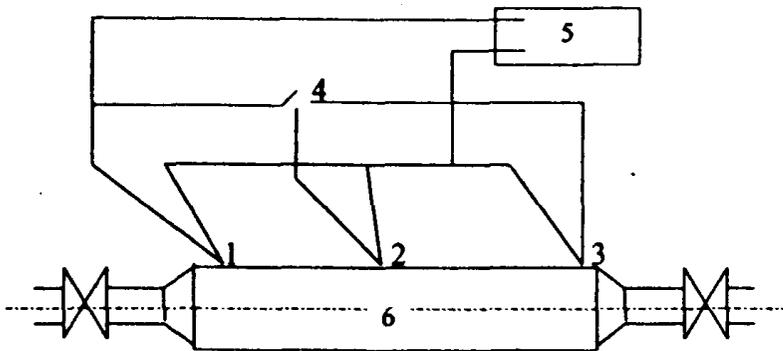


Рис. 1 Схема лабораторной установки для изучения процесса охлаждения неизолированного теплопровода:

1, 2, 3 – места установки термомпар на поверхности теплопровода; 4 – переключатель термомпар; 5 – потенциометр ПП-63; 6 – трубопровод

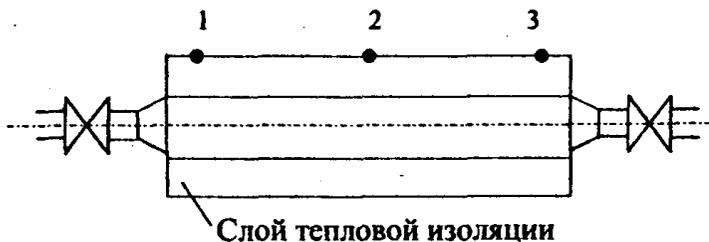


Рис. 2 Фрагмент установки (участок трубопровода) для изучения процесса охлаждения изолированного теплопровода

При этом считали, что ввиду малости толщины стенки трубы и высокого значения коэффициента теплопроводности ее материала, характер распределения температуры по толщине стенки трубы примерно совпадает со стационарным.

Для решения задачи идентификации модели охлаждения (1) – (6) для неизолированного трубопровода разработан упрощенный алгоритм

ритм, позволяющий вычислять коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности трубопровода в окружающую среду α_n по найденной по экспериментальным данным постоянной времени для процесса охлаждения T .

При этом процесс охлаждения теплоносителя представлялся следующим дифференциальным уравнением:

$$T \frac{dt_T}{dt} + t_T = t_n, \quad (19)$$

где $T = \rho_T \cdot r_B^2 \cdot c_T \cdot R_L$ – постоянная времени процесса охлаждения.

Линейное термическое сопротивление теплопередаче теплопровода R_L в данном случае определяется выражением

$$R_L = T / (\rho_T \cdot r_B^2 \cdot c_T). \quad (20)$$

Используя найденное посредством решения задачи параметрической идентификации значение R_L , можно определить коэффициент теплоотдачи для наружной поверхности теплопровода по следующему выражению:

$$\alpha_n = \frac{1}{2 r_n} / \left(R_L - \frac{1}{2 \lambda} \cdot \ln \left[\frac{r_n}{r_B} \right] \right). \quad (21)$$

Для поиска оптимальных значений коэффициентов теплоотдачи непосредственно для модели (1) – (6) использовался метод покоординатного спуска, а одномерные задачи оптимизации решались методом золотого сечения. На рис. 3 представлены результаты расчета процесса охлаждения по модели (1) – (6) (кривая 1) и по модели (19) (кривая 2). В первом случае уточнялись значения коэффициентов теплоотдачи α_B и α_n . При расчете по модели (19) коэффициент α_B не рассчитывался, а принимался равным $1500 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$. Точность вычисления коэффициентов теплоотдачи $\epsilon = 0,05$. Температура окружающей среды $t_n = 2^\circ\text{C}$, начальная температура теплоносителя $t_T^{\text{нач}} = 57,873^\circ\text{C}$. При расчетах принималось значение коэффициента теплопроводности для стенки трубопровода $\lambda_{\text{ТР}} = 49,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$.

