

На правах рукописи



Половников Вячеслав Юрьевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ТЕПЛОТРУБОПРОВОДОВ
В УСЛОВИЯХ УВЛАЖНЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ**

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2006

Работа выполнена на кафедре теплофизики и гидромеханики
и кафедре теоретической и промышленной теплотехники
Томского политехнического университета

Научный руководитель: доктор физико-математических
наук, профессор
Кузнецов Гений Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор,
заслуженный деятель науки РФ
Иванов Владлен Васильевич

кандидат технических наук
Губин Владимир Евгеньевич

Ведущая организация: Региональный центр управления
энергосбережением, г. Томск

Защита состоится 25 декабря 2006 года в 17.00 часов на заседании
диссертационного совета К 212.269.04 при Томском политехническом
университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, ауд. 406 (4 корпус
ТПУ).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул.
Белинского, 55.

Автореферат разослан «24» ноября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А. С. Заворин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Россия характеризуется самым высоким уровнем централизованного теплоснабжения (до 80%). На ее территории проложено более 250 тыс. км тепловых сетей с трубами диаметром от 57 до 1400 мм. Наиболее распространенный тип прокладки теплопроводов – подземный, на долю которого приходится около 90% общей протяженности, при этом основным способом прокладки является укладка труб в железобетонных каналах. Преимущественный тип применяемых теплоизоляционных материалов для канальных прокладок – изделия из минеральной ваты.

Актуальность определения транспортных потерь тепла в сетях теплоснабжения, работающих в штатных и внештатных условиях, вызвана в первую очередь возрастанием требований к эффективности теплоснабжения, усилением роли приборного учета потребления тепла у абонентов, а также необходимостью диагностики технического состояния теплопроводов. При этом вопросы, связанные с проблемами как определения фактических тепловых потерь на охлаждение теплоносителя при транспортировке, так и моделированием теплового состояния теплопроводов в различных условиях, достаточно слабо освещены в литературе. Среди имеющихся публикаций особо следует отметить экспериментальные исследования по тепло- и влагообмену в промышленной изоляции В.Г. Петрова-Денисова и В.П. Витальева, а также работы, посвященные прогностическому моделированию состояния тепловых сетей, выполненные под руководством В.В. Иванова.

Большой интерес для практики представляет разработка методики оценки масштабов тепловых потерь теплотрубопроводов, имеющих насыщенную влагой тепловую изоляцию и эксплуатируемых в условиях затопления каналов тепловых сетей.

В настоящее время в среднем по стране свыше 12% тепловых сетей периодически или постоянно пребывают в состоянии затопления, а в некоторых городах затоплениями может быть охвачено до 70% теплотрасс.

Можно выделить следующие основные причины, приводящие к затоплению каналов тепловых сетей:

затопление канальной прокладки теплотрасс связано с большой водопроницаемостью железобетонных элементов канала из-за негерметичной заделки стыков стенок и перекрытий (в этом случае в канал попадают поверхностные и грунтовые воды);

утечки воды, прорывы трубопроводов, аварии в системах водоснабжения и водоудаления также неизбежно приводят к затоплению каналов теплосетей.

В связи с тем, что анализ масштабов тепловых потерь трубопроводов, находящихся в состоянии затопления, не может быть проведен при помощи единственно используемой в настоящее время методики (РД 34.09.255-97 «Методические указания по определению тепловых потерь в водяных

тепловых сетях»)), возникает научно-техническая задача разработки способов оценки тепловых потерь при работе трубопроводов в подобных условиях.

Решение таких задач имеет большое значение для практики и в частности в 2005 – 2006 годах финансировалось Администрацией Томской области в рамках совместного проекта с Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 05-02-98006 конкурс р_об_а «Математическое моделирование процессов теплопереноса в объектах теплоснабжения с учетом взаимодействия с окружающей средой»).

Цель работы – математическое моделирование теплового режима теплотрубопровода в условиях увлажнения тепловой изоляции с учетом основных значимых факторов и процессов, а также создание методики численного анализа величины теплопотерь с его поверхности.

Основные задачи исследования:

1. Создание математической модели процесса нестационарного теплопереноса в системе «теплотрубопровод – окружающая среда».
2. Математическое моделирование теплового состояния трубопровода в двумерной постановке, учитывающей режимы работы теплопровода в условиях частичного затопления канала теплосети.
3. Разработка методики численного анализа величины тепловых потерь трубопроводов в условиях увлажнения теплоизоляции.
4. Анализ влияния основных факторов на масштабы теплопотерь:
 - 4.1. режимов теплообмена на внешнем контуре трубопровода;
 - 4.2. содержания влаги в тепловой изоляции;
 - 4.3. нестационарности процесса насыщения изоляции влагой;
 - 4.4. испарения влаги в слое теплоизоляции.

Научная новизна. Впервые решена нелинейная нестационарная задача теплопереноса в системе «стенка трубы – слой теплоизоляции – слой воды» с учетом испарения влаги, фильтрации пара и воды в слое пористой теплоизоляции теплотрубопровода. Разработана методика численного анализа величины тепловых потерь трубопроводов, имеющих насыщенную влагой теплоизоляцию и эксплуатируемых в условиях затопления каналов тепловых сетей. Установлены масштабы теплопотерь трубопроводов, находящихся в условиях затопления каналов сетей теплоснабжения.

Практическая значимость. Проведенные численные исследования вносят вклад в развитие представлений о режимах работы теплотрубопроводов в условиях увлажнения изоляции. В диссертации разработаны теоретические основы методики численного анализа масштабов тепловых потерь трубопроводов, находящихся в состоянии затопления.

Полученные новые результаты по математическому моделированию теплового состояния теплотрубопровода, имеющего увлажненную изоляцию и находящегося в режимах затопления, являются основой для дальнейшего анализа тепловых потерь трубопроводов в рамках достаточно полной модели, учитывающей основные значимые факторы, а также могут быть

использованы при разработке и усовершенствовании конструкций каналов теплосетей и выборе теплоизоляционных материалов для трубопроводов.

