

Примаков Сергей Сергеевич

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ СЛОЖНЫХ МНОГОИТОЧНЫХ СИСТЕМ  
ЗАГЛУБЛЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

05.13.18 – математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре механики многофазных систем Тюменского государственного университета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Даниэлян Юрий Саакович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Малюшин Николай Александрович

доктор технических наук, профессор  
Моисеев Борис Вениаминович

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное  
предприятие «Фундаментпроект», г. Москва.

Защита состоится «19» декабря 2006г. в 14 ч. 00 мин. на заседании  
Диссертационного совета К 212.274.01 при Тюменском государственном  
университете по адресу 625023, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15а, аудитория  
217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского  
государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Бутакова Н.Н.

## ВВЕДЕНИЕ.

### Актуальность проблемы.

В настоящее время, когда во всем мире вопрос об энергоресурсах, стоит особенно остро, процессы разработки, проектирования и эксплуатации объектов нефтегазового комплекса на территории нашей страны приобретают все большее стратегическое значение. Одной из главных топливно-сырьевых баз нашей родины являются северные регионы Тюменской области, освоение новых территорий которой и их эксплуатация тесно связаны со строительством. В суровых климатических условиях крайнего севера существенно повышаются требования ко всем техническим решениям.

Так как северные территории – это, в основном, территории с низкими среднегодовыми температурами и широко простирающимися вечномерзлыми грунтами, то при проектировании сооружений на таких грунтах важную роль играет тепловой расчет. С одной стороны, необходимо обеспечить тепловой режим окружающей среды, чтобы не допустить протаивания вечной мерзлоты, с другой стороны, необходимо обеспечивать надлежащие эксплуатационные температуры, такие как температуры транспортируемых жидкостей, температуры внутри зданий, а также, подведенных к ним коммуникаций и пр.

Ошибки в тепловых расчетах могут привести к тому, например, что вечномерзлые грунты под трубопроводами или зданиями начнут оттаивать, теряя при этом свою несущую способность, что может в свою очередь привести к аварии или даже к разрушению инженерного сооружения. Неучтенная же потеря тепла от самих теплоносителей может привести, например, к недопустимо низкой температуре нефти в транспортном трубопроводе, резкому увеличению ее вязкости, выпадению солей и парафинов и полной закупорке магистрали.

Основная работа на северных месторождениях связана с добычей и транспортом нефти и газа, а так как в большинстве случаев транспортировка осуществляется посредством заглубленных трубопроводов, то понятно, что

тепловой расчет подземных коммуникаций является одним из самых важных моментов при разработке проектных решений на территории крайнего севера.

В последнее время совместная прокладка трубопроводов находит все большее применение. Это связано с тем, что с точки зрения строительства и эксплуатации, гораздо дешевле и проще прокладывать трубы нефтесбора, поддержания пластового давления и пр. в одной траншее. А это значит, что тепловое влияние трубопроводов друг на друга будет существенным. Таким образом, расчет теплотерь от совместно проложенных трубопроводов, а также определение температурных полей вокруг системы в целом является сложной и в то же время актуальной задачей сегодня.

На сегодняшний день существуют методики, позволяющие решать такие задачи численно. Обычно использование таких методик связано с известными проблемами, такими как выбор границ расчетной области, задание условий на границах и пр.

Таким образом, большой интерес вызывают методики, позволяющие решать такие задачи аналитически. В рекомендациях по проведению тепловых расчетов сложных систем заглубленных трубопроводов Ю.С. Даниэляна и П.А. Яницкого за 1987 г. подробно рассмотрен целый ряд методик, позволяющих аналитически получать решения таких задач с определенной степенью точности. Как правило, расчет с использованием таких методик связан с рядом ограничений и допущений и в некоторых ситуациях необходимая точность в процессе решения не может быть достигнута.

Основные проблемы методик, рассмотренных в рекомендациях, заключаются в том, что при тепловых расчетах, граничным условиям на поверхности трубопроводов удается удовлетворить только лишь в двух точках. Это связано с тем, что в методиках не учитывается взаимное тепловое воздействие трубопроводов друг на друга. Таким образом, удовлетворительные результаты можно получить лишь при условии того, что трубопроводы расположены настолько далеко друг от друга, что их тепловое взаимодействие не существенно. Кроме того, известные подходы для решения такого рода задач

не позволяют учесть распределение температуры в грунте, вызванное сезонными процессами на поверхности.

Однако, изменение температуры грунта на глубинах заложения коммуникаций под действием сезонных процессов может достигать десятков градусов. Следовательно, трубопроводы большого диаметра, применяющиеся для транспортировки жидкостей и газа, могут располагаться в различных температурных зонах, что не может не повлиять на теплофизическую ситуацию вокруг коридора коммуникаций в целом. В особенности это связано с тепловым расчетом газопроводов большого диаметра, где в качестве граничных условий, задавать температуру на поверхности трубопровода некорректно, так как при существенно меняющейся по глубине температуре в грунте, температуры на верхней и нижней образующей газопровода могут существенно отличаться. В таком случае, более оправданными с физической точки зрения граничными условиями являются не равенство температур, а равенство тепловых потоков от газа к трубе и от трубы в грунт, что так же не представляется возможным в рамках существующих на сегодняшний день методик.

