

На правах рукописи

ГОРЕЛОВ АНАТОЛИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ШЛЕЙФОВЫХ ГАЗОПРОВОДОВ С
ВЕЧНОМЕРЗЛЫМИ ГРУНТАМИ В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД ГОДА**

Специальность 25.00.19 - Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень 2004

Работа выполнена в Тюменском государственном нефтегазовом университете

Научный руководитель доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки и техники РФ
Кушнир Семен Яковлевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Земенков Юрий Дмитриевич

кандидат технических наук
Жевагин Алексей Иванович

Ведущая организация: ООО «Сургутгазпром», г.Сургут

Защита диссертации состоится 11 июня 2004 г. в 15⁰⁰ час.
на заседании диссертационного совета Д 212.273.02 при
Тюменском государственном нефтегазовом университете
по адресу: 625000, г.Тюмень, ул.Володарского, 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТюмГНГУ
по адресу 625039, г.Тюмень, ул.Мельникайте, 72.

Автореферат разослан « 06 » мая 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

Челомбитко С.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Обеспечение эксплуатационной надежности газопроводов при освоении газовых месторождений северных регионов страны существенно усложняется. Одной из причин, вызывающей такое усложнение, является недостаточная изученность теплового и силового взаимодействия газопроводов и грунтов с учетом большого многообразия последних. Возможные пучения грунтов в холодный период и их оттаивания в теплый период приводят к изменению высотно-планового положения газопроводов и соответствующему изменению их напряженно-деформированного состояния. Оттаивание грунтов под газопроводами особенно существенно для многолетне- и вечномёрзлых грунтов, поскольку может привести к нарушению первого принципа эксплуатации мерзлых грунтов как оснований.

Решение проблемы особенно актуально для Тюменского нефтегазового региона, где вечномёрзлые грунты занимают площадь около 1млн.км², а грунты с глубоким сезонным промерзанием составляют более 70% талых.

Значительный объем добычи газа и газоконденсата в условиях Севера требует применения антигидратных ингибиторов, в качестве которого в условиях Заполярного газоконденсатного месторождения является метанол. Подача метанола на кусты скважин осуществляется централизованно по метанолопроводам, проложенным параллельно на небольшом расстоянии от шлейфовых газопроводов. Высокая температура метанола в теплый период времени приводит к растеплению многолетнемерзлых грунтов под шлейфами, их осадке и к возникновению значительных дополнительных продольных напряжений в стенках газопроводов.

Поскольку уровень эквивалентных напряжений является одним из критериев безопасной эксплуатации газопроводов, то нахождение их в указанных условиях является актуальной научной проблемой.

В связи с этим целью настоящей работы является: исследовать влияние растепляющего действия метанолопровода в теплый период времени года на осадку шлейфового газопровода и возникающие вследствие этого изменения напряженно-деформированного состояния в его стенке.

Основные задачи исследования:

- Рассчитать температурное поле грунта системы «метанолопровод-шлейфовый газопровод» в теплый период времени года.
- Определить толщину и осадку оттаявшего мерзлого грунта под шлейфовым газопроводом.
- Разработать модель силового взаимодействия шлейфового газопровода с оттаявшим грунтом.
- Рассчитать дополнительные продольные напряжения в стенке шлейфового газопровода при его осадке и определить эквивалентные напряжения.

Научная новизна выполненных исследований:

- Решена задача растепления мерзлого грунта под шлейфовым газопроводом с учетом теплового влияния метанолопровода.
- Определена толщина оттаивающего грунта и его осадка под шлейфовым газопроводом в условиях мерзлых грунтов.
- Найдено эквивалентное напряжение в стенке шлейфового газопровода при его осадке в оттаявшем мерзлом грунте.

Практическая ценность работы заключается в том, что автором на основе исследования теплового и силового взаимодействия шлейфового газопровода с мерзлыми грунтами в реальных условиях ЗГКМ выявлено

существенное влияние осадки шлейфовых газопроводов на уровень напряжений в их стенке. Это позволяет выявить опасные (по максимальным значениям эквивалентные напряжения) участки трубопроводов и организовать на них дополнительные наблюдения (мониторинг) в теплый период времени, что значительно повысит эксплуатационную надежность шлейфовых газопроводов в условиях вечномерзлых грунтов.

На защиту выносятся.