Достоверность полученных результатов. Обоснованность и достоверность результатов исследований следует из проведенных проверок используемых методов на сходимость и устойчивость решений на множестве сеток, выполнения условий баланса энергии на границах области решения, а также подтверждается сравнением результатов с известными экспериментальными и теоретическими данными работ других авторов.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель теплопереноса в системе «стенка трубы – слой тепловой изоляции – слой воды» с учетом испарения влаги, фильтрации пара и воды в слое теплоизоляции трубопровода.
2. Методика численного анализа тепловых потерь теплотрубопроводов, находящихся в состоянии затопления.
3. Результаты численного анализа температурных полей и тепловых потерь теплотрубопровода в условиях увлажнения теплоизоляции.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих семинарах и конференциях: XXVIII Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2005г.); одиннадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (Томск, 2005г.); XII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2006г.); II Международной научно-технической конференции «Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании» (Тюмень, 2006г.); Национальной конференции по теплоэнергетике (Казань, 2006г.); пятой Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2006г.); четвертой Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2006г.).

Публикации. Результаты работы приведены в 14 публикациях, список которых дан в конце автореферата. Представленные работы полностью отражают положения диссертационного исследования.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, включающего 102 наименования, содержит 24 рисунка, 62 таблицы – всего 122 страницы.

Актуальность темы диссертационной работы, цели и задачи, научная новизна и практическая значимость представлены во **введении**.

Обзор современных методов определения потерь тепла в сетях теплоснабжения проведен в **первой главе**. При этом выделены преимущества и недостатки имеющихся способов определения теплопотерь, показано, что оценка тепловых потерь трубопроводов, проводимая на основе результатов математического моделирования, в настоящее время является наиболее предпочтительным способом анализа.

Во второй главе представлены физическая постановка задачи и математическая модель теплового состояния теплотрубопровода, находящегося в условиях затопления канала теплосети, с учетом испарения влаги, фильтрации пара и воды в слое теплоизоляции.

В третьей главе приведены результаты численного исследования температурных полей и теплотерь трубопроводов в условиях увлажнения теплоизоляции с учетом основных значимых факторов и процессов.

В заключении подведены итоги проведенных исследований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Постановка задачи. Рассматривается теплотрубопровод уложенный в одноячейковый железобетонный канал, заполненный водой (рис. 1). Под действием сил давления вода, окружающая трубопровод, проникает в пористую структуру тепловой изоляции. Влага, содержащаяся в порах теплоизоляционного материала, испаряется, а образовавшийся пар, вследствие роста давления, фильтруется в направлении к внутренней поверхности изоляции. Таким образом, в слое пористой теплоизоляции одновременно протекают процессы фильтрации пара и воды. При равенстве давления пара наружному давлению, равному сумме атмосферного и гидростатического, процессы фильтрации пара и воды прекращаются. В таком режиме на границе раздела паровой и водяной зон имеет место равенство скоростей испарения и конденсации.

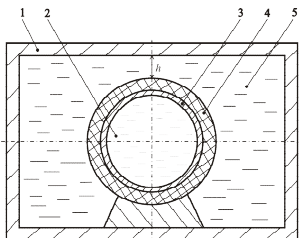


Рис.1. Схема поперечного сечения канала теплосети в условиях затопления: 1 – корпус канала, 2 – теплоноситель, 3 – стенка трубопровода, 4 – слой изоляции, 5 – затопленная полость канала.

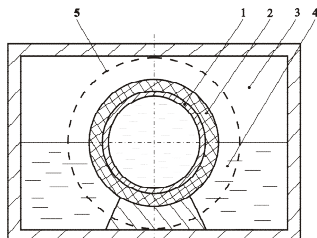


Рис.2. Схема поперечного сечения канала тепловой сети в условиях частичного затопления: 1 – стенка трубы; 2 – изоляция; 3 – воздух; 4 – вода; 5 – внешняя граница области решения.

Также рассматривались режимы работы трубопровода при его частичном погружении в воду (рис. 2). В этом случае в полости канала теплосети выделялись области занятые воздухом и водой.

Математическая модель. Задача решалась в цилиндрической системе координат, начало которой связано с осью симметрии трубы. Геометрия области решения приведена на рис. 3.

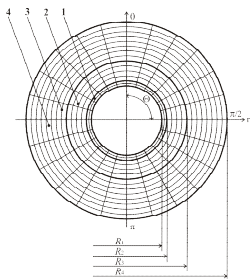


Рис.3. Геометрия области решения: 1 – стенка трубы; 2 – изоляция; 3 – слой воздуха; 4 – слой воды.

Внешней границей области решения выбран круг (рис. 2, 3).

Применение же прямоугольной границы области решения приводит к неоправданному усложнению реализации алгоритма расчета температурного поля. Поскольку задача является осесимметричной, то рассматривалась только половина области решения в диапазоне изменения угловой координаты Θ :

$$0 \leq \Theta \leq \pi.$$

Система двумерных уравнений теплопроводности и соответствующие им краевые условия для рассматриваемой системы (рис. 3) имеют вид:

$$\tau > 0, \quad R_1 \leq r < R_2, \quad 0 \leq \Theta \leq \pi;$$

$$\frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial \tau} = a_{\text{тр}} \left(\frac{\partial^2 T_{\text{тр}}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_{\text{тр}}}{\partial \Theta^2} \right); \quad (1)$$

$$\tau > 0, \quad R_2 < r < R_3, \quad 0 \leq \Theta \leq \pi;$$

$$C_{\text{и}} \rho_{\text{и}} \frac{\partial T_{\text{и}}}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{\text{и}} \cdot r \frac{\partial T_{\text{и}}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \Theta} \left(\lambda_{\text{и}} \frac{\partial T_{\text{и}}}{\partial \Theta} \right); \quad (2)$$

$$\tau > 0, \quad R_3 < r \leq R_4, \quad 0 \leq \Theta < \pi/2;$$

$$\frac{\partial T_{\text{возд}}}{\partial \tau} = a_{\text{возд}} \left(\frac{\partial^2 T_{\text{возд}}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\text{возд}}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_{\text{возд}}}{\partial \Theta^2} \right); \quad (3)$$

