

На правах рукописи

Михайлов Павел Юрьевич

**ДИНАМИКА ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И
ТЕПЛОСИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОМЕРЗАЮЩИХ
ГРУНТОВ С ПОДЗЕМНЫМ ТРУБОПРОВОДОМ**

Специальность 01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Тюмень - 2012

Работа выполнена на кафедре механики многофазных систем Тюменского государственного университета.

Научный руководитель

Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор
Шабаров Александр Борисович

Научный консультант

доктор технических наук
Вакулин Александр Анатольевич

Официальные оппоненты

доктор физико-математических наук, профессор,
Аксенов Борис Гаврилович
(Тюменский государственный архитектурно-строительный университет, заведующий кафедрой математики)

доктор технических наук, профессор,
Филиппов Александр Иванович
(Стерлитамакская государственная педагогическая академия им. Зайнаб Бишевой, заведующий кафедрой теоретической физики)

Ведущая организация

ОАО «Институт «Нефтегазпроект»»

Защита состоится 24 мая 2012 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.274.10 при Тюменском государственном университете по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15А

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Семакова, 18.

Автореферат разослан 21 апреля 2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

доктор физ.-мат. наук



Удовиченко С.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Эксплуатация подземных трубопроводов при отрицательных температурах приводит к промораживанию грунта, формированию сил морозного пучения и дополнительных напряжений в стенках трубы. Величина морозного пучения изменяется по длине и по времени, что требует для описания теплофизических и прочностных параметров разработки физико-математической модели и метода расчета параметров тепломассопереноса в грунте и напряжений в стенке трубопровода. Нерешенной до настоящего времени проблемой является определение деформации трубопровода с учетом поля льдистости в морознопучинистых грунтах. Изучение закономерностей совместной деформации трубопровода и грунта, вызванной теплосиловым взаимодействием, является сложной комплексной физической проблемой, требующей сочетания расчетных и экспериментальных исследований. Эксплуатационная надежность линейной части трубопроводной системы и, следовательно, возможные неблагоприятные материальные и экологические последствия уменьшения этой надежности существенно зависят от адекватности моделирования тепломассопереноса и теплосилового взаимодействия трубопровода с грунтом. Необходимость решения отмеченных выше проблем определяет актуальность темы данной работы.

Цель и задачи работы

Целью работы является экспериментальное изучение и создание метода расчета нестационарного теплосилового взаимодействия подземного трубопровода с окружающими его морознопучинистыми грунтами.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Создать экспериментальный стенд и автоматизированную систему измерения параметров теплосилового взаимодействия, позволяющие проводить исследования параметров тепломассопереноса и деформаций при различных тепловых режимах работы модельного трубопровода, различной влажности грунта, различных температурах окружающей среды. Провести экспериментальное исследование теплосилового взаимодействия модельного трубопровода с глинистым грунтом; включая определение нестационарных температурных полей вблизи трубопровода, а также динамики изменения высотного положения трубопровода.

2. Разработать теплофизическую модель и численный метод расчета нестационарных тепломассобменных процессов в мерзлых и талых грунтах, которые позволяют описывать изменение во времени полей температуры, приведенных плотностей влаги и льда; определяющих изменение высотного положения и дополнительные напряжения в трубопроводе.

3. Обосновать адекватность разработанных модели и метода расчета на основе сопоставления результатов расчета параметров теплосилового взаимодействия с экспериментальными значениями определенными при испытаниях на стенде. Выполнить расчетно-параметрическое исследование параметров тепломассопереноса и теплосилового взаимодействия трубопровода с грунтом при различных определяющих факторах.

Научная новизна исследований состоит в следующем:

1. На созданном стенде проведено комплексное экспериментальное исследование параметров нестационарного тепломассопереноса с фазовыми переходами в мерзлом и талом грунте и высотного положения модельного трубопровода в условиях морозного пучения, получена новая экспериментальная информация.

2. Установлено, что существенным фактором влияющим, на напряжения в стенке трубы при морозном пучении является поле льдистости вблизи трубопровода. Предложена и обоснована расчетная зависимость средней величины морозного пучения грунта под трубопроводом от приведенных плотностей льда и воды, найденных расчетным или экспериментальным методом.

3. Разработаны и обоснованы физико-математическая модель и метод расчета тепломассопереноса и деформаций в морознопучинистых грунтах, позволяющие прогнозировать изменения напряженно-деформированного состояния в стенке трубы с учетом изменения температур трубопровода и окружающей среды, свойств грунта, интенсивности фазовых переходов и миграции влаги в грунте вблизи подземного трубопровода.

4. Показано, что существенное влияние на дополнительное продольное напряжение в стенке трубопровода при морозном пучении оказывает температура стенки трубопровода, параметры кривой незамерзшей воды, а также интенсивность миграции влаги с учетом полей влажности и льдистости.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментальных исследований параметров теплопереноса и теплосилового взаимодействия подземного модельного трубопровода с глинистым грунтом в условиях морозного пучения.

2. Физико-математическая модель и численный метод расчета процессов теплопереноса с фазовыми переходами в грунтах вблизи с подземным трубопроводом, позволяющие определять зависимость средней величины свободного морозного пучения грунта под трубопроводом от нестационарных полей влажности и льдистости, высотное положение и дополнительные продольные напряжения в стенках трубопровода.

3. Результаты расчетно-параметрического исследования параметров теплопереноса в грунтах и параметров теплосилового взаимодействия, включая влияние температуры трубопровода и окружающей среды, толщины снежного покрова а также миграции влаги на высотное положение и дополнительные продольные напряжения в трубопроводе.

Практическая значимость работы. Полученные экспериментальные данные о нестационарных температурных полях в глинистом грунте, о параметрах теплосилового взаимодействия модельного трубопровода с окружающим грунтом существенно дополняют имеющиеся опытные данные.

Разработанная теплофизическая модель расчета процессов нестационарного теплопереноса в мерзлых и талых грунтах вблизи заглубленного трубопровода, а также силового взаимодействия грунта с трубопроводом может быть использована при прогнозировании напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса трубопроводов в нефтегазовом и энергетическом комплексах.

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечена использованием в экспериментальных исследованиях современных методов измерений и компьютерной техники с соответствующей оценкой погрешности измерений; основана на использовании фундаментальных уравнений теплофизики; обусловлена корректной постановкой задач; подтверждается достаточной обоснованностью принятых допущений и обеспечена количественным совпадением полученных численных решений с известными аналитическими зависимостями и полученными экспериментальными данными.