Таким образом, становится понятно, что для учета таких важных факторы необходимы новые подходы и способы решения таких задач, а их получение представляет научный интерес.

### **Цель и задачи работы.**

Целью диссертационной работы является разработка методики для расчета теплотерь от сложных систем подземных трубопроводов. Методика должна позволять учитывать тепловое взаимодействие трубопроводов при их близкой совместной прокладке, распределение температуры в грунтах, вызванное сезонными процессами на поверхности, позволять задавать в качестве граничных условий не только температуру, но и равенство тепловых потоков от теплоносителя к трубе и от трубы в грунт.

Для достижения главной цели решались следующие задачи:

1. Моделирование теплового режима трубопровода с помощью необходимого количества тепловых источников, для удовлетворения граничным условиям с заданной точностью.
2. Приближенное аналитическое решение задачи теплового расчета одного трубопровода с учетом влияния температурного поля, обусловленного сезонными процессами.
3. Приближенное аналитическое решение задачи теплового расчета системы заглубленных трубопроводов с учетом влияния сезонных процессов.
4. Проведение сравнительного анализа результатов расчетов по предлагаемой методике с результатами расчетов, проведенных по существующей методике, а так же с результатами численных расчетов.
5. Моделирование теплового режима газопроводов большого диаметра в грунтах с профилем температур, с заданием в качестве граничных условий равенства тепловых потоков от газа к трубе и от трубы в грунт.
6. Аналитическое решение задачи по расчету падения температуры в системе заглубленных трубопроводов по длине при произвольных диаметрах трубопроводов, глубин заложения, расстояний между ними и направлениях течений теплоносителей.
7. Разработка программных комплексов для расчета всех выше перечисленных задач.

#### **Научная новизна.**

1. Разработана новая методика определения тепловых потерь от сложной многониточной системы параллельных заглубленных трубопроводов, позволяющая, путем увеличения точности удовлетворения граничным условиям на поверхности всех трубопроводов, входящих в систему, учитывать тепловое взаимодействие трубопроводов, рассчитывать падение температуры энергоносителя по длине трубопроводов.
2. Получена новая методика определения температурных полей вокруг системы заглубленных трубопроводов, позволяющая, путем увеличения

точности удовлетворения граничным условиям на поверхности всех трубопроводов, входящих в систему, учитывать тепловое взаимодействие трубопроводов, рассчитывать ореол оттаивания вокруг системы заглубленных трубопроводов, учитывая распределение температур в грунте.

3. Впервые сформулирована постановка и получено решение задачи по определению как температурного поля в грунте вокруг трубопровода, так и распределение температуры на поверхности трубы в случае неизотермического трубопровода.

4. Разработан программный комплекс для тепловых расчетов систем заглубленных трубопроводов с учетом влияния сезонно распределенной температуры в грунте, теплового взаимодействия трубопроводов в системе.

#### **Практическое значение.**

Практическое значение работы заключается в возможности проведения различных тепловых расчетов систем заглубленных трубопроводов при проектировании таких инженерных сооружений как подземные коридоры коммуникаций.

Разработанный программный комплекс, позволяет определить тепловые потери от системы подземных трубопроводов, ореол оттаивания под такой системой, при этом учитывать распределение температуры в грунте и задавать различные граничные условия на поверхностях трубопроводов в системе.

**Обоснованность и достоверность** представленных в диссертации теоретических постановок определяется способом вывода из соответствующих законов сохранения и сравнением результатов моделирования с приведенными в научной литературе данными и численными расчетами.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на следующих научных и научно-практических дискуссиях:

- Международная конференция “Теория и практика оценки состояния криосферы земли и прогноз ее изменений”. Тюмень, 2006 г.
- Международная конференция “Город и геологические опасности”. Санкт-Петербург, 2006 г.
- Международная конференция “Приоритетные направления изучения криосферы земли”. Пущино, 2005 г.
- Международная конференция “Криосфера нефтегазоносных провинций”. Тюмень, 2004 г.
- Всероссийская конференция студентов-физиков и молодых ученых. Новосибирск 2006 г.
- Всероссийская конференция студентов-физиков и молодых ученых. Екатеринбург 2005 г.
- Всероссийская конференция студентов-физиков и молодых ученых. Москва 2004 г.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 8 публикациях.

**Структура и объем работы.** Диссертация объемом 107 страниц печатного текста, состоит из введения, 4 глав, 24 рисунков, 20 таблиц, основных результатов и выводов, списка литературы и оглавления.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первая глава** представляет анализ работ, посвященных решению теплофизических задач, описанию математических и программных приемов для их решения. В главе рассмотрены работы, описывающие некоторые инженерные методики теплового расчета различных систем трубопроводов. Также приведены примеры практических задач, решаемых с помощью таких методик.

Рассмотрены различные математические подходы при решении задач практической геокриологии и приемы программирования теплофизических задач и математических преобразований.

**Вторая глава** представляет основные этапы работы по нахождению способов развития существующей методики теплового расчета для одного заглубленного трубопровода. Развитие достигается путем учета новых факторов, влияющих на процесс теплового расчета, а также более точному удовлетворению граничным условиям.