$$\tau > 0, \quad R_3 < r \leq R_4, \quad \pi/2 < \Theta \leq \pi;$$

$$\frac{\partial T_{\text{вода}}}{\partial \tau} = a_{\text{вода}} \left(\frac{\partial^2 T_{\text{вода}}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\text{вода}}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_{\text{вода}}}{\partial \Theta^2} \right). \quad (4)$$

$$\tau = 0, \quad R_1 \leq r \leq R_4, \quad 0 \leq \Theta \leq \pi, \quad T_{\text{тр}} = T_{\text{и}} = T_{\text{возд}} = T_{\text{вода}} = T_0 = \text{const}. \quad (5)$$

$$\tau > 0, \quad r = R_1, \quad 0 \leq \Theta \leq \pi, \quad T_{\text{тр}} = T_{\text{и1}} = \text{const}; \quad (6)$$

$$\tau > 0, \quad r = R_2, \quad 0 \leq \Theta \leq \pi, \quad -\lambda_{\text{тр}} \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial r} = -\lambda_{\text{и}} \frac{\partial T_{\text{и}}}{\partial r}, \quad T_{\text{тр}} = T_{\text{и}}; \quad (7)$$

$$\tau > 0, \quad r = R_3, \quad 0 \leq \Theta < \frac{\pi}{2}, \quad -\lambda_{\text{и}} \frac{\partial T_{\text{и}}}{\partial r} = -\lambda_{\text{возд}} \frac{\partial T_{\text{возд}}}{\partial r}, \quad T_{\text{и}} = T_{\text{возд}}; \quad (8)$$

$$\tau > 0, r = R_3, \frac{\pi}{2} < \Theta \leq \pi, -\lambda_{\text{и}} \frac{\partial T_{\text{и}}}{\partial r} = -\lambda_{\text{вода}} \frac{\partial T_{\text{вода}}}{\partial r}, T_{\text{и}} = T_{\text{вода}}; \quad (9)$$

$$\tau > 0, r = R_4, 0 \leq \Theta < \frac{\pi}{2}, T_{\text{возд}} = T_{\text{п2}} = \text{const}; \quad (10)$$

$$\tau > 0, r = R_4, \frac{\pi}{2} < \Theta \leq \pi, T_{\text{вода}} = T_{\text{п2}} = \text{const}; \quad (11)$$

$$\tau > 0, R_1 \leq r < R_2, \Theta = 0, \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial \Theta} = 0; \quad (12)$$

$$\tau > 0, R_1 \leq r < R_2, \Theta = \pi, \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial \Theta} = 0; \quad (13)$$

$$\tau > 0, R_2 < r < R_3, \Theta = 0, \frac{\partial T_{\text{и}}}{\partial \Theta} = 0; \quad (14)$$

$$\tau > 0, R_2 < r < R_3, \Theta = \pi, \frac{\partial T_{\text{и}}}{\partial \Theta} = 0; \quad (15)$$

$$\tau > 0, R_3 < r \leq R_4, \Theta = 0, \frac{\partial T_{\text{возд}}}{\partial \Theta} = 0; \quad (16)$$

$$\tau > 0, R_3 < r \leq R_4, \Theta = \pi, \frac{\partial T_{\text{вода}}}{\partial \Theta} = 0. \quad (17)$$

Так же рассматривались режимы работы тепло трубопровода в условиях конвективного теплообмена на его внешней поверхности. В этом случае на внешнем контуре выставлялись граничные условия третьего рода:

$$\tau > 0, r = R_3, 0 \leq \Theta < \frac{\pi}{2}, -\lambda_{\text{и}} \frac{\partial T_{\text{и}}}{\partial r} = \alpha_{\text{возд}} [T_{\text{и}}(\tau, R_3, \Theta) - T_{\text{окр}}]; \quad (18)$$

$$\tau > 0, r = R_3, \frac{\pi}{2} < \Theta \leq \pi, -\lambda_{\text{и}} \frac{\partial T_{\text{и}}}{\partial r} = \alpha_{\text{вода}} [T_{\text{и}}(\tau, R_3, \Theta) - T_{\text{окр}}]. \quad (19)$$

Теплофизические характеристики тепловой изоляции при насыщении ее влагой рассчитывались как эффективные с учетом объемных долей каждой компоненты. Так, например, коэффициент теплопроводности рассчитывался из выражения:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{тв}} \varphi_{\text{тв}} + \lambda_{\text{ж}} \varphi_{\text{ж}} + \lambda_{\text{г}} \varphi_{\text{г}}. \quad (20)$$

Обозначения: T – температура, К; τ – время, с; r – координата, м; Θ – угол, рад; a – температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$; R – граница области расчета; C – теплоемкость, Дж/(кг·К); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$); φ – объемная доля; ρ – плотность, кг/м³; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); q_L –

теплопотери, Вт/м; L – длина, м. *Индексы*: тр – стенка трубы; и – изоляции; вода, в – слой воды; возд – воздуха; 0 – начальное время; п1, п2 – внутренняя и внешняя поверхности; окр – окружающая среда; 1, 2, 3, 4 – номера областей расчета (рис. 3); ж – жидкость; г – газ; тв – твердый каркас изоляции.

Метод решения и исходные данные. Задача решена методом конечных разностей. Переход на новый временной слой реализовывался с помощью двух «дробных шагов» по схеме расщепления. На первом дробном шаге рассчитывался перенос тепла по координате r , а на втором дробном шаге – по координате θ , с использованием одномерных разностных уравнений. На каждом полушаге по временной координате был организован итерационный цикл, в ходе которого система одномерных разностных уравнений решалась методом «прогонки» по неявной четырехточечной разностной схеме.

Анализ проводился для типичных конфигураций теплотрубопроводов:

1. Широко распространенная – диаметр условного прохода 600 мм, тепловая изоляция из минеральной ваты (толщина 70 мм);
2. Интенсивно применяющаяся в последние годы – диаметр условного прохода 600 мм, изоляция – пенополиуретан (ППУ) толщиной 50 мм.