Как видно из рисунка, лучшее совпадение с экспериментальными данными расчетной кривой 1 подтверждает то, что модель (1) – (6) точнее учитывает физику процесса. При этом среднее значение модуля разности расчетных и экспериментальных температур составило $1,25^\circ\text{C}$ для кривой 1 и $6,9^\circ\text{C}$ для кривой 2.

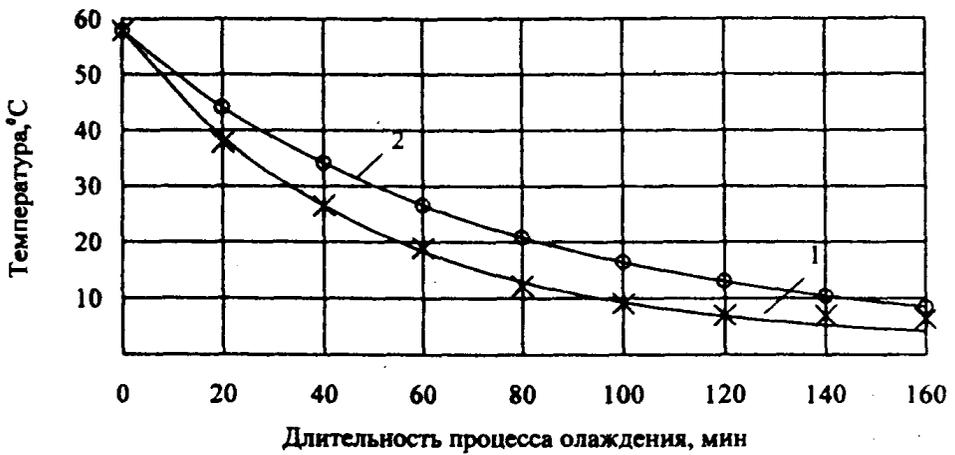


Рис. 3 Температура на поверхности трубопровода:
 х – экспериментальные данные; 1 – расчет по настроенной модели;
 2 – тоже, по алгоритму (19)

В четвертой главе приводится алгоритм определения минимально допустимой скорости движения теплоносителя по условию отсутствия оледенения в рабочем трубопроводе с использованием нормативных тепловых потерь. Кроме того, представлены алгоритмы параметрической идентификации стационарной модели распределения температуры теплоносителя по длине рабочего трубопровода.

При измерении температуры теплоносителя в нескольких точках по длине трубы для идентификации использовалось следующее соотношение:

$$G_T \cdot R_L = \frac{\pi}{c_T} \cdot \frac{n \sum_{i=1}^n L_i^2 - (\sum_{i=1}^n L_i)^2}{\sum_{i=1}^n L_i \sum_{i=1}^n \ln[t(L_i) - t_H] - n \sum_{i=1}^n L_i \ln[t(L_i) - t_H]} \quad (22)$$

При наличии нескольких измерений температуры теплоносителя в 1 точке по длине трубы (при известной температуре в начале участка)

$$R_L = -\frac{\pi}{c_T} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{G_i}{L_i} \cdot \ln^{-1} \frac{t_i - t_H}{t_0 - t_H} \right) / \sum_{i=1}^n (G_i / L_i)^2 \quad (23)$$

Апробация алгоритмов (22) и (23) проводилась с помощью моделирования на ПЭВМ и по экспериментальным данным, взятым из литературных источников и полученным в лаборатории отопления кафедры теплогазоснабжения и вентиляции ЮУрГУ. В результате моделирования установлено, что алгоритм (22) является более чувствительным к случайным погрешностям экспериментальных данных, чем алгоритм (23). Кроме того, проведено исследование влияния погрешности данных о температуре теплоносителя на точность оценки произведения $G_T \cdot R_L$. В результате установлено, что увеличение абсолютной погрешности измерения температуры на один градус приводит практически к пропорциональному росту относительной погрешности определения произведения $G_T \cdot R_L$ на 1,4%.

На основании сравнения экспериментальных и расчетных величин термического сопротивления теплопередаче, указана возможность использования вышепредставленных соотношений для оценки качества тепловой изоляции.