Результаты исследования теплового и силового взаимодействия шлейфовых газопроводов с многолетнемерзлыми грунтами в теплый период года.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены на: научно-практической конференции по проблемам транспорта в Западно-Сибирском регионе, г.Тюмень, ТГНГУ, 2001г.; на научно-практической конференции по перспективам развития нефтегазовых объектов Западной Сибири, г.Тюмень, ТГНГУ, 2002г.; на международном научно-практическом семинаре «Геотехнические и эксплуатационные проблемы в нефтегазодобывающей отрасли» (г.Тюмень, 2002г.); на юбилейной научно-практической конференции по перспективам развития нефтегазовых объектов Западной Сибири, г.Тюмень, ТГНГУ, 2003г.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 6 статей.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, общих выводов и списка литературы. Диссертация изложена на 114 страницах, содержит 29 рисунков и 12 таблиц. Список литературы включает 107 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая ценность результатов исследований.

В первой главе на основе анализа обозначенных энергетической стратегией России на период до 2020 года уровней добычи нефти и газа и их распределения по регионам страны показано, что в ближайшей перспективе (50-70 лет) Западная и Восточная Сибирь будут оставаться основными нефтегазодобывающими регионами. При этом оценена роль Тюменского нефтегазового комплекса в структуре ТЭК России и обоснован выбор объекта исследования - Заполярное газоконденсатное месторождение.

В главе показано, что до настоящего времени тепловое и силовое взаимодействие шлейфовых газопроводов в условиях многолетнемерзлых грунтов практически не изучалось. На основании этого определены основные направления настоящего исследования.

Во второй главе отмечается, что газовые шлейфы ЗГНКМ проходят через участки вечномёрзлых грунтов и с целью недопущения оттаивания грунта под шлейфами применяется их высококачественная теплоизоляция ($\lambda_{\text{из}} = 0,033 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, $\delta_{\text{из}} = 60 \text{ мм}$) с дополнительным обустройством песчаной подушки толщиной 20 см по дну траншеи.

Однако значительное растепление грунта может быть вызвано расположенным параллельно шлейфу метаноопроводом, поскольку подаваемый метанол имеет температуру наружного воздуха, существенно положительную в тёплый период времени года.

На рис.1 приведена расчетная схема для определения температурного поля $t(x;y;z;\tau)_{z=\text{const}}$ оттаивающего грунта в некотором поперечном сечении с координатой z .