Толщина слоя воды (воздуха), обусловленная геометрическими параметрами стандартных каналов тепловых сетей, равна 246 мм. Значение температуры в рассматриваемой области решения в начальный момент времени считалось равным $T_0=282$ К. Температура внешней поверхности принималась равной $T_{п2}=282$ К, а диапазон изменения температуры внутренней поверхности $T_{п1}$ задавался в пределах 373–403 К.

В режимах конвективного теплообмена температура окружающей теплотрубопровод среды принималась равной $T_{окр}=296.3$ К. Анализ проводился для условий естественной и вынужденной конвекции. В последнем случае рассматривались только реально возможные скорости $V_{окр}$ (до 1 м/с) движения окружающих трубопровод сред.

Численный анализ тепловых потерь теплотрубопроводов в условиях увлажнения изоляции на базе одномерной и двумерной моделей.

Дополнительно были проведены численные исследования на основании одномерной модели рассматриваемой системы, математическая постановка задачи для которой аналогична (1) – (20). Анализ проводился для периода времени, соответствующего выходу процесса на стационарный режим. Типичные результаты численного анализа приведены в таб. 1.

Вследствие крайней ограниченности данных о тепловых потерях и температурных полях трубопроводов, работающих в условиях увлажнения изоляции, оценка достоверности полученных результатов проводилась на основе выполнения условий баланса энергии на границах области решения. При этом погрешность по балансу энергии не превысила 0.5%, что можно считать приемлемым при оценке теплопотерь трубопроводов.

Из данных таб. 1 видно, что увеличение влагосодержания тепловой изоляции ведет к соответствующему росту тепловых потерь. Сопоставление

результатов численного анализа теплопотерь трубопроводов, находящихся в условиях затопления, проведенных на основании одномерной и двумерной вариантов модели, показывает, что применение двумерной модели (таб. 1) не приводит к значительному уточнению получаемых результатов (разность в значениях q_L не более 0.4 %). Следовательно, для анализа теплопотерь с поверхности трубопроводов, работающих в условиях увлажненной изоляции, можно использовать одномерную модель рассматриваемой системы.

Таб.1. Тепловые потери q_L теплотрубопровода при $T_{n1}=373$ К в зависимости от φ_b .

Вариант численного эксперимента		q_L , Вт/м	
		Двумерная модель	Одномерная модель
ППУ	$\varphi_b = 0.00$	56.84	57.14
	$\varphi_b = 0.05$	115.37	115.85
	$\varphi_b = 0.10$	163.53	164.10
Минвата	$\varphi_b = 0.00$	133.15	133.67
	$\varphi_b = 0.10$	211.57	212.21
	$\varphi_b = 0.40$	349.56	350.28
	$\varphi_b = 0.73$	427.57	428.34

Следует отметить, что максимальное объемное содержание влаги в изоляции обусловлено открытой пористостью материала f и равно 0.73 для минеральной ваты и 0.1 для ППУ. Более низкий уровень тепловых потерь при изолировании трубопровода пенополиуретаном, по сравнению с изоляцией из минераловаты (таб. 1), объясняется тем, что ППУ имеет как более низкую теплопроводность, так и значительно меньшую открытую пористость.

В таб. 2 приведены результаты численного исследования тепловых потерь трубопровода, изолированного минеральной ватой, в условиях частичного затопления канала тепловой сети в зависимости от T_{n1} .

Таб.2. Тепловые потери q_L теплотрубопровода в условиях частичного затопления при $\varphi_b=0$.

Вариант численного эксперимента	q_L , Вт/м			
	$T_{n1}=373$ К	$T_{n1}=383$ К	$T_{n1}=393$ К	$T_{n1}=403$ К
Канал теплосети не затоплен	24.32	27.00	29.66	32.33
Канал теплосети затоплен на 25 %	51.68	57.19	62.85	68.51
Канал теплосети затоплен на 50 %	79.01	87.39	96.04	104.68
Канал теплосети затоплен на 75 %	106.34	117.58	129.22	140.86
Канал теплосети затоплен на 100 %	133.15	147.78	162.41	177.04

Анализ данных, приведенных в таб. 2 свидетельствует о том, что величина теплопотерь трубопровода, находящегося в условиях частичного погружения в воду, прямопропорциональна возрастанию степени затопления канала теплотрассы водой. При этом следует отметить, что при частичном затоплении канала теплосети (рис. 2) интенсивный теплоотвод со

«смоченной» поверхности изоляции не приводит к сколько-нибудь заметному перетеканию тепла по угловой координате из зоны «сухой» изоляции в зону изоляции, насыщенной влагой. Это, очевидно, обусловлено тем, что толщина стального корпуса трубопровода, имеющего высокую теплопроводность, относительно мала, а относительно «толстый» слой изоляции имеет низкую теплопроводность. Соответственно, даже при перепаде температур по угловой координате в несколько градусов, тепловой поток в окружном направлении остается очень низким. По этим причинам расчет потерь тепловой энергии при частичном затоплении может проводиться на базе одномерной модели с учетом площади поверхности теплоизоляции покрытой водой.

Анализ достоверности полученных результатов. Вопрос об оценке достоверности полученных результатов требует дополнительного рассмотрения, так как в последнее время отмечаются многочисленные некачественные, существенно завышенные оценки масштабов тепловых потерь теплотрубопроводов.

Достоверность результатов исследований следует из проведенных проверок используемых методов решения на сходимост и устойчивост, выполнения условий баланса энергии на границах области решения, а также подтверждается сравнением результатов с данными других авторов.

В работе Петрова-Денисова В.Г., и др. (Определение тепловых потерь в подземных тепловых сетях по известной температуре поверхности земли над прокладкой // Теплоэнергетика. – 1992. – № 12. – С. 28 – 33) приведены результаты расчетов теплотерь трубопроводов канальной прокладки. В таб. 3 приведены некоторые данные этого расчета (q_{L1}) и проведено их сравнение с результатами численных экспериментов (q_{L2}) при $T_{n1}=90$ С.