Кроме того, на основании решения уравнения теплового баланса движущегося теплоносителя со стенкой теплопровода получено, что распределение температуры теплоносителя по длине теплопровода, так и распределение температуры вдоль эквивалентного стержня бесконечной длины подчиняются уравнению одного и того же вида, различаются только аргументы экспонент. Также отмечается, что температура трубопровода уменьшается вдоль своей длины существенно медленнее, чем температура эквивалентного бесконечного стержня. Этот факт объясняется тем, что трубопровод в отличие от эквивалентного бесконечного стержня получает теплоту от теплоносителя.

Для новых трубопроводов систем теплоснабжения разработан алгоритм определения координаты начала замерзания движущегося теплоносителя, основанный на использовании значений нормативных удельных теплопотерь. Искомое выражение представлено в следующем виде:

$$\frac{x}{G_T} = \frac{C_T}{K_1 \cdot q_{\text{н}}^{\text{н}}} \cdot \text{Ln} \left(1 - \frac{t_T^0}{t_H} \right) \sqrt{\frac{(t_T^0)_{\text{табл}} - (t_H)_{\text{табл}}}{t_T^0 - t_H}} \quad (24)$$

Здесь K_1 — коэффициент, зависящий от района строительства и способа прокладки трубопровода (определяется по справочным данным).

Используя представленную выше зависимость, были вычислены значения x/G_T для различных диаметров труб и температуры на-

ружного воздуха. Результаты представлены в виде таблицы. Определено, что величина x/G_T уменьшается с увеличением наружного диаметра теплопровода. Причем, скорость ее уменьшения обратнопропорциональна величине диаметра трубы. Кроме того, значение x/G_T прямо пропорционально температуре окружающей среды.

При известных геометрических размерах трубопровода и параметрах теплоносителя, возможно определение минимальной скорости движения теплоносителя в трубопроводе из расчета отсутствия оледенения на заданном участке тепловой сети. При этом, требуемую скорость v_T можно легко определить из уравнения $G_T = v_T \cdot \rho_T \cdot \pi \cdot r_B^2$.

На основе модели охлаждения отключенного теплопровода (1) – (6) разработана численная модель процесса разогрева трубопровода при его заполнении, т.к. аналитическое решение данной задачи не представляется возможным.

При этом процесс разогрева был представлен в виде совокупности самостоятельных процессов. Так, например, при моделировании считалось, что разогрев входного сечения трубопровода осуществляется фактически неподвижным теплоносителем с постоянной температурой. Кроме того, поскольку при разогреве холодного трубопровода температура на его внутренней поверхности перед подвижным фронтом теплоносителя не меняется и определяется начальными условиями, поэтому была введена подвижная система координат, вследствие этого процесс охлаждения переднего фронта теплоносителя стал идентичен процессу охлаждения неподвижного теплоносителя при температуре внутренней поверхности трубопровода, всегда равной тому значению, которое имеет место при пуске опорожненной системы.

Так как с практической точки зрения важно точно определить координату возможного замерзания переднего фронта теплоносителя, характер изменения температуры теплоносителя по длине разогреваемого теплопровода не изучался.

Математическая модель разогрева трубопровода при его заполнении представляется системой уравнений (1) – (6), к которым следует присоединить уравнение движения

$$\frac{dx(\tau)}{d\tau} = v(\tau). \quad (25)$$

За время $\Delta\tau$ координата подвижной границы теплоносителя перемещается на величину Δx и понижается на некоторую величину Δt_B .

Если $\Delta \tau \rightarrow 0$, то из уравнения теплового баланса для элементарного объема теплоносителя в трубе следует

$$\frac{\partial t_B(x_{\text{кон}}, \tau)}{\partial \tau} = \frac{2\alpha_B}{(\rho_T \cdot c_T \cdot r_{\text{вн}})} \times [t(r(x_{\text{кон}}), \tau) - t_B(x_{\text{кон}}, \tau)].$$

Алгоритм определения температуры переднего фронта движущегося теплоносителя при заполнении холодного трубопровода содержит следующие этапы:

1). задание параметров теплообмена, соответствующих временно-му слою $k = 0$ и координате $X_k = 0$;

2). расчет температуры на внутренней поверхности теплопровода t_0^k в координате X_k ;

3). изменение значения временного слоя $k = k + 1$;

4). определение координаты переднего фронта теплоносителя $X_k = k \cdot \Delta \tau \cdot v_T$ и его температуры t_B^k по уравнению

$$t_B^{k+1} = \left(t_B^k + \frac{2\alpha_B}{\rho_T \cdot c_T \cdot r_T} \times (t_0^k - t_B^k) \right) \cdot \Delta \tau;$$

5). если $t_B^k > t_{\text{нр}}$, то расчет продолжается с п. 3.