Для определения тепловых потерь теплоносителей (жидкости, газа) в системе трубопроводов, необходимо знать суммарный тепловой поток, исходящий из заглубленных труб в грунт. Величина теплового потока определяется разностью температуры окружающего трубу грунта и температуры теплоносителя в трубе. Так как температура в грунте по длине трубопровода меняется намного меньше, чем температура в сечении перпендикулярном направлению течения жидкости или газа, то, применяя гипотезу плоских сечений, задачу по определению теплового поля грунта можно решать в двумерной постановке.

Таким образом, решается задача по определению стационарного температурного поля в плоскости перпендикулярной сечению одного заглубленного трубопровода в однородном грунте с заданной температурой на поверхности грунта и на поверхности трубопровода.

Уравнение, описывающее стационарный теплоперенос имеет вид:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

а граничные условия записываются так:

$$\begin{aligned} T(x,0) &= T_0 \\ T_{\Gamma}(x,y) &= T_{тр} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $T_0$  – температура на поверхности грунта;

$\Gamma$  – окружность трубопровода;

$T_{тр}$  – температура, заданная на поверхности трубопровода.

В нормативной литературе такая задача решается с использованием решения Форгеймера, которое является точным и описывает температурное поле в грунте. Задача решается в полупространстве ограниченном осью  $X$  ( $Y > 0$ ). Точка, где находится тепловой источник не входит в область решения, так как не удовлетворяет уравнению (1).

$$T(x,y) = C \ln \left( \frac{(x-x^*)^2 + (y+y^*)^2}{(x-x^*)^2 + (y-y^*)^2} \right) + T_0 \quad (3)$$

где  $C$  – мощность теплового источника;

$T_0$  – температура поверхности грунта;

$x, y$  – координаты;

$x^*, y^*$  – координаты источника  $q^+$ ;

Постановка задачи такова, что температура грунта на бесконечном расстоянии слева и справа от трубопровода не меняется по глубине и равна температуре на поверхности  $T_0$ . Однако, понятно, что в реальных природных условиях, под действием сезонных процессов, температура в грунте может меняться по глубине. Так как характерное время теплового взаимодействия трубопровода с грунтом намного меньше, чем время протекания сезонных процессов, то задача решается в квазистационарном приближении.

Таким образом, решается задача по определению стационарного температурного поля вокруг одного заглубленного трубопровода в однородном грунте с заданным распределением (профилем) температуры по глубине грунта

вдали от трубопровода. Предлагается учесть профиль температур с помощью некоторой линейной функции  $T(y)$ . В силу линейности задачи, решение ищется в виде суперпозиции температурного поля от теплового источника и температурного поля, обусловленного профилем температур.

$$T(x, y) = C \ln \left( \frac{(x - x^*)^2 + (y + y^*)^2}{(x - x^*)^2 + (y - y^*)^2} \right) + T(y) \quad (4)$$

Понятно, что, решая задачу таким образом, мы учитываем влияние профиля температур. Однако, в такой постановке граничные условия на поверхности трубопровода могут быть удовлетворены лишь приближенно.

Методика решения такой задачи заключается в том, чтобы перебором найти такое положение и мощность источника, чтобы как можно точнее удовлетворить граничным условиям на трубе хотя бы в двух точках. В качестве таких точек были выбраны верхняя точка трубопровода  $y_v$ , как наиболее подверженная влиянию температуры на поверхности грунта и нижняя точка трубопровода  $y_n$ , температура которой обуславливает глубину протаивания.

Таким образом, удалось приближенно решить задачу по нахождению температурного поля вокруг заглубленного трубопровода в грунте с заданным распределением температуры (профилем), удовлетворяя граничным условиям на поверхности трубопровода лишь приближенно и только в двух точках.

Однако, при расчете трубопроводов большого диаметра должен учитываться тот факт, что в случае наличия профиля температуры по глубине, значения температур на верхней и нижней образующих трубопровода не равны между собой. Особенно такому эффекту подвержены газопроводы в силу своей специфики. Таким образом, физически более разумным граничным условием на поверхности трубы является непрерывность теплового потока от газа в грунт.

$$\lambda \frac{\partial T_{mp}}{\partial n} = \alpha (T_{mp} - T_{ж}) \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к внутренней стенке трубы;

$T_{\text{гр}}$  – температура грунта вблизи стенки трубы;

$T_{\text{ж}}$  – температура жидкости (газа) в трубе;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности грунта;

$n$  – нормаль к стенке трубы.

Таким образом, решается задача по нахождению температурного поля вокруг трубопровода неизотермичной поверхностью в грунте с заданным профилем температур. Полученное решение является приближенным, так как граничные условия на поверхности трубопровода удовлетворяются лишь приближенно и только в двух точках.

Методика решения такой задачи заключается в том, чтобы найти перебором координаты и мощность теплового источника так, чтобы на верхней и нижней точках трубопровода как можно точнее выполнялось условие (5).

Для того, чтобы определить зависимость мощности источника от температуры газа и окружающей среды, было решено провести исследование, в ходе которого формула (4) подставлялась в формулу (5) и обезразмеривалась. Затем полученное выражение, используя метод планирования эксперимента, было подвергнуто программной обработке с целью получения некоторой эмпирической зависимости.