Личный вклад автора состоит в участии в разработке экспериментальной установки, участии в проведении экспериментальных исследований, анализе и обобщении полученных экспериментальных данных, в разработке метода расчета, проведении и обобщении численных расчетов. В опубликованных совместно с соавторами научных статьях, вклад соавторов равноценен.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на российских и международных межотраслевых научных семинарах и конференциях: Международная научно-техническая конференция, посвященная 55-летию Тюменского государственного нефтегазового университета “Нефть и газ Западной Сибири”.– Тюмень, 2011; Международная научно-практическая конференция по инженерному мерзлотоведению, посвященная 20-летию ООО НПО “Фундаментстройаркос”- Тюмень, 2011; Школа – семинар “Теплофизика, гидродинамика, теплотехника” под руководством Заслуженного деятеля науки РФ, д.т.н, профессора А.Б. Шабарова (2009 г., 2010 г., 2011 г.); научный семинар кафедры механики многофазных систем ТюмГУ (2009 -2012 г.г.); научно-технический семинар ИМЕНИТ (2011 -2012 г.) ТюмГУ.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 9 работах, в том числе в 2 статьях, входящих в перечень ВАК. Их список приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы. Материал изложен на 175 страницах, включает 113 рисунков, 3 таблицы, Список цитируемой литературы составлен из 133 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, сформулирована цель и задачи диссертации.

Первая глава посвящена обзору существующих методов расчета температурных полей вблизи подземного трубопровода. Рассмотрены модели процессов теплопереноса в грунтах. Рассматриваются закономерности формирования сил морозного пучения. Большой вклад в изучение теплопереноса в грунтах, морозного пучения и воздействия грунта на трубопроводы внесли А.В. Лыков, Н.А. Цытович, М.И. Сумгин, Н.И. Быков, М.Н.

Гольдштейн, Н.В. Орнатский, Б.И. Далматов, О.И. Финк, В.О. Орлов, А.Б. Айнбиндер, И.П. Петров, А.И. Горковенко, Ю.С. Даниэлян. Выявлены основные механизмы миграции влаги в мерзлых и промерзающих грунтах. Выполнен обзор расчетных методов напряженно-деформационного состояния линейной части подземного трубопровода, вызванного морозным пучением.

Проведенный анализ существующих схем силового взаимодействия подземного трубопровода с морознопучинистыми грунтами показал, что существующие схемы расчета не достаточно полно учитывают тепломассообменные процессы в мерзлом грунте, поля льдистости и деформации в мерзлом грунте, вследствие чего не достаточно точно определяются высотное положение трубопровода и связанное с ним напряженно-деформированное состояние его стенок.

Во **второй главе** приводится описание конструкции а также измерительной и управляющей систем созданного автоматизированного стенда, позволяющего проводить экспериментальное исследование взаимосвязанных параметров теплосилового взаимодействия в лабораторных условиях. Принципиальная схема стенда представлена на рис. 1.

На стенде возможно в режиме реального времени проводить измерения следующих величин: температуры грунта в 60-ти произвольных точках в интервале температур от -18°C до $+25^{\circ}\text{C}$ с абсолютной погрешностью $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$; высотное положение трубопровода в 7-ми произвольных точках в интервале перемещений 0–10 мм с абсолютной погрешностью $\pm 0,01$ мм; величину возникающих в грунте избыточных давлений в 10-ти произвольных точках в интервале 0-500 кПа с относительной погрешностью 2%; возникающих в стенках трубопровода напряжений в пяти точках с относительной погрешностью 2%; относительную влажность талого грунта в интервале 0-40%.

Управляющая система стенда позволяет моделировать различные температурные режимы модельного трубопровода (от -18°C до $+20^{\circ}\text{C}$) а также задавать температурные условия окружающего воздуха (от -18°C до $+20^{\circ}\text{C}$). Разработана методика проведения экспериментального исследования параметров теплосилового взаимодействия модельного трубопровода с окружающим его грунтом.

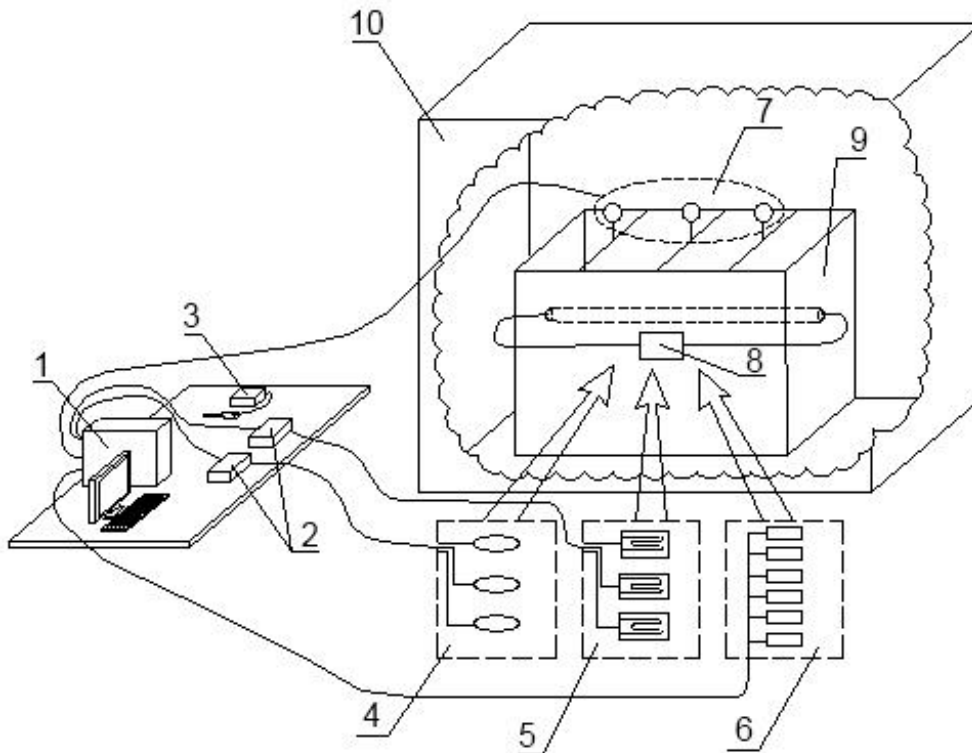


Рис. 1. Принципиальная схема стенда: 1- персональный компьютер; 2- устройства аналого-цифрового преобразования; 3- измеритель влажности грунта ВИМС-2; 4- преобразователи грунтового давления; 5- тензометрические преобразователи; 6- цифровые датчики температуры DS18B20; 7- преобразователи вертикального смещения трубопровода; 8- модельный трубопровод с системой терморегулирования; 9- лоток; 10- климатическая камера.

По результатам экспериментального исследования получены нестационарные температурные поля в глинистом грунте вблизи модельного трубопровода а также связанные с ними данные изменения высотного положения трубопровода, измеренные в трех различных сечениях исследуемой трубы.

В третьей главе описываются разработанные двумерная нестационарная теплофизическая модель тепломассопереноса в грунте а также численный метод расчета высотного положения подземного трубопровода и дополнительных продольных напряжений в его стенках, включающий расчет полей температуры, влажности и льдистости вблизи трубы.