Таб.3. Сравнение результатов расчетов для трубопровода, изолированного минеральной ватой.

Диаметр теплотрубо- провода, мм	Температура воздуха в канале, С	q_{L1} , Вт/м	q_{L2} , Вт/м	$\frac{ q_{L2} - q_{L1} }{q_{L2}} \cdot 100\%$
108	16.2	33	37.3	11.5
219	19.5	48	48.6	1.23
630	28.9	98	89.6	8.57

Из данных таб. 3 видно, что для трубопровода канальной прокладки, изолированного минеральной ватой и работающего в штатных условиях, отклонение результатов численных исследований по предлагаемой методике от данных расчетов В.Г. Петрова-Денисова относительно мало. В зависимости от варьируемых параметров (таб. 3) относительное отклонение величин тепловых потерь составляет от 1.23% до 11.5%.

В статье Г.Ш. Димидова (Об испытаниях теплопроводов в ППМ-изоляции // Новости теплоснабжения. – 2006. – № 4. – С. 37 – 40) представлены результаты экспериментального определения тепловых потерь

трубопровода, имеющего ППУ теплоизоляцию, в нормативном режиме работы. Эксперимент проводился для трубопровода диаметром 159 мм и температуры теплоносителя равной 81 С. В этих условиях теплотери по данным эксперимента равны 39.9 Вт/м, а в соответствии с расчетом по предлагаемой методике – 39.2 Вт/м. Относительная разность в результатах в этом случае достаточно мала и составляет 1.8%.

Оценка теплотерь трубопровода в условиях затопления проведена в работе, выполненной научным коллективом под руководством В.В. Иванова (Влияние увлажнения изоляции и грунта на тепловые потери подземных теплотрасс // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 7. – С. 32 – 33.). В этой работе считалось, что канал теплосети затоплен водой из обратного трубопровода ($T_{\text{окр}}=38$ С). Расчеты проводились для следующих условий: диаметр трубопровода – 0.3 м; толщина слоя минераловатной изоляции – 0.06 м; $T_{\text{пл}}=88$ С. В этом случае потери тепла в 5.30 – 5.86 раз превышали нормативные показатели.

При проведении численных расчетов с применением предлагаемой в данной работе методики для вышеописанных условий было установлено, что тепловые потери трубопровода в таких условиях составляют 275.33 Вт/м, а нормативное значение тепловых потерь равно 55.97 Вт/м. Тогда увеличение теплотерь для трубопровода, эксплуатируемого в условиях затопления, по сравнению с нормированной величиной составит 4.92 раза. Относительная разность между расчетами, представленными в работе Иванова В.В. и по предлагаемой методике, составляет от 7.7% до 19.1%.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что сопоставление результатов численных расчетов тепловых потерь теплотрубопроводов на основании предлагаемой методики с результатами других авторов дает достаточно хорошее совпадение.

Тепловые потери теплотрубопровода в условиях конвективного теплообмена. В таб. 4, 5 даны результаты численного анализа величины тепловых потерь теплотрубопровода в условиях конвективного теплообмена на его внешней поверхности.

Таб.4. Теплотери трубопровода в условиях конвективного теплообмена при $T_{\text{пл}} = 373$ К, $\varphi_n=0$.

Вариант численного эксперимента	q_L , Вт/м	
	Минвата	ППУ
Естественная конвекция воздуха	110.72	60.06
Естественная конвекция воды	140.87	68.30
Вынужденная конвекция воздуха, $V_{\text{окр}}=0.50$, м/с	120.49	62.97
Вынужденная конвекция воды, $V_{\text{окр}}=0.50$, м/с	141.30	68.40

Результаты исследований, приведенные в таб. 4, позволяют сделать вывод и о том, что осуществление режима работы трубопровода, исключающего возможность проникновения влаги в пористую структуру теплоизоляции, позволит минимизировать потери тепловой энергии при

работе теплопровода в условиях затопления. На практике данное положение может быть реализовано при нанесении на внешнюю поверхность тепловой изоляции слоя надежного гидроизоляционного материала.

Сопоставление результатов численных экспериментов для «кондуктивной» (таб. 1) и «конвективной» (таб. 4) моделей при $\varphi_v = 0$ свидетельствует о том, что разность в получаемых результатах достаточно мала (менее 4.5 %), а, следовательно, при анализе тепловых потерь трубопроводов в условиях затопления область решения задачи можно ограничить внешней поверхностью теплоизоляции.

Из данных таб. 5 видно, что при работе трубопроводов в условиях затопления режим теплообмена не оказывает существенного влияния на величину тепловых потерь, а интенсификация процесса потери тепловой энергии в первую очередь обусловлена увеличением эффективной теплопроводности тепловой изоляции при насыщении ее влагой.

Таб.5. Теплотери трубопровода в условиях конвективного теплообмена при $T_{пл} = 373 \text{ K}$, $\varphi_v = 0$.

Вариант численного эксперимента		q_L , Вт/м		Отклонение от СНиП 41-03-2003, ед.*	
		Минвата	ППУ	Минвата	ППУ
Естественная конвекция		1066.4	248.14	9.3	2.17
Вынужденная конвекция	$V_{окр} = 0.25$, м/с	1084.5	249.16	9.5	2.18
	$V_{окр} = 0.50$, м/с	1088.9	249.32	9.5	2.18
	$V_{окр} = 1.00$, м/с	1091.5	249.43	9.5	2.18

* - норма тепловых потерь по СНиП 41-03-2003 для трубопровода диаметром условного прохода 600 мм при $T_{пл} = 373 \text{ K}$ составляет 114 Вт/м.

Сравнение результатов численного анализа тепловых потерь трубопроводов в условиях затопления с нормированной по СНиП 41-03-2003 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов» величиной теплотери свидетельствует о том, что потери тепла теплотрубопроводов, имеющих увлажненную изоляцию, значительно превышают нормативные показатели. Превышение составляет до 9.5 раз для широко распространенной конфигурации теплотрубопровода (теплоизоляция – минеральная вата) и 2.18 раза для трубопровода изолированного ППУ.