В ходе исследования было выявлено, что в данной постановке задачи удовлетворить граничным условиям в двух точках с помощью только одного источника не всегда представляется возможным. Однако, увеличивая количество точечных тепловых источников, можно значительно улучшить описание теплового режима трубопровода. Так, использование четырех источников позволяет удовлетворять граничным условиям в четырех точках: например, в верхней, нижней, левой и правой. Таким образом, решение поставленной задачи будет выглядеть так:

$$T(x, y) = \sum_{k=1}^n C_k \ln \sqrt{\frac{(x - x_k^*)^2 + (y + y_k^*)^2}{(x - x_k^*)^2 + (y - y_k^*)^2}} + T(y) \quad (6)$$

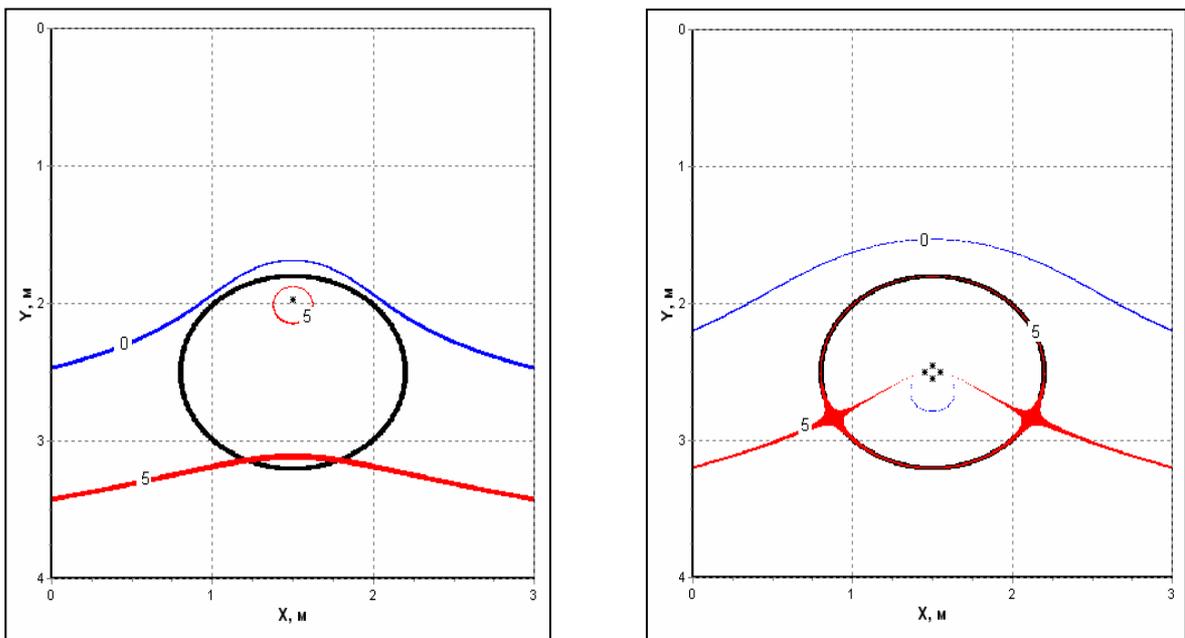
Где  $n$  – количество тепловых источников в задаче (здесь  $n=4$ );

$x_k^*, y_k^*$  – координаты  $k$ -го теплового источника;

$C_k$  – мощность  $k$ -го теплового источника;

Считая положения источников и вид профиля температур заданными, решение задачи свелось к поиску мощностей четырех источников, то есть, к решению системы из четырех линейных уравнений типа (4) с четырьмя неизвестными  $C_k$ . В таком подходе граничными условиями также могут являться как температура, так и непрерывность теплового потока (5) на границе трубопровода.

Ниже, на рис. 1, приведен пример, где показано, что с помощью одного источника не удастся удовлетворить граничным условиям (в данном случае в качестве граничных условий используется температура на поверхности трубопровода) на верхней и нижней точках трубопровода.



**Рис. 1. Температурные поля, полученные с помощью одного источника слева и четырех симметрично расположенных источников справа.**

На рисунке 1 круговыми линиями изображены контуры трубопроводов, линиями со значениями температур в разрывах – изотермы, а звездочками обозначены тепловые источники. Температура на поверхности трубопровода считается равной  $+5^{\circ}\text{C}$ .

Для оптимизации положения тепловых источников, а также для оценки точности методики была введена величина (7), характеризующая суммарную ошибку расчета. В случае, где в качестве граничных условий задается температура на трубе, эта величина выглядит так:

$$P = \oint_L \frac{(S_t - T)^2}{2\pi R S_t^2} dL \quad (7)$$

где  $L$  – окружность трубопровода;

$S_t$  – температура на поверхности трубопровода заданная по условиям конкретной задачи;

$T$  – температура на поверхности трубопровода, полученная в процессе решения;

$R$  – радиус трубопровода;

Разработанная методика по нахождению решения заключается в том, что симметрично расположенные по окружности источники внутри трубы находятся на одинаковом расстоянии от центра трубы  $r$ . Меняя значение этой величины, находится значение среднеквадратичного отклонения заданной температуры на трубе от рассчитанной температуры. Таким образом, выбирается такая величина  $r$ , чтобы параметр  $P$  был минимальным.