Нестационарная двумерная модель тепломассопереноса учитывает особенности реальных процессов передачи тепла и миграции влаги (воды) как в талом, так и в мерзлом грунтах. Кристаллизация влаги, содержащейся в поровом пространстве

грунта рассматривается в спектре температур, границы которого определяются кривой незамерзшей воды для данного типа грунта.

Грунт рассматривается как трехфазная среда, состоящая из влаги, льда и сухого скелета грунта. Уравнение баланса массы фаз для промежутка времени ($t^{(n)}$, $t^{(n+1)}=t^{(n)}+\Delta t$) в каждом фиксированном ij -ом контрольном объеме (КО) V_{ij} записываются отдельно для каждой фазы:

- для жидкой влаги

$$\frac{\rho_{ijB}^{(n+1)} - \rho_{ijB}^{(n)}}{\Delta t} \cdot V_{ij} = - \sum_{k=1}^4 \rho_{ijkB} \cdot v_{ijkB}^n \cdot \Delta S_{ijk} + I_{ЛВ} \cdot V_{ij} \quad (1)$$

- для льда

$$\frac{\rho_{ijЛ}^{(n+1)} - \rho_{ijЛ}^{(n)}}{\Delta t} \cdot V_{ij} = I_{ВЛ} \cdot V_{ij} \quad (2)$$

где $\rho_{ijB} = \frac{m_B}{V_{ij}}$ – приведенная плотность влаги; $\rho_{ijЛ} = \frac{m_{Л}}{V_{ij}}$ – приведенная плотность льда; v_{ijk}^n – скорость потока влаги через k -ю грань ΔS_{ijk} ij -КО; $I_{ЛВ}$ – интенсивность плавления льда, $I_{ВЛ}$ – интенсивность кристаллизации влаги.

Уравнение баланса внутренней энергии в приближении однотемпературной среды и пренебрежения мощностью внутренних сил для промежутка времени ($t^{(n)}$, $t^{(n+1)}=t^{(n)}+\Delta t$) в каждом фиксированном ij -ом КО имеет вид:

$$\frac{(\rho_{ijc} \cdot U_{ijc} + \rho_{ijЛ} \cdot U_{ijЛ} + \rho_{ijB} \cdot U_{ijB})^{(n+1)} - (\rho_{ijc} \cdot U_{ijc} + \rho_{ijЛ} \cdot U_{ijЛ} + \rho_{ijB} \cdot U_{ijB})^{(n)}}{\Delta t} \cdot V_{ij} = - \sum_{k=1}^4 \rho_{ijkB} \cdot v_{ijkB}^n \cdot U_{ijkB} \cdot \Delta S_{ijk} - \sum_{k=1}^4 q_{ijk}^n \cdot \Delta S_{ijk}, \quad (3)$$

где $\rho_{ijc} = \frac{m_c}{V_{ij}}$ – приведенная плотность сухого скелета грунта; U_{ijc} , $U_{ijЛ}$, U_{ijB} – удельные внутренние энергии сухого скелета грунта, льда, влаги; q_{ijk}^n – удельный тепловой поток через k -ю грань ΔS_{ijk} ij -го КО.

В уравнениях (1)-(3) верхние индексы (n) и $(n+1)$ соответствуют моментам времени $t^{(n)}$ и $t^{(n+1)}=t^{(n)}+\Delta t$, индекс $k=1,2,3,4$ соответствует W -западной, E -восточной, S -южной, N -северной граням ij -го КО.

Удельные внутренние энергии в ij -ом КО рассчитываются как:

$$U_{ijc} = C_{ijc} \cdot T_{ij}; \quad U_{ijl} = C_L \cdot T_{ij}; \quad U_{ijB} = C_B \cdot (T_{ij} - T_o) + U_{\epsilon o},$$

где T_{ij} - температура центра ij -го КО; C_{ijc} , C_L , C_B - удельные массовые теплоемкости сухого скелета грунта (ij -КО), льда; воды; $U_{\epsilon o}$ - существенная константа, определяется из условия нормировки констант внутренней энергии воды: $U_{\epsilon o} = l_{\text{лв}} + C_L T_0 + P_0 / \rho_L^{(0)} - P_0 / \rho_B^{(0)}$, где $l_{\text{лв}}$ - удельная теплота плавления льда; T_0, P_0 - температура и давление фазового перехода; $\rho_L^{(0)}, \rho_B^{(0)}$ - истинные плотности льда, воды. Скорость переноса влаги в грунте описывается законом изотермической влагопроводности:

$$\vec{v} = -D(\theta, \theta_l) \cdot \nabla \theta, \quad (4)$$

где $D(\theta, \theta_l) = D_T(\theta) / (1 + n \cdot \theta_l)$ - коэффициент диффузии влаги в грунте, зависящий от объемного содержания влаги $\theta = \rho_B / \rho_B^{(0)}$ и объемного содержания льда $\theta_l = \rho_L / \rho_L^{(0)}$; $D_T(\theta)$ - коэффициент диффузии талого грунта; n - опытная константа зависящая от типа грунта.

Удельные плотности тепловых потоков q_{ijk}^n вычисляются по закону Фурье. Коэффициент теплопроводности грунта определяются с учетом фазового состава для каждого контрольного объема на каждом временном шаге. Теплофизическая модель тепломассопереноса (1)-(3) замыкается заданием уравнений переноса жидкой влаги (4) и фазовых переходов, теплофизическими и гидродинамическими характеристиками грунтов а также граничными условиями тепломассообмена. На рис. 2 представлена расчетная область задачи тепломассообмена. На границах EF, AB, CD задаются нулевые значения плотности теплового потока и скорости переноса влаги. На нижней границе DE задаются температура грунта и значение объемного влагосодержания. На границе «труба-грунт» задается температура. Интенсивность

влагообмена на верхней границе (BC) полагается известной. Теплообмен грунта с окружающим воздухом на границе BC задается условием: $-\lambda_{ep} \cdot \frac{dT}{dy} = k \cdot (T_B - T)$,

где $k = 1/(1/\alpha_B + L_{CH}/\lambda_{CH})$ – коэффициент теплопередачи учитывающий толщину снежного покрова, α_B – коэффициент теплоотдачи от снега в окружающую среду, L_{CH}, λ_{CH} – толщина и коэффициент теплопроводности снежного покрова.

Высотное положение трубопровода на n -ом временном шаге определяется решением уравнения продольно-поперечного изгиба, записанного с граничными условиями соответствующими жесткому заземлению его концов на рассматриваемом участке $[0;L]$:

$$\begin{cases} E \cdot J \cdot \frac{d^4 W}{dz^4} + N \cdot \frac{d^2 W}{dz^2} - q_n(z) = 0 \\ W(0) = W(L) = 0 \\ \frac{dW(0)}{dz} = \frac{dW(L)}{dz} = 0 \\ z \in [0; L] \end{cases} \quad (5)$$

где $q_n(z)$ – удельная сила морозного пучения грунта действующая на единицу длины трубопровода; $W(z)$ – поперечное перемещение сечения трубопровода с координатой z , функция $W(z)$ определяет высотное положение участка трубопровода; L – длина участка трубопровода подверженного действию сил морозного пучения; $E \cdot J$ – изгибная жесткость рассматриваемого участка трубопровода; E – модуль Юнга материала стенки трубопровода; N – продольная сила на концах рассматриваемого участка трубопровода.