Анализ масштабов тепловых потерь теплотрубопровода с учетом нестационарности процесса насыщения тепловой изоляции влагой. В рассмотренных выше вариантах считалось, что величина объемной доли влаги неизменна во времени и равномерно распределена по пористой структуре теплоизоляционного материала. В реальности данное предположение не всегда реализуется и поэтому необходим учет нестационарности процесса насыщения тепловой изоляции влагой. Для этого необходимо рассмотреть процесс фильтрации наружной воды в слое

пористого теплоизоляционного материала. В этом случае к системе уравнений (1) – (20) необходимо добавить уравнения движения и неразрывности для жидкости, заполняющей пористый слой изоляции.

Одномерное уравнение неразрывности для фильтрующейся в слое теплоизоляции воды и соответствующие ему краевые условия имеют вид:

$$\frac{\partial \varphi_{\text{ж}}}{\partial \tau} + \frac{\partial (U_{\text{ж}} \varphi_{\text{ж}})}{\partial r} + \frac{U_{\text{ж}}}{r} \varphi_{\text{ж}} = 0, \quad \tau > 0, \quad R_{\text{ж}} \leq r \leq R_{\text{ж}}; \quad (21)$$

$$\rho_{\text{ж}} = \text{const}.$$

$$\tau = 0, R_2 \leq r \leq R_3, \quad \varphi_{\text{ж}} = 0; \quad (22)$$

$$\tau > 0, r = R_3, \quad \varphi_{\text{ж}} = f. \quad (23)$$

Скорость движения жидкости $U_{\text{ж}}$ определялась по закону линейной фильтрации Дарси:

$$U_{\text{ж}} = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r}, \quad R_2 \leq r \leq R_3; \quad (24)$$

$$r = R_2, \quad P = P_2; \quad (25)$$

$$r = R_3, \quad P = P_3. \quad (26)$$

Обозначения: U – скорость фильтрации, м/с; f – пористость; k – проницаемость, м^2 ; μ – вязкость, Па·с; P – давление, Па.

Система уравнений (21) – (26) решена совместно с (1) – (20) методом конечных разностей. При этом уравнение неразрывности (21) разрешено с использованием схемы «неявный левый уголок» или «неявный правый уголок» в зависимости от направления расчета.

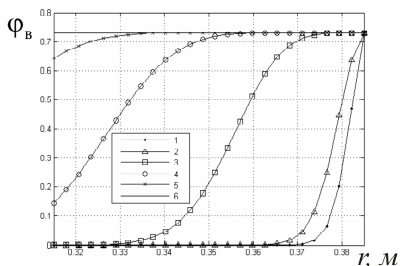


Рис. 4. Распределение объемной доли влаги по толщине изоляции из минеральной ваты при разности давлений 10 Па в различные моменты времени: 1 – 500 с; 2 – 1 000 с; 3 – 5 000 с; 4 – 10 000 с; 5 – 15 000 с; 6 – 20 000 с.

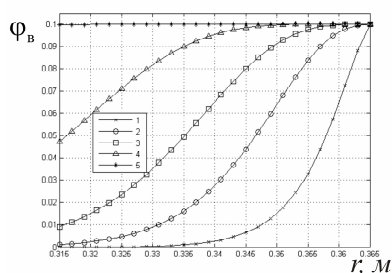


Рис. 5. Распределение объемной доли влаги по толщине ППУ изоляции при разности давлений 1000 Па в различные моменты времени: 1 – $2,5 \cdot 10^3$ с; 2 – 10^4 с; 3 – $1,5 \cdot 10^4$ с; 4 – $2,5 \cdot 10^4$ с; 5 – $5 \cdot 10^4$ с

На рис. 4, 5 даны типичные распределения объемных долей влаги по толщине слоя теплоизоляции.

Проницаемость минеральной ваты принималась равной $3.75 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$, а ППУ – $8.8 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$. Перепады давлений, необходимые для расчета скоростей фильтрации, задавались параметрически и соответствовали давлениям слоя воды над изоляцией трубопровода h (рис. 1).

В таб. 6 приведены характерные времена насыщения изоляции влагой до предельного значения для рассматриваемых конфигураций трубопроводов.

Таб.6. Характерные времена насыщения тепловой изоляции влагой.

Вариант численного эксперимента		Перепад давлений, Па					
		10	20	50	100	500	1000
Длительность насыщения изоляции влагой, сек	Минеральная вата	$2 \cdot 10^4$	10^4	$5 \cdot 10^3$	2500	500	300
	ППУ	$4.5 \cdot 10^6$	$2.5 \cdot 10^6$	10^6	$5 \cdot 10^5$	10^5	$5 \cdot 10^4$

Анализ результатов численных экспериментов, приведенных в таб. 6, позволяет сделать вывод о том, что для материалов с относительно высоким коэффициентом проницаемости (изделия из минеральной, стеклянной ваты) нестационарным процессом увлажнения, в силу его малой продолжительности, можно пренебречь. В случаях же материалов, имеющих достаточно низкую проницаемость (ППУ, пенобетон и др.), нестационарный процесс насыщения теплоизоляции влагой необходимо учитывать при проведении оценки масштабов тепловых потерь трубопроводов находящихся в условиях затопления каналов тепловых сетей.

Оценка тепловых потерь теплотрубопровода с учетом испарения и фильтрации пара в слое пористой теплоизоляции. Учет наличия процесса испарения влаги в слое пористой тепловой изоляции теплотрубопровода поясняется рис. 6, где схематично показано поперечное сечение рассматриваемой системы.

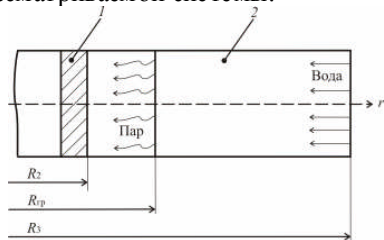


Рис.6. Схема поперечного сечения рассматриваемой системы: 1 – стенка трубы, 2 – тепловая изоляция.