Одним из важных показателей полученного решения является сумма найденных мощностей источников в трубе, которая пропорциональна тепловому потоку, исходящему из трубопровода в грунт и определяет не только вид ореола оттаивания, но и величину тепловых потерь, что может быть использовано для расчета падения температуры по длине трубопровода. Значение этой величины приведено в Таблице 1.

Оценка точности двух разных методик.

Таблица 1.

Методика \ Параметр	Сумма мощностей источников	$P$
С одним источником	+3,3°C	868,2
С четырьмя источниками	+4,66°C	0,3

Значения величины  $P$  для разных методик показали, что методика, использующая для описания теплового поля вокруг трубопровода четыре источника, удовлетворяет граничным условиям на порядки лучше, а, следовательно, точнее описывает теплофизическую ситуацию в грунте. Значения величины  $P$  для разных методик приведены в таблице 1.

*Третья глава* посвящена изучению и работе над тепловыми расчетами систем заглубленных трубопроводов. В настоящее время совместная прокладка трубопроводов является широко распространенным инженерным решением. Трубопроводы в системе могут нагревать или охлаждать друг друга (например, в системах трубопроводов, использующих метод взаимного подогрева при встречном движении сред в разных трубах). Поэтому, точность определения степени теплового взаимодействия трубопроводов между собой сильно влияет на величину теплотерь от каждого трубопровода.

Таким образом, в третьей главе решается задача по нахождению температурного поля вокруг системы близко расположенных трубопроводов различного диаметра и глубины заложения с учетом их теплового взаимодействия и влияния сезонного профиля температур в грунте.

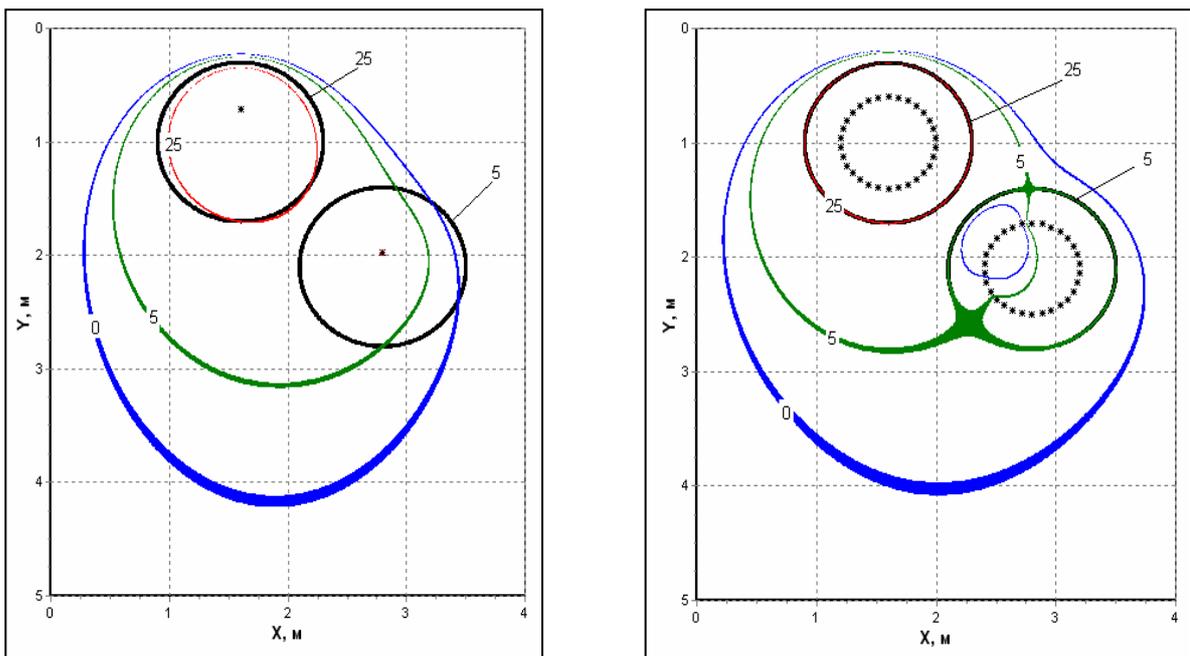
Как и в предыдущей задаче, будем использовать решение в виде суперпозиции полей нескольких источников и температурного поля в грунте, вызванного сезонными процессами (профиля температур).

В методике по решению этой задачи предлагается тепловое поле каждой из  $M$  труб описывается с помощью  $N$  источников с целью удовлетворить граничным условиям в  $N$  точках, равномерно распределенных по окружности каждой из  $M$  труб. Таким образом, подставляя решение (6) в новые граничные

условия, была получена система из  $M \times N$  линейных уравнений типа (6) с  $M \times N$  неизвестными. Считая вид профиля температур и положения источников внутри труб заданными, решение задачи сводится к поиску  $M \times N$  неизвестных мощностей источников  $C_i$ , которые легко находятся из системы линейных уравнений.

Приближение заключается в том, что граничным условиям на поверхности трубопроводов удается удовлетворить точно лишь в  $M \times N$  точках. Однако, методика позволяет минимизировать суммарную величину  $P$  системы трубопроводов путем подбора оптимального радиуса кольца источников внутри трубопроводов. Для того, чтобы достичь необходимой точности, количество источников в каждой трубе должно быть различным в зависимости от геометрии и теплофизических характеристик данной конкретной задачи.