Необходимо заметить, что вышеприведенный алгоритм может использоваться и для определения температурного поля по длине рабочего трубопровода, если при выполнении условия 5, продолжать расчет со второго пункта, а не с третьего и считать, что $\tau \rightarrow \infty$, то есть процесс разогрева холодного теплопровода происходит неограниченно долгое время.

Результаты апробации предложенного алгоритма приведены ниже. Исходные данные для расчета: для участка трубы с $d_y = 200 \text{ мм} - \alpha_B = 1102,932 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$;

для участка трубы с $d_y = 100 \text{ мм} - \alpha_B = 3362,988 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$; $G_T = 33,8 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}} = 9,38 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$.

Дополнительно было принято: материал трубопровода – сталь 100 с $\lambda_{\text{ст}} = 49,3$

$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}$, $\rho_{\text{ст}} = 600 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $C_{\text{ст}} = 2300 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}$; температура талого грунта $t_{\text{гр}} = 0 \text{ °C}$, ко-

эффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубопровода в окружающую среду (талый грунт) $\alpha_H = 1000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$.

На рис. 4 представлены экспериментальная температурная кривая и кривая, полученная в результате численного расчета температуры подвижной границы теплоносителя по модели разогрева (1) – (6). Пунктирной линией обозначено место перемены внутреннего диаметра трубопровода с $d_y = 0,2 \text{ м}$ на $d_y = 0,1 \text{ м}$. В результате

вычисления наблюдается удовлетворительное согласование экспериментальных и расчетных данных: средняя погрешность составляет 7,9 %.



Рис. 4 Изменение температуры подвижной границы теплоносителя при разогреве холодного трубопровода: x – экспериментальные данные; 1 – расчетные данные.

Так же, на основании модели (1) – (6) с добавлением уравнения движения (25) разработан алгоритм определения стационарного температурного поля теплоносителя по длине теплопровода в рабочем режиме эксплуатации. Получено, что результаты расчета координаты начала кристаллизации теплоносителя по разработанному численному алгоритму в пределах 1 % совпадают с известным аналитическим решением.

Основные выводы

1. В соответствии с физикой процессов определены структуры моделей охлаждения и замерзания отключенного теплопровода и разработаны численные варианты этих моделей. Уточненный расчет процессов охлаждения по данным моделям позволяет учитывать зависимость теплофизических свойств участников теплообмена от температуры и другие нелинейные соотношения и выбрать наиболее экономичный вариант ликвидации аварийных ситуаций (со сливом или без слива теплоносителя из отключенного теплопровода).

2. Исследована чувствительность критерия идентификации к изменению идентифицируемых параметров и разработаны алгоритмы идентификации моделей охлаждения изолированного и неизолированного теплопроводов по экспериментальным данным. Определены коэффициенты теплоотдачи для внутренней и наружной поверхностей трубопровода. Результаты моделирования позволяют сделать заключение о неправомерности использования коэффициентов теплоотдачи, полученных для стационарного режима, при расчете нестационарных процессов теплообмена.

3. Разработан упрощенный алгоритм идентификации модели охлаждения неизолированного теплопровода на основе аппроксимации экспериментальных данных экспоненциальной зависимостью. Указан способ вычисления коэффициента теплоотдачи для наружной поверхности трубы.

4. Разработан алгоритм расчета разогрева холодного трубопровода, который позволяет оценить возможность безаварийного запуска, например, систем отопления зданий в зимний период, т.е. без разрушения заполняемых трубопроводов замерзшим теплоносителем.