Дополнительные продольные напряжения, возникающие в верхней и нижней образующих трубопровода, определяются с учетом найденных из решения уравнения (5) производных второго порядка:

$$\sigma(z) = \pm E \cdot D_H \cdot \frac{d^2 W}{dz^2}, \quad (6)$$

где D_H – внешний диаметр трубопровода; знак "-" соответствует нижней образующей трубы, а знак "+" верхней.

Удельная сила $q_n(z)$ определяется по квадратичному закону стесненного пучения:

$$q_n(z) = D_H \cdot R \cdot \left(1 - \frac{W(z)}{\Delta H^{(n)}}\right)^2, \quad (7)$$

где $\Delta H^{(n)}$ – средняя величина свободного пучения грунта под нижним полупериметром трубопровода; D_H – внешний диаметр трубопровода; R – сопротивление грунта (зависит от типа грунта).

В отличие от известных подходов, на n -ом временном шаге $\Delta H^{(n)}$ рассчитывается по величине прироста высоты $\Delta h_{ij}^{(n)}$ контрольных объемов, расположенных под нижним полупериметром трубопровода (рис. 3), с учетом допущения согласно которому увеличение объема грунта вызванное морозным пучением происходит в вертикальном направлении:

$$\Delta H^{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M(i)} \Delta h_{ij}^{(n)}}{N}, \quad (8)$$

Величина свободного пучения грунта $\Delta h_{ij}^{(n)}$ в ij -ом КО, на n -ом временном шаге определяется с учетом рассчитанных по модели тепломассопереноса полей льдистости и влажности:

$$\Delta h_{ij}^{(n)} = \begin{cases} 0, & m_{ij} \geq \frac{\rho_{ijB}^{(n)}}{\rho_B^0} + \frac{\rho_{ijL}^{(n)}}{\rho_L^0} \\ \Delta y_{ij} \cdot \left(\frac{\rho_{ijB}^{(n)}}{\rho_B^0} + \frac{\rho_{ijL}^{(n)}}{\rho_L^0} - m_{ij} \right), & m_{ij} < \frac{\rho_{ijB}^{(n)}}{\rho_B^0} + \frac{\rho_{ijL}^{(n)}}{\rho_L^0}, \end{cases} \quad (9)$$

где Δy_{ij} - вертикальный размер ij -КО; m_{ij} - пористость талого грунта в ij -ом КО.

В **четвертой главе** разработан численный алгоритм, реализующий предложенную теплофизическую модель тепломассопереноса в грунте и метод расчета высотного положения трубопровода. Алгоритм реализован в среде Maple. Для решения сформулированной выше задачи тепломассопереноса (глава 3) использован метод контрольного объема. Система нелинейных уравнений, решается неявным

методом Ньютона. В расчетном блоке используется предложенное соотношение (5), определяющие высотное положение трубопровода а также соотношение для дополнительных продольных напряжений в стенке трубы.

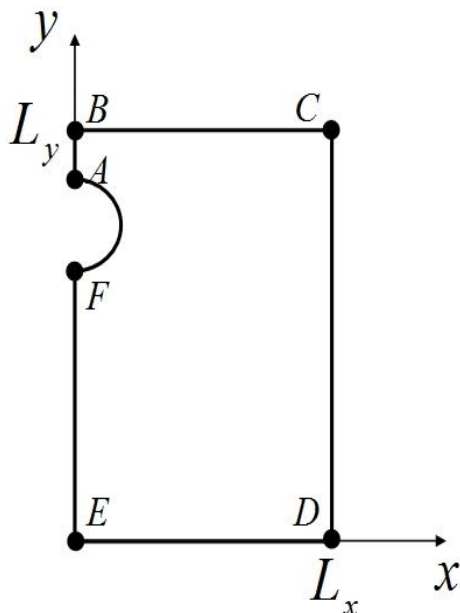


Рис. 2. Расчетная область задачи тепломассопереноса.

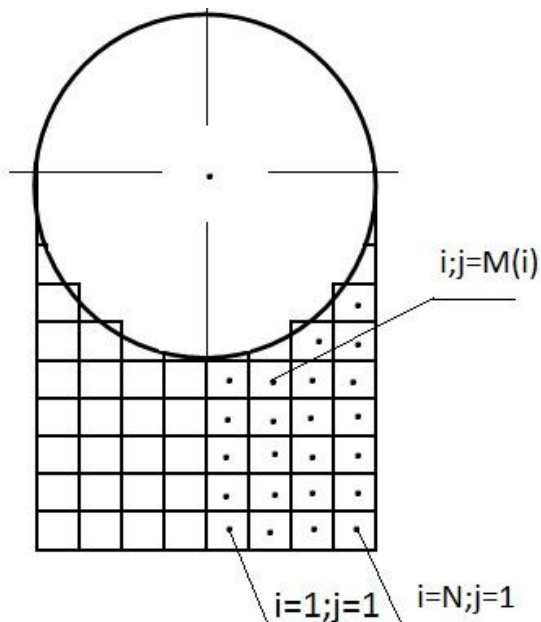


Рис. 3. К определению величины свободного пучения грунта под трубопроводом.

Проведенное экспериментальное обоснование теплофизической модели тепломассопереноса в грунте и численного метода расчета высотного положения трубопровода, выполненное путем сопоставления рассчитанных результатов с опытными данными показало, что отклонения температур не превышает $\pm 1^\circ\text{C}$, в диапазоне от -10°C до $+8^\circ\text{C}$, а максимальная разница в определении прогиба модельного трубопровода – 0,3мм, при максимальном прогибе 3мм.

В работе проведено исследование, влияния температур трубы и наружного воздуха, интенсивности миграции, толщины снежного покрова на высотное положение трубопровода и величину дополнительных продольных напряжений. В качестве примера приведены результаты расчетно-параметрического исследования теплосилового взаимодействия подземного трубопровода внешним диаметром 820-1020мм, заложенного в глинистом грунте на глубине 600-1500 мм (расстояние от дневной поверхности до верхней образующей трубопровода).

Сезонное изменение температуры окружающего воздуха моделировалась гармонической функцией:

$$T_B = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \tau / 365) \quad (10)$$

где A – амплитудное значение температуры, в $^{\circ}\text{C}$; τ – время в сутках ($\tau \in [0;180]$). Некоторые результаты расчета параметров теплосилового взаимодействия приводятся на рис. (4–8). На Рис. 4 представлено распределение температуры по глубине, под нижней образующей трубопровода, в различные моменты времени. Поля приведенной плотности льда по глубине, под нижней образующей трубопровода, в различные моменты времени показаны на рис.5.