На рис. 2 приведен пример расчета двух близко расположенных трубопроводов большого диаметра с температурам на поверхности  $+25^\circ\text{C}$  и  $+5^\circ\text{C}$ . Трубы расположены на разной глубине в грунте с таким распределением температуры, что на поверхности температура грунта составляет  $-40^\circ\text{C}$ , а на глубине 6 м. –  $-20^\circ\text{C}$ .



**Рис. 2.** Слева 2 источника, положение которых определяется решением Форгеймера, справа 60 источников, положение которых подобрано программно

На рис. 2 круговыми линиями изображены контуры трубопроводов, а линиями со значениями температур в разрывах – изотермы. Вынесенные значения указывают значение температуры, заданной на поверхности соответствующей трубы, а звездочками обозначены источники. Из рисунка видно, что в случае, где температурное поле описывается с помощью двух источников, граничные условия на трубах удовлетворяются лишь в двух точках. В случае же, где температурное поле описывается с помощью шестидесяти источников, граничные условия на трубах удовлетворяются точно в шестидесяти точках трубопроводов, а в остальных практически точно (отклонение составляет не более  $0,005^{\circ}\text{C}$ ). Некоторые числовые результаты представлены в таблице 2.

**Результаты расчетов системы двух заглубленных трубопроводов Таблица 2.**

Методика, количество источников на трубу	Глубина ореола оттаивания м.	Радиус кольца источников $R_{\text{тр}}$ м.	Сумма мощностей источников $^{\circ}\text{C}$			Параметр ошибки $P$	
			Левая труба	Правая труба	Сумма	Левая труба	Правая труба
1	4,2	-	+58,44	+5,05	+63,49	28,41	34,98
30	4,0	0,57	+73,99	-2,33	+71,66	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$

Из таблицы 2 видно, что параметр  $P$ , характеризующий точность удовлетворения граничным условиям на трубах отличается на 7 порядков, суммарная мощность источников, характеризующая тепловые потери от системы трубопроводов отличается на 13%, что приводит к тому, что глубина ореола оттаивания в различных методиках отличается на 20см.

Точность полученной методики была проверена путем сравнения с численными расчетами, где в качестве критерия был выбран вид нулевой изотермы. В результате было установлено, что полученная методика позволяет

практически точно описывать теплофизическую ситуацию вокруг коридора коммуникаций.

*Четвертая глава* описывает применение всех, полученных в ходе научной работы, результатов для решения задачи по определению падения температуры теплоносителя по длине каждого трубопровода в коридоре коммуникаций. Таким образом, решается задача по определению падения температуры теплоносителей в каждой из близко расположенных трубопроводов в системе с учетом их теплового взаимодействия, где трубопроводы могут иметь разный диаметр и глубину заложения.

В диссертационной работе используется подход, позволяющий разбить трехмерную задачу, описывающую теплофизическую ситуацию вокруг коридора коммуникаций по всей длине, на одномерную и двумерную.

Одномерная часть задачи описывается уравнением падения температуры жидкости в трубе. Такое уравнение выводится из уравнения баланса и имеет вид:

$$cG \frac{dT}{dz} = q\sigma \quad (8)$$

где  $T$  – температура жидкости в трубе;

$z$  – линейная координата, направленная вдоль трубопровода;

$q$  – теплоотдача в грунт от трубы в точке  $z$ , приведенная на единицу длины;

$G, c$  – массовый расход и удельная теплоемкость жидкости в трубе;

$\sigma$  - показатель, определяющий направление течения жидкости в трубе и равный  $-1$  если жидкость течет слева направо и  $1$  если в обратном направлении;

В таком виде задача является незамкнутой, т.к. в правой части уравнения не содержится температура. Для того, чтобы замкнуть задачу тепловой поток  $q$

выражается через температуру жидкости в трубе. Понятно, что чем точнее будет найдена функция  $q(T)$  тем точнее можно будет определить падение температуры теплоносителя по длине трубопровода. Для системы заглубленных трубопроводов решение такой задачи сводится к решению системы дифференциальных уравнений типа (8).

Двумерная часть задачи определяет функции  $q_i(T_i)$  для каждого дифференциального уравнения. Применяя методику, полученную в третьей главе, можно описать тепловое взаимодействие трубопроводов друг с другом путем с помощью нескольких тепловых источников. В таком случае, функция  $q(T)$  запишется в виде:

$$q = \frac{1}{2\pi\lambda} \cdot \sum_{i=1}^N C_i \quad (9)$$

Методика, предложенная в третьей главе, позволяет записать систему  $M \times N$  уравнений, которая представляет температуры на образующих трубопроводов в виде линейной комбинации мощностей источников. Представив логарифмы при мощностях источников в виде координатной части  $K$ , можно записать систему уравнений в матричном виде:

$$K \cdot C = S \quad (10)$$

где  $K$  – матрица коэффициентов,

$C$  – столбец мощностей источников,

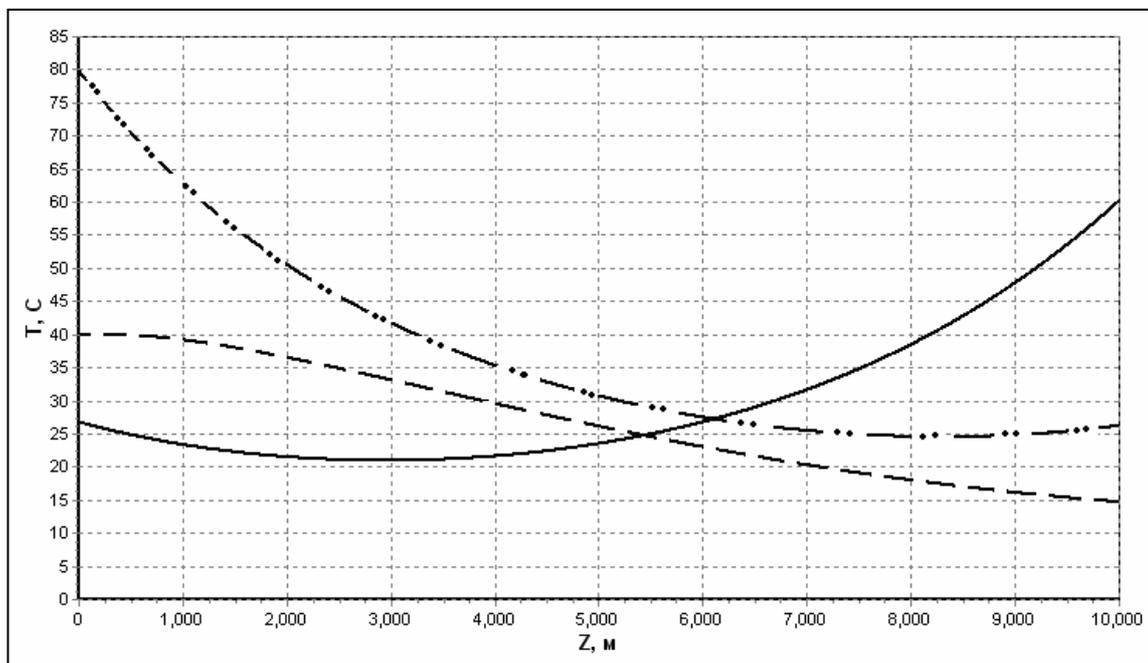
$S$  – столбец температур на образующих трубопроводов

Для определения суммарного теплового потока от каждой трубы в грунт нужно выразить из (10) мощности источников, что возможно в силу линейности задачи.

$$C = K^{-1} \cdot S \quad (11)$$

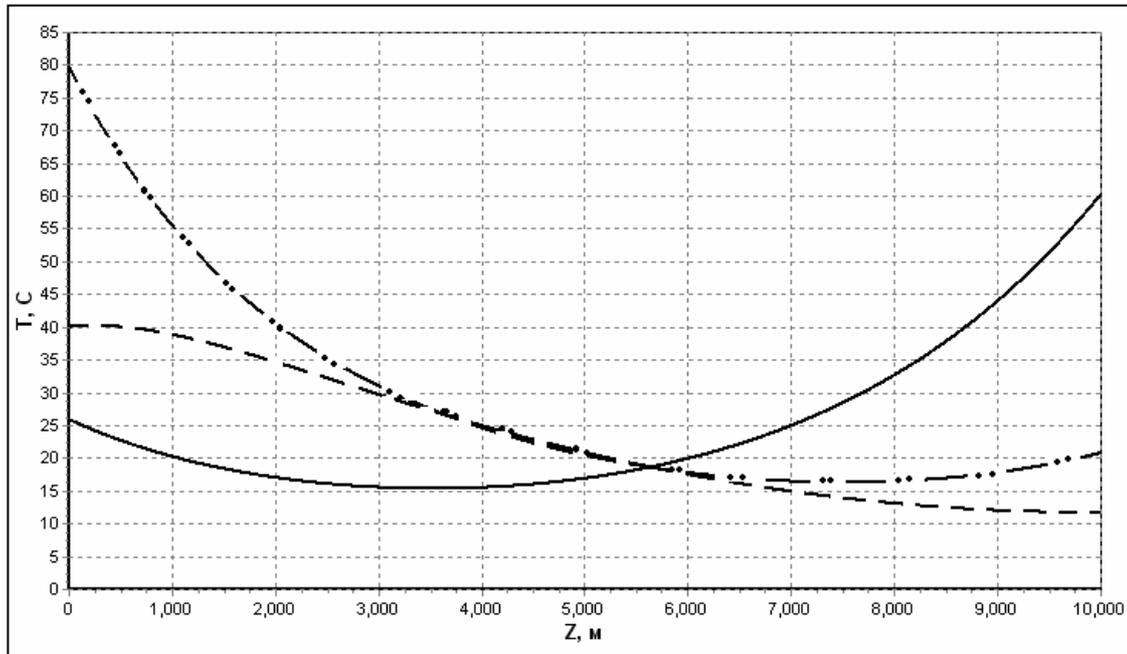
Особенно следует подчеркнуть, что в рассматриваемой задаче не требуется знать значения температур  $S$  в правой части (11). Важна их связь с источниками и их взаимным расположением относительно труб. Таким образом, мощность каждого источника может быть представлена в виде линейной комбинации температур. Тогда, подставляя (11) в (9), а полученное выражение в (8) получаем легко решаемую систему дифференциальных уравнений. Таким образом, тепловое взаимодействие трубопроводов учитывается более точно, что позволяет определять падение температуры теплоносителей по длине трубопроводов с учетом их теплового взаимодействия.