Вода, проникая в пористую структуру изоляции, формирует подвижную границу $R_{пр}$ на которой происходит испарение, а образовавшийся пар, вследствие роста давления, фильтруется в направлении к внутренней поверхности тепловой изоляции трубопровода R_2 .

В математической модели теплопереноса в системе «теплотрубопровод – окружающая среда» (1) – (26) испарение влаги учитывается введением в уравнение теплопроводности для слоя теплоизоляции (27) дополнительного

члена (последний в правой части). Одномерное уравнение теплопроводности для слоя теплоизоляции в этом случае представлялось в форме:

$$C_{\Pi} \rho_{\Pi} \frac{\partial T_{\Pi}}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{\Pi} \cdot r \frac{\partial T_{\Pi}}{\partial r} \right) - Q \cdot W \cdot \frac{F}{V}, \quad \tau > 0, \quad R_2 \leq r \leq R_3. \quad (27)$$

Начальные и граничные условия в рассматриваемой постановке задачи аналогичны краевым условиям задачи (1) – (19).

Скорость испарения определялась из выражения:

$$W = \left[A(P_{\text{нас}} - P_{\text{пар}}) \right] / \sqrt{\frac{2\pi R_g \cdot T(\tau, R_{\text{пр}})}{M}}. \quad (28)$$

Уравнение неразрывности для паровой компоненты имело вид:

$$\frac{\partial(\rho_{\Pi} \varphi_{\Pi})}{\partial \tau} + \frac{\partial(U_{\Pi} \rho_{\Pi} \varphi_{\Pi})}{\partial r} + \frac{U_{\Pi} \rho_{\Pi}}{r} \varphi_{\Pi} = 0, \quad \tau > 0, \quad R_2 \leq r \leq R_3; \quad (29)$$

$$\rho_{\Pi} = (P \cdot M) / (R_g \cdot T). \quad (30)$$

Начальное условие:

$$\tau = 0, R_2 \leq r \leq R_3, \quad \varphi_{\Pi} = 0. \quad (31)$$

Граничное условие:

$$\tau > 0, r = R_{\text{пр}}, \quad \varphi_{\Pi} = \varphi_{\text{пр}}. \quad (32)$$

Объемная доля пара на подвижной границе испарения определялась из следующего соотношения:

$$\varphi_{\text{пр}} = V_{\Pi} / (V_{\Pi} + V_{\text{возд}}) = \left(\frac{m_{\Pi}}{\rho_{\Pi}} \right) / \left(\frac{m_{\Pi}}{\rho_{\Pi}} + \frac{m_{\text{возд}}}{\rho_{\text{возд}}} \right).$$

Массы пара m_{Π} и воздуха $m_{\text{возд}}$ можно найти из выражений:

$$m_{\Pi} = \int_0^{\tau} W \cdot S \cdot d\tau,$$

$$m_{\text{возд}} = \rho_{\text{возд}} \cdot S \cdot (R_{\text{пр}} - R_2).$$

Система уравнений (28) – (32) решена совместно с уравнениями (1) – (27) численным способом с использованием вышеописанных методов.

Координата подвижной границы испарения $R_{\text{пр}}$ определялась из совместного решения системы уравнений (1) – (32).

Парциальное давление испаряющейся компоненты в выражении (28) вычислялось методом Риделя-Планка-Миллера.

Скорость фильтрации пара U_{Π} определялась из уравнения:

$$W = \rho_{\Pi} \cdot U_{\Pi}.$$

Условие прекращения процессов фильтрации пара и воды в слое теплоизоляционного материала вводилось в виде равенства:

$$P_{\text{пара}} = P_{\text{атм}} + P_{\text{ст. воды}},$$

где $P_{\text{пара}} = (R_g T \rho_p) / M$; $P_{\text{ст. воды}} = \rho_{\text{ж}} g h$.

Обозначения: W – скорость испарения, кг/(м²·с); Q – теплота фазового перехода, Дж/кг; F – площадь, м²; V – объем, м³; $P_{\text{нас}}$ – давление насыщения, Па; $P_{\text{парц}}$ – парциальное давление, Па; A – коэффициент аккомодации; M – молекулярная масса паров, кг/моль; R_g – газовая постоянная, Дж/(моль·К); m – масса, кг; S – единичная площадка, м²; $P_{\text{пара}}$ – давление пара, Па; $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, Па; $P_{\text{ст. воды}}$ – гидростатическое давление, Па; g – ускорение свободного падения, м²/с; h – высота столба воды (рис. 1), м.
Индексы: п – пар; возд – воздух; гр – подвижная граница испарения.

В таб. 7 приведены результаты численного анализа величины тепловых потерь трубопроводов рассматриваемых конфигураций в условиях увлажнения теплоизоляции с учетом испарения и фильтрации пара.

Таб.7. Результаты численного анализа тепловых потерь трубопровода в условиях увлажнения изоляции с учетом испарения и фильтрации пара.

Изоляция	h , м	$T_{\text{пл}}$, К	Ширина области занятой паром, м	q_L (с учетом испарения влаги), Вт/м	q_L^* (без учета испарения влаги), Вт/м	$(q_L - q_L^*) /$ q_L^* , %
Минераловата	0.1	373	$3 \cdot 10^{-4}$	1032.7	1091.5	5.41
		383	$9 \cdot 10^{-4}$	1051.3	1233.8	14.8
		393	$15 \cdot 10^{-4}$	1066.8	1376.2	22.5
		403	$21 \cdot 10^{-4}$	1079.9	1518.5	28.9
	0.01	373	$5 \cdot 10^{-4}$	995.99	1091.5	8.70
		383	$12 \cdot 10^{-4}$	1001.6	1233.8	18.8
		393	$18 \cdot 10^{-4}$	1020.8	1376.2	25.8
		403	$25 \cdot 10^{-4}$	1023.6	1518.5	32.6
Пенополиуретан	0.1	373	$3 \cdot 10^{-4}$	207.40	249.43	16.8
		383	$11 \cdot 10^{-4}$	210.67	281.92	25.2
		393	$17 \cdot 10^{-4}$	218.40	314.43	30.5
		403	$26 \cdot 10^{-4}$	221.97	346.93	36.1
	0.01	373	$7 \cdot 10^{-4}$	196.31	249.43	21.3
		383	$14 \cdot 10^{-4}$	202.96	281.92	28.0
		393	$22 \cdot 10^{-4}$	206.29	314.43	34.4
		403	$30 \cdot 10^{-4}$	209.12	346.93	39.7

Следствием наличия испарения является формирование паровой прослойки, ширина которой тем больше, чем больше температура $T_{\text{пл}}$ и меньше величина h . Образовавшаяся паровая область играет роль, своего рода «теплоизолятора», что приводит к снижению теплотерь (таб. 7).