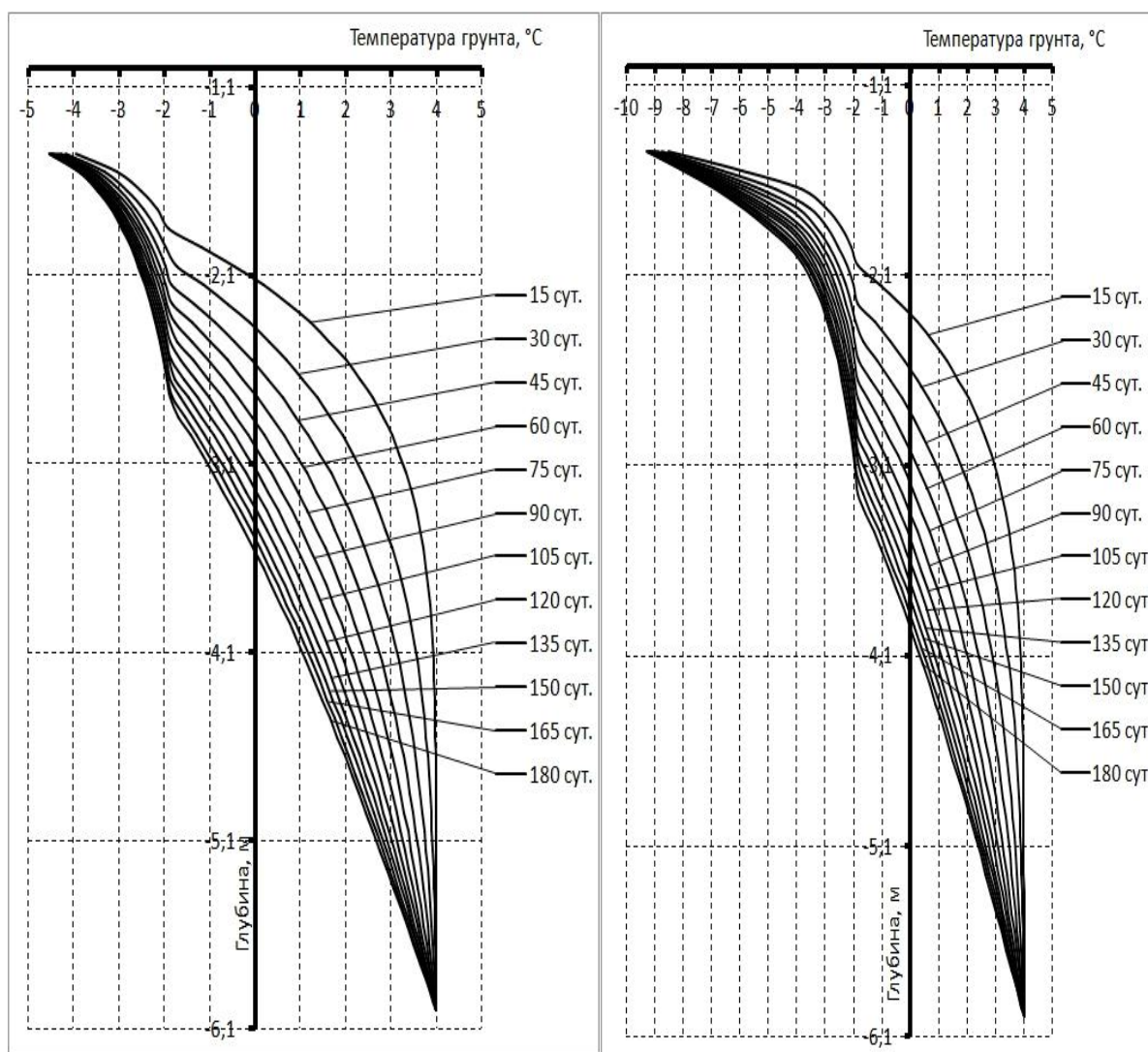


Рис. 4. Распределение температуры по глубине, под нижней образующей трубопровода, в различные моменты времени: слева – температура трубы -5°C , амплитудное значение температуры воздуха -10°C ; справа – температура трубы -10°C , амплитудное значение температуры воздуха -20°C .

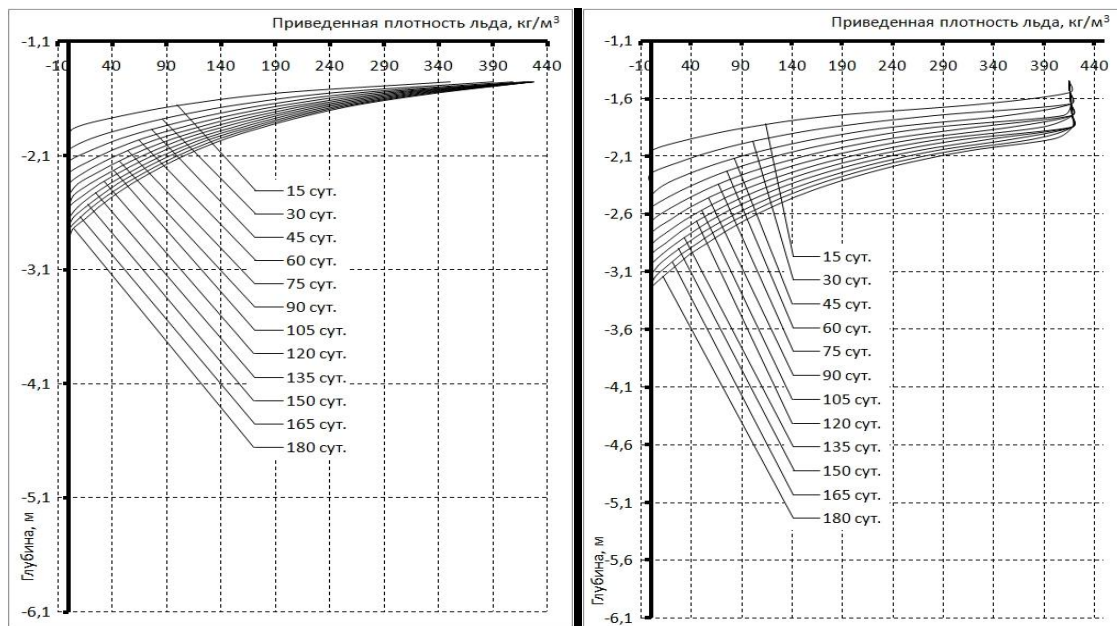


Рис. 5. Распределение льда по глубине, под нижней образующей трубопровода, в различные моменты времени: слева – температура трубы -5°C , амплитудное значение температуры воздуха -10°C ; справа – температура трубы -10°C , амплитудное значение температуры воздуха -20°C .