На рис. 3 представлен график падения температур в коридоре коммуникаций рассчитанный без учета теплового взаимодействия трубопроводов в системе.



**Рис. 3. Падение температуры продукта по трубопроводам коридора коммуникаций, рассчитанной по известной методике.**

На рис. 4 представлен график падения температур в коридоре коммуникаций рассчитанный с учетом теплового взаимодействия трубопроводов в системе.



**Рис. 4. Падение температуры продукта по трубопроводам коридора коммуникаций, рассчитанной по новой, предложенной методике.**

На рис. 3,4 сплошными линиями изображена температура жидкости, которая течет в трубе справа налево, а пунктирными - температура жидкости, которая течет в трубе слева направо. В таблице 3 приведены значения температур в некоторых точках трубопроводов.

#### Оценка падения температур

**Таблица 3.**

Известная методика				Предлагаемая методика					
№ трубы	$T_{нач}$ °C	$T_{макс}$ °C	$T_{мин}$ °C	$T_{кон}$ °C	№ трубы	$T_{нач}$ °C	$T_{макс}$ °C	$T_{мин}$ °C	$T_{кон}$ °C
1	+40,0	+40,0	+14,7	+14,7	1	+40,0	+40,2	+11,7	+11,7
2	+80,0	+80,0	+24,5	+26,2	2	+80,0	+80,0	+16,3	+20,7
3	+60,0	+60,0	+20,9	+26,8	3	+60,0	+60,0	+15,3	+26,0

Из таблицы 3 видно, например, максимальная температура трубы №1 в предлагаемой методике выше ее начальной температуре, что свидетельствует о взаимодействии этой трубы с более горячей трубой №2.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.

1. Разработана новая методика определения теплотерь от системы заглубленных трубопроводов, позволяющая: более точно учитывать тепловое взаимодействие трубопроводов между собой, рассчитывать совместно проложенные трубопроводы разных диаметров и на разной глубине.
2. Разработана новая методика определения теплового потока от системы заглубленных трубопроводов, позволяющая: более точно учитывать тепловое взаимодействие трубопроводов, рассчитывать совместно проложенные трубопроводы разных диаметров и на разной глубине, учитывать влияние сезонного профиля температур в грунте, задавать в качестве граничных условий, как температуру, так и непрерывность тепловых потоков.
3. Разработан программный комплекс, позволяющий проводить тепловые расчеты для сложных подземных многониточных систем, учитывая различные факторы и используя различные граничные условия, может быть использован для расчета сетей нефтесбора с совместной прокладкой ППД.
4. Сравнение с численным решением задачи по определению ореола оттаивания вокруг системы заглубленных трубопроводов показало, что способ задания распределения температуры в грунте является корректным и удовлетворительным для расчетов.
5. Представленный в диссертационной работе подход для определения теплотерь по длине в системе заглубленных трубопроводов позволил решить задачу средствами линейной алгебры.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

- 1) Примаков С. С. Влияние сезонной динамики температур на тепловой расчет заглубленных трубопроводов большого диаметра. Сборник тезисов

Десятой Всероссийской научной конференции студентов – физиков и молодых ученых: Тезисы докладов: В 2 т. Т.2 – Екатеринбург - Красноярск: изд-во АСФ России, 2004. С 913 – 915.

2) Даниэлян Ю.С. Примаков С.С. К тепловому расчету заглубленных трубопроводов большого диаметра. Нефтяное хозяйство, 2004, №8, С 116-117.

3) Даниэлян Ю.С. Соколов С.М. Примаков С.С. Определение температурного поля в грунте вокруг многониточных трубопроводных систем. Нефтяное хозяйство, 2006, №8, С 126-127.

4) Примаков С. С. Тепловой расчет магистральных газопроводов и коридора коммуникаций. Сборник тезисов Одиннадцатой Всероссийской научной конференции студентов – физиков и молодых ученых: Тезисы докладов: В 1 т.Т.1 – Екатеринбург: изд-во АСФ России, 2005. С 442 – 443.

5) Примаков С. С. Учет сезонной динамики температур при тепловом расчете трубопроводов большого диаметра. Материалы международной конференции «Криосфера нефтегазоносных провинций» М.: Изд-во ТИССО 2004 г. С 64.

6) Даниэлян Ю. С., Примаков С. С. К тепловому расчету коридоров коммуникаций. Тезисы международной конференции «Приоритетные направления в изучении криосферы земли» 2005 г. Пущино С 84 – 85.

7) Даниэлян Ю. С., Примаков С. С. Определение температурного режима многониточных трубопроводных систем. Материалы международной конференции «Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменения». Т. 2.-Тюмень: ТюмГНГУ, 2006. С 222 – 224.

8) Даниэлян Ю. С., Примаков С. С. К расчету тепловых потерь от группы параллельных подземных трубопроводов. Материалы международной конференции «Город и геологические опасности». Т. 2.-Санкт-Петербург. 2006 г. С 29 – 33.