Из данных таб. 7 видно, что учет эффекта испарения позволяет уточнить величину потерянной тепловой энергии при анализе масштабов теплотерь трубопроводов, работающих в условиях увлажненной изоляции. При этом

определяющими параметрами являются температура внутренней поверхности $T_{\text{пл}}$ и высота столба воды над верхней точкой изоляции трубопровода h (рис.1). Так, в зависимости от значений параметров $T_{\text{пл}}$ и h , относительная величина линейных тепловых потерь q_L изменяется от 5.4% до 32.6% для трубопровода, изолированного минеральной ватой и на 16.8–39.7% для изоляции из пенополиуретана.

Ширина паровой области (таб. 7) относительно мала, однако, наличие даже такой малой области «теплоизолятора» приводит к заметному снижению уровня тепловых потерь трубопроводов в условиях затопления.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Теплотери трубопроводов в условиях затопления каналов тепловых сетей значительно превышают нормативные значения (до 9 – 9.5 раз).
2. Основной причиной интенсификации процесса потери тепловой энергии при затоплении каналов теплосетей является резкое увеличение теплопроводности изоляции при насыщении ее влагой.
3. Применение двумерной модели теплопереноса не приводит к значительному уточнению результатов и возможно использование одномерной модели рассматриваемой системы для оценки тепловых потерь трубопроводов, находящихся в условиях затопления.
4. Величина потерь тепловой энергии трубопровода, находящегося в условиях частичного погружения в воду, прямопропорциональна возрастанию степени затопления канала теплотрассы водой.
5. При работе теплопроводов в условиях затопления область решения задачи можно ограничить внешней поверхностью теплоизоляции.
6. Процесс насыщения тепловой изоляции влагой носит нестационарный характер и зависит от проницаемости изоляции и перепада давлений.
7. Учет наличия эффекта испарения влаги в слое теплоизоляционного материала позволяет заметно уточнить величину тепловых потерь.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кузнецов Г. В., Половников В. Ю. Численное моделирование теплопереноса через систему теплоизоляции магистральных трубопроводов в условиях затопления // XXVIII Сибирский теплофизический семинар: Тезисы докладов. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2005. – С. 127 – 128.
2. Кузнецов Г. В., Половников В. Ю. Тепловые потери магистральных трубопроводов в условиях частичного затопления // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы): Труды конференции. – М.: Изд-во ВИМ, 2005. – Т. 1. – С. 167 – 170.

3. Половников В. Ю. Моделирование тепловых потерь в системах магистрального теплоснабжения в условиях затопления трубопроводов // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы одиннадцатой Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – С. 184 – 186.
4. Кузнецов Г. В., Половников В. Ю. Математическая модель теплового состояния магистрального теплотрубопровода в условиях затопления // Деп. в ВИНТИ, 23.06.2006. № 841 – В2006.
5. Половников В. Ю. Анализ масштабов потерь теплоты магистральными теплопроводами в условиях затопления // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: Материалы Пятой Российской научно-технической конференции. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2006. – Т. 2. – С. 84 – 87.
6. Кузнецов Г. В., Половников В. Ю. Анализ теплотерь магистральных теплотрубопроводов в условиях затопления с учетом нестационарности процесса насыщения теплоизоляции влагой // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. – С. 237 – 239.
7. Кузнецов Г. В., Половников В. Ю. Затопление каналов тепловых сетей: причины и последствия // Новости теплоснабжения. – 2006. – №8. – С. 49 – 50.
8. Кузнецов Г. В., Половников В. Ю. Тепловые потери магистральных трубопроводов в условиях полного или частичного затопления // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2006. – №3–4. – С. 3 – 12.
9. Polovnikov V. Y. Main thermal pipelines thermal losses in conditions of flooding in view of saturation of thermal isolation by a moisture // Modern Techniques and Technologies (MTT' 2006): The twelfth International and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists. – Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2006 – P. 168 – 171.
10. Половников В. Ю. Теплотери трубопроводов в условиях затопления канала теплосети с учетом нестационарности насыщения изоляции влагой // Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании: Сборник материалов II Международной научно-технической конференции. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2006. – С. 165 – 167.
11. Кузнецов Г. В., Половников В. Ю. Численный анализ потерь тепла магистральными трубопроводами в условиях затопления с учетом нестационарности процесса насыщения теплоизоляции влагой // Национальная конференция по теплоэнергетике: Материалы докладов / Под ред. Ю. Г. Назмиева, В. Н. Шлянникова. – Казань: Иссл. центр пробл. энерг. КазНЦ РАН, 2006. – Т.1. – С. 315 – 318.

12. Кузнецов Г. В., Половников В. Ю. Оценка масштабов тепловых потерь в магистральных теплотрубопроводах в условиях затопления // Промышленная энергетика. – 2006. – № 8. – С. 32 – 34.
13. Кузнецов Г. В., Половников В. Ю. Математическая модель теплопереноса в насыщенной влагой изоляции магистрального теплотрубопровода с учетом испарения и фильтрации пара // Деп. в ВИНТИ, 09.10.2006. № 1251 – В2006.
14. Кузнецов Г. В., Половников В. Ю. Численный анализ потерь тепла магистральными трубопроводами в условиях затопления // Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену: В 8 томах. Т. 7. Радиационный и сложный теплообмен. Теплопроводность, теплоизоляция. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – С. 260 – 263.