Поля приведенной плотности суммарной влаги под нижней образующей трубопровода приводится на рис.6.

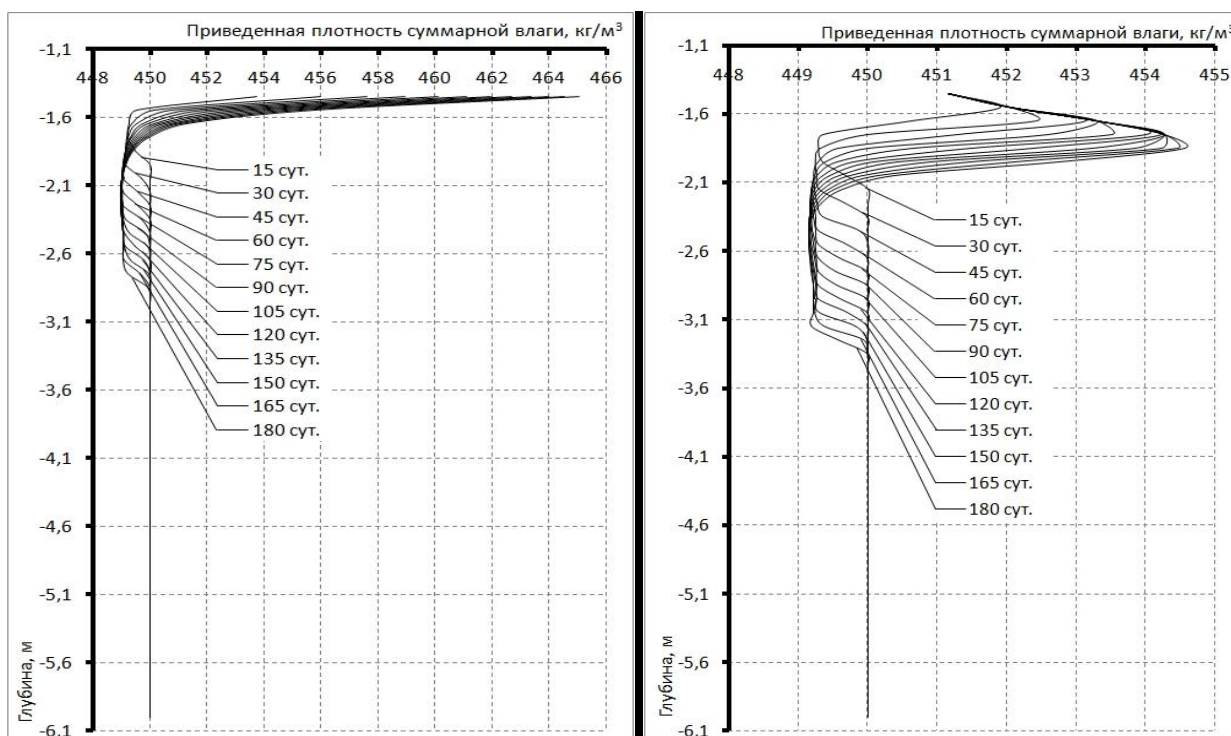


Рис. 6. Распределение приведенной плотности суммарной влаги под нижней образующей трубопровода: слева – температура трубы -5°C , амплитудное значение температуры воздуха -10°C ; справа – температура трубы -10°C , амплитудное значение температуры воздуха -20°C .

Изменение вертикальных прогибов трубопровода с течением времени показано на рис. 7.

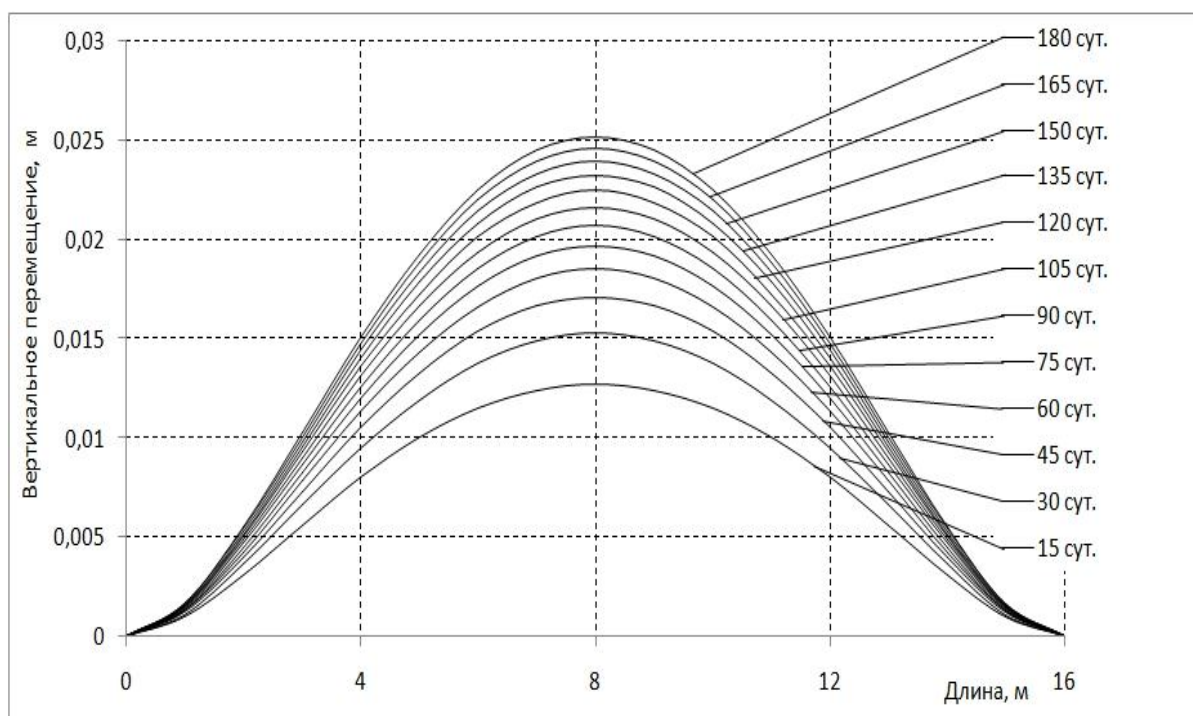


Рисунок 7 - Высотное положение трубопровода, в различные моменты времени. Температура трубы -10°C , амплитудное значение температуры воздуха -20°C .

По результатам проведенного исследования влияния температур трубы и наружного воздуха было установлено существенное влияние температуры трубопровода на его высотное положение и величину дополнительных напряжений возникающих в стенках трубы. Распределение приведенной плотности влаги по глубине задавалось постоянным значением 450кг/м^3 , что соответствовало полному влагонасыщению грунта. Наибольшее значение дополнительного напряжения наблюдается на концах рассматриваемого участка трубопровода (рис. 8). Отмечено, что понижение минимальной температуры воздуха от -10°C до -20°C , при заданной постоянной температуре трубы в диапазоне -5°C до -15°C приводит к увеличению высотного положения всего в 1,01-1,03 раза. Таким образом, в рассмотренных условиях наблюдается более заметное влияние температуры трубы на напряжения чем температуры окружающей среды.