5. Предложен алгоритм определения минимально допустимой скорости движения теплоносителя из условия отсутствия оледенения внутренней поверхности трубопровода с использованием значений нормативных удельных тепловых потерь.

6. Разработаны алгоритмы идентификации модели стационарного распределения температуры по длине трубопровода.

Основные обозначения

$\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности для стенки трубы, Вт/(м⁰С);
 $c_{ст}$ – теплоемкость материала теплопровода, Дж/(кг⁰С); $\rho_{ст}$ – плотность материала теплопровода, кг/м³; α_n – коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности трубопровода в окружающую среду, Вт/(м²·⁰С); α_B – коэффициент теплоотдачи от неподвижного теплоносителя ко внутренней поверхности трубопровода, Вт/(м²·⁰С); r_n – радиус наружной поверхности теплопровода, м; r_B – радиус внутренней поверхности трубы, м; t_n – температура окружающей среды, ⁰С; $t(r, \tau)$ – температура трубы в точке r в момент времени τ , ⁰С; $t_{ст}^0(r, 0)$ – заданная функция, ⁰С; t_B^0 – температура теплоносителя в начальный момент времени, ⁰С; $t_B(\tau)$ – температура теплоносителя в произвольный момент времени τ , ⁰С; $\tau_{кр}$ – момент начала образования слоя льда, ч; $t_B(x, \tau)$ – температура теплоносителя в произвольный момент времени τ в точке с координатой x , ⁰С; x – координата по длине рабочего трубопровода, м; $t(r(x), \tau)$ – распределение температуры теплопровода в сечении $r(x)$ в момент времени τ , ⁰С; $Q_{кр}$ – теплота кристаллизации теплоносителя, Дж/кг; $v(\tau)$ – скорость движения теплоносителя, м/с; $x_{нач}$ – координата входного сечения рабочего трубопровода, м; $x_{кон}$ – координата начала оледенения рабочего трубопровода, м. Соответствующие параметры с индексом “л” относятся ко льду.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Панферов В.И., Миханькова Ю.О. Численное моделирование температурного режима теплопровода // Современные методы исследований строительных конструкций, технологий и систем. – Магнитогорск, МГТУ, 1998. – С. 104 – 108.

2. Панферов В.И., Миханькова Ю.О. Разработка комплекса моделей процессов охлаждения и замерзания отключенного теплопровода // Проблемы проектирования неоднородных конструкций: Труды XVIII Российской школы, посвященной 75-летию со дня рождения академика В. П. Макеева. – Миасс, МНУЦ, 1999. – С. 236 – 241.

3. Панферов В.И., Миханькова Ю.О. Моделирование и идентификация процесса отключенного теплопровода // Актуальные проблемы современного строительства: Тез. докл. Материалы Всероссийской XXX научно-технической конференции «Актуальные проблемы современного строительства». – Пенза, ПГАСА, 1999. – С. 61 – 62.

4. Панферов В.И., Миханькова Ю.О. Решение задачи Стефана для отключенного теплопровода // Теплофизика и информатика в металлургии: Достижения и проблемы. Материалы Международной конференции к 300-летию металлургии Урала, 80-летию металлургического факультета и кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии». – Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2000. – С. 284 – 289.

5. Панферов В.И., Миханькова Ю.О. Определение координаты начала оледенения движущегося теплоносителя // Строительство и образование: Сб. научн. трудов. – Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2000. – Вып. 3. – С. 181 – 184.

6. Панферов В.И., Миханькова Ю.О. Параметрическая идентификация модели распределения температуры теплоносителя по длине теплопровода // Строительство и образование: Сб. научн. трудов. – Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2000. – Вып. 4. – С. 161 – 163.

7. Панферов В.И., Миханькова Ю.О. Экспериментальное исследование процессов отключенного теплопровода // Научно-технические проблемы систем теплогазоснабжения, вентиляции и водоотведения: Межвуз. сб. научн. трудов. – Воронеж, ВГАСА, 2000. – С. 57 – 62.

8. Миханькова Ю.О. Численное моделирование нестационарного теплообмена при разогреве холодного теплопровода // Строительство и образование: Сб. научн. трудов – Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2000. – Вып. 4. – С. 192 – 194.