Проведенное исследование влияния интенсивности миграции влаги (рис.9) позволило установить существенную роль миграции на деформацию трубопровода при изменении температуры трубы от -2°C до -5°C . В начальный момент

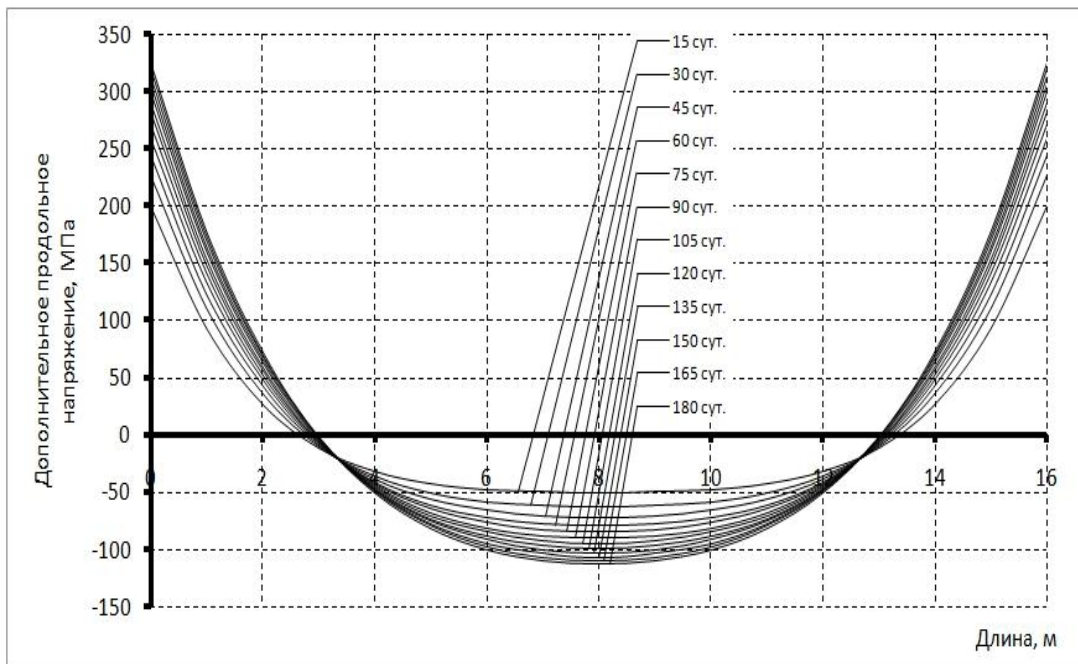


Рис. 8. Распределения дополнительных продольных на нижней образующей трубопровода в различные моменты времени. Температура трубы -10°C , амплитудное значение температуры воздуха -20°C .

принималось линейное увеличение приведенной плотности влаги от $437\text{кг}/\text{м}^3$ на поверхности, до $450\text{кг}/\text{м}^3$ (полное влагонасыщение) – на глубине 3м и более.

Как показывают результаты расчетного исследования существенное влияние на деформацию трубопровода оказывает температура его стенки (рис. 10).

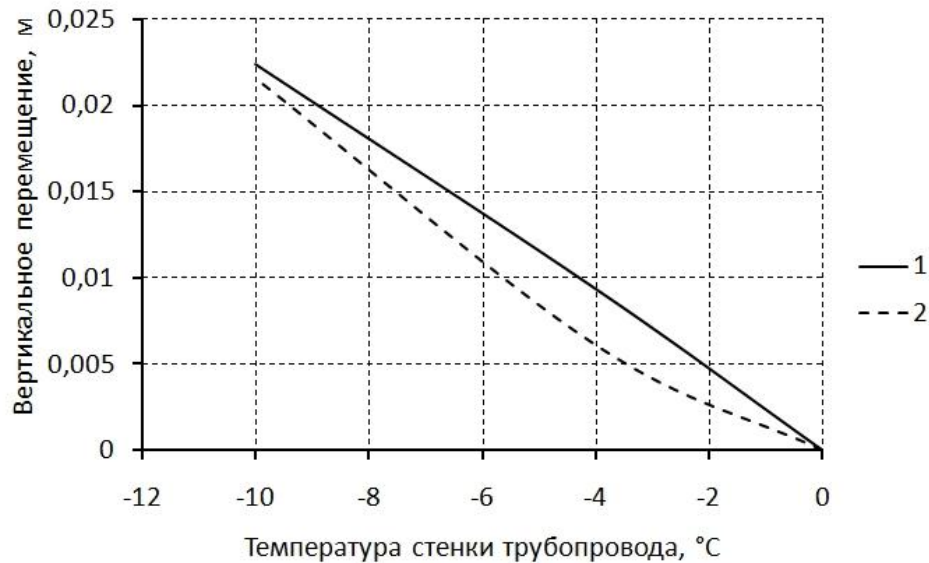


Рис. 9. Зависимость вертикального перемещения центрального сечения трубопровода от его температуры: 1–с учетом миграции влаги; 2–без учета миграции влаги.

С понижением температуры трубы роль миграции заметно снижается, так при постоянной температуре трубы -10°C отношение вертикальных перемещений рассчитанных с учетом и без миграции составляет всего 1,04 а при температуре -4°C это же отношение составляет 1,54.

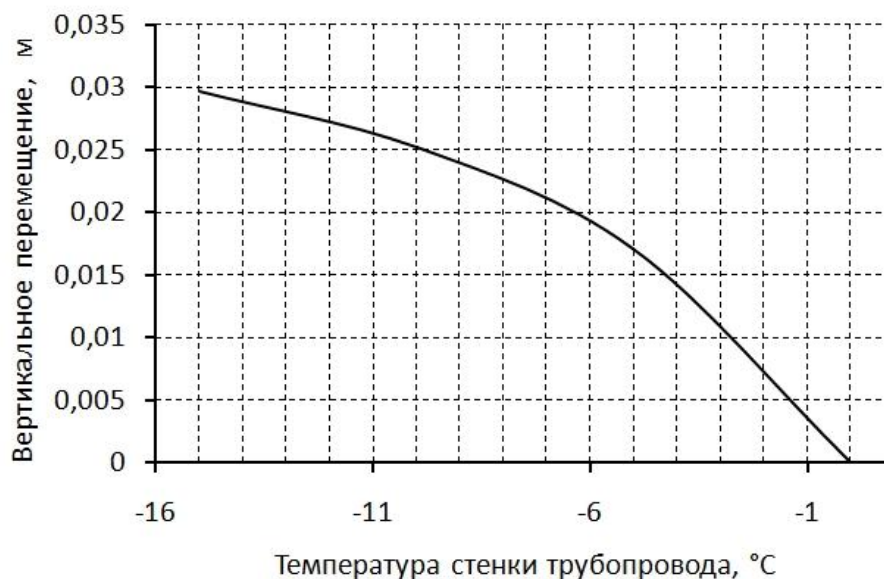


Рис. 10. Зависимость вертикального перемещения центрального сечения трубопровода от его температуры.

Исследования влияния толщины снежного покрова проведенные для трубопровода имеющего температуру равную местной температуре грунта показали, что в рассмотренных условиях заметное увеличение вертикального перемещения трубопровода до 0,012м происходит при уменьшении толщины снежного покрова от 0,2м до нуля. При толщине снежного покрова более 0,2м деформации трубопровода незначительны.

Таким образом рассмотренные результаты расчетов показывают, что разработанная модель и метод расчета являются удобным инструментом, позволяющим определять динамику изменения дополнительных напряжений в стенке трубы в реальных условиях изменения параметров теплопереноса в мерзлых грунтах.

Основные результаты и выводы

1. Создан новый универсальный стенд, позволяющий экспериментально изучать взаимосвязанные процессы тепломассопереноса в грунте вблизи модельного трубопровода, параметры морозного пучения и деформации трубопровода; Получена новая экспериментальная информация о влиянии температурных полей в талом и мерзлом грунте на величину вертикального перемещения трубопровода при изменении его температуры от 0 до -9°C и воздуха в климатической камере в диапазоне от 0 до -15°C .

2. Разработаны физико-математическая модель и численный метод расчета параметров теплосилового взаимодействия подземного трубопровода с окружающим его морознопучинистым грунтом, учитывающие температуру трубы, тепловые потоки, миграцию влаги, фазовые переходы, теплофизические свойства грунтов позволяющие определять поля температуры, влажности и льдистости вблизи трубопровода, силы морозного пучения, деформации и дополнительные напряжения в трубе.

3. Предложена и обоснована, путем сопоставления с экспериментальными данными, зависимость средней величины морозного пучения грунта под трубопроводом на произвольном временном шаге от полей приведенных плотностей льда и влаги, найденных из решения системы уравнений нестационарного тепломассопереноса в грунте.

4. Установлено существенное влияние миграции влаги на изменение высотного положения трубопровода. Так для подземного газопровода с температурой стенки -4°C , расположенного в глинистом грунте при температуре окружающей среды, меняющейся по закону $T_B = -20 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \tau / 365)^{\circ}\text{C}$, $\tau \in [0; 180 \text{ сут.}]$, за счет миграции влаги вертикальная деформация трубопровода увеличивается в 1,4–1,5 раза по сравнению с аналогичными условиями при отсутствии миграции.

5. Выявлено, что уменьшение толщины снежного покрова от 1 до 0 м, при характерных северных температурных условиях наружного воздуха, приводит к увеличению дополнительных продольных напряжений в стенке трубопровода, температура которого близка к местной температуре грунта до 100–150 МПа.

6. Установлено, что при понижении температуры трубопровода от -1 до -4°C , при характерных параметрах магистрального газопровода, проложенного в глинистом

грокте величина вертикального смещения, вычисленная по центральному сечению трубы, увеличивается в 4–5 раз, что необходимо учитывать при определении напряжений и остаточного ресурса трубопровода.

Список работ по теме диссертации, входящих в перечень ВАК

1. Шабаров А.Б., Михайлов П.Ю., Пульдас Л.А., Вакулин А.А. Физико-математическое моделирование полей температуры и льдистости в мерзлых грунтах вокруг заглубленного трубопровода // Вестник ТюмГУ. 2010. №6. С. 14-19.

2. Кутрунов В.Н., Михайлов П.Ю., Пульдас Л.А., Вакулин А.А., Вилков М.Н. Экспериментальное исследование и физико-математическое моделирование процесса остывания нефти в подземном трубопроводе // Вестник ТюмГУ. 2012. №4. С. 67-73.

Список прочих основных опубликованных работ по теме диссертации

1. Григорьев Б.В., Михайлов П.Ю., Шабаров А.Б. Экспериментальное определение теплопроводности строительных материалов, горных пород и грунтов // Материалы Международной научно-практической конференции “Разработка и внедрение ресурсо- и энергосберегающих технологий и устройств”. Пенза. 2010. 15-16 апреля. С. 117-121.

2. Михайлов П.Ю. Автоматизированный стенд для исследования теплосилового взаимодействия заглубленного трубопровода с мерзлым грунтом // Ежеквартальный научно-технический журнал “Строительный вестник”. Тюмень. Изд-во ТюмГАСУ. 2011. № 1. С. 100-101.

3. Шабаров А.Б., Михайлов П.Ю., Вилков М.Н., Вакулин А.А., Пульдас Л.А. Теплосиловое взаимодействие влажных грунтов с трубопроводом // Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 55-летию Тюменского государственного нефтегазового университета “Нефть и газ Западной Сибири”. Тюмень. Изд-во ТюмГНГУ. 2011. Том II. С. 103-108.

4. Шабаров А.Б., Михайлов П.Ю., Вилков М.Н., Вакулин А.А., Суровцев И.А. Экспериментальное исследование полей температуры вблизи заглубленных трубопроводов // Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 55-летию Тюменского государственного нефтегазового университета “Нефть и газ Западной Сибири”. Тюмень. Изд-во ТюмГНГУ. 2011. Том II. С. 108-111.

5. Шабаров А.Б., Бахмат Г.В., Михайлов П.Ю., Вакулин А.А., Суровцев И.А. Экспериментальное исследование теплосилового взаимодействия заглубленного

трубопровода с мерзлым грунтом // Материалы международной научно-практической конференции по инженерному мерзлотоведению, посвященной 20-летию ООО НПО "Фундаментстройаркос". Тюмень. Изд-во "Сити-Пресс". 2011. С. 191-196.

6. Шабаров А.Б., Михайлов П.Ю., Шастунова У.Ю., Вакулин А.А., Суровцев И.А. Физико-математическое моделирование полей температуры и льдистости в мерзлых грунтах вокруг заглубленного трубопровода // Материалы международной научно-практической конференции по инженерному мерзлотоведению, посвященной 20-летию ООО НПО "Фундаментстройаркос". Тюмень. Изд-во "Сити-Пресс". 2011. С. 225-229.

7. Шабаров А.Б., Михайлов П.Ю., Вакулин А.А., М.Н. Вилков, Суровцев И.А. Физико-математическое моделирование теплосилового взаимодействия заглубленного трубопровода с мерзлым грунтом // Материалы международной научно-практической конференции по инженерному мерзлотоведению, посвященной 20-летию ООО НПО "Фундаментстройаркос". Тюмень. Изд-во "Сити-Пресс". 2011. С. 280-281.