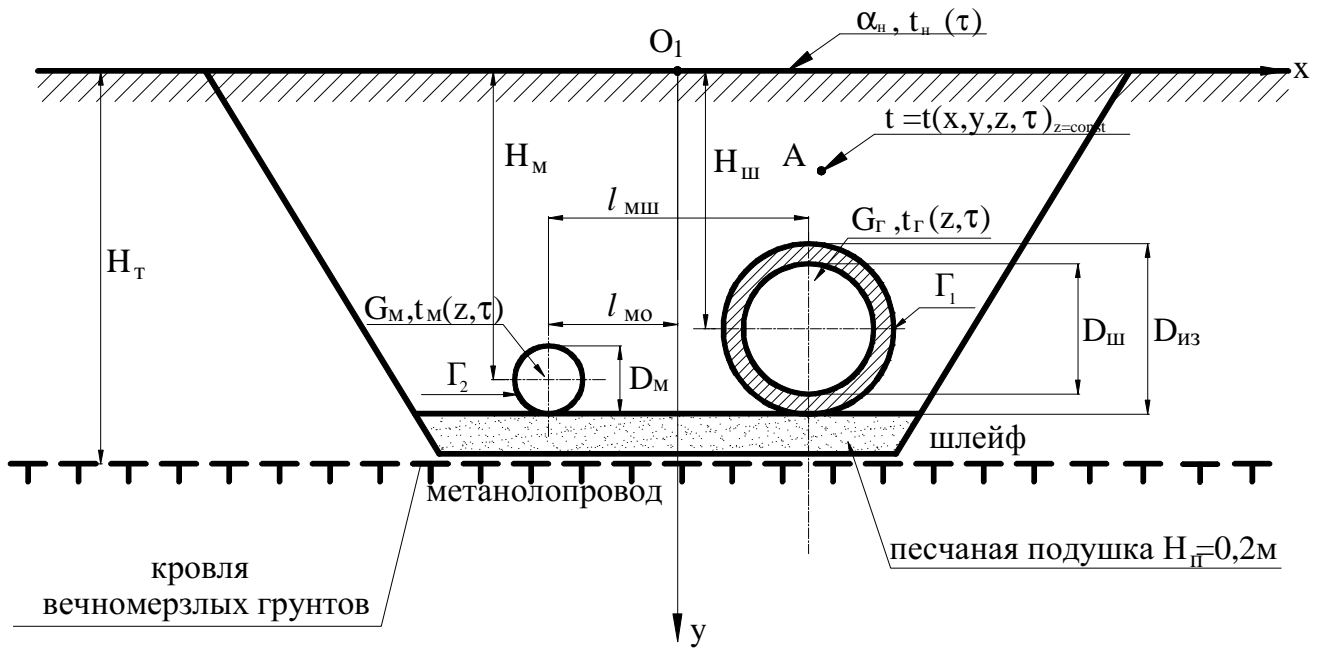


Рис.1. Поперечное сечение трубопроводов

Для решения задачи выбран энтальпийный подход к описанию процесса оттаивания мерзлого грунта, следствием чего является следующее уравнение температурного поля:

$$\left[C(t) + L_{\phi} \cdot \delta(t - t_{\phi}) \right] \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial y} \right], \quad (1)$$

где $\delta(t - t_{\phi})$ - дельта-функция от аргумента $(t - t_{\phi})$, а объемная теплоемкость грунта $C(t)$ и его теплопроводность $\lambda(t)$ определяются следующими выражениями:

$$C(t) = \begin{cases} C_{\tau}, t \geq t_{\phi} \text{ (талый грунт)} \\ C_{\text{м}}, t < t_{\phi} \text{ (мерзлый грунт)} \end{cases} \quad \lambda(t) = \begin{cases} \lambda_{\tau}, t \geq t_{\phi} \\ \lambda_{\text{м}}, t < t_{\phi} \end{cases} \quad (2)$$

(t_{ϕ} и L_{ϕ} - температура начала таяния и теплота таяния грунта).

Числовые значения t_{ϕ} , C_{τ} , $C_{\text{м}}$, λ_{τ} , $\lambda_{\text{м}}$ и λ_{ϕ} определяются по СНиП 2.02.04-88 на основании известной величины суммарной влажности w_{tot} мерзлого грунта.

Граничные условия задачи (1) для сечения $z=\text{const}$ имеют следующий вид:

$$-\lambda_{\tau} \cdot \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha_{\text{н}} \cdot [t_{\text{н}}(\tau) - t] \quad \text{при } y = 0, \quad (3)$$

$$\frac{2\lambda_{\text{из}} [t_{\Gamma}(z; \tau) - t]}{D_{\text{из}} \cdot \ln\left(\frac{D_{\text{ш}} + 2\delta_{\text{из}}}{D_{\text{ш}}}\right)} = -\lambda_{\tau} \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \quad \text{при } (x; y) \in \Gamma_1;$$

$$t = t_{\text{м}}(z; \tau) \quad \text{при } (x; y) \in \Gamma_2. \quad (4)$$

Поскольку коэффициент конвективного теплообмена $\alpha_{\text{н}}$ на открытой поверхности имеет значение $\alpha_{\text{н}} \approx 25 \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$, то граничное условие третьего рода (3) может быть заменено на граничное условие первого рода:

$$t = t_{\text{н}}(\tau) \quad \text{при } y = 0. \quad (5)$$

При определении начального условия уравнения (1) предполагается, что температура t мерзлого грунта на большом удалении от трубопроводов, а также при $y = 0$ равняется $t_{\text{ф}}$, что позволяет использовать известное решение Форхгеймера для одиночного трубопровода:

$$t(x; y; z; 0)_{z=\text{const}} = t_{\text{Ф}}(x; y) \quad (6)$$

(в момент времени $\tau = 0$, соответствующий началу теплого периода, тепловое воздействие метанолопровода на грунт отсутствует).

Решение системы уравнений (1) - (6) может быть найдено при известных зависимостях $t_{\Gamma}(z; \tau)$ и $t_{\text{м}}(z; \tau)$, которые сами являются предметом определения.

В связи с этим было проведено сопряжение температурного поля грунта $t(x; y; z; \tau)_{z=\text{const}}$ с температурами газа $t_{\Gamma}(z; \tau)$ и метанола $t_{\text{м}}(z; \tau)$ следующим образом (рис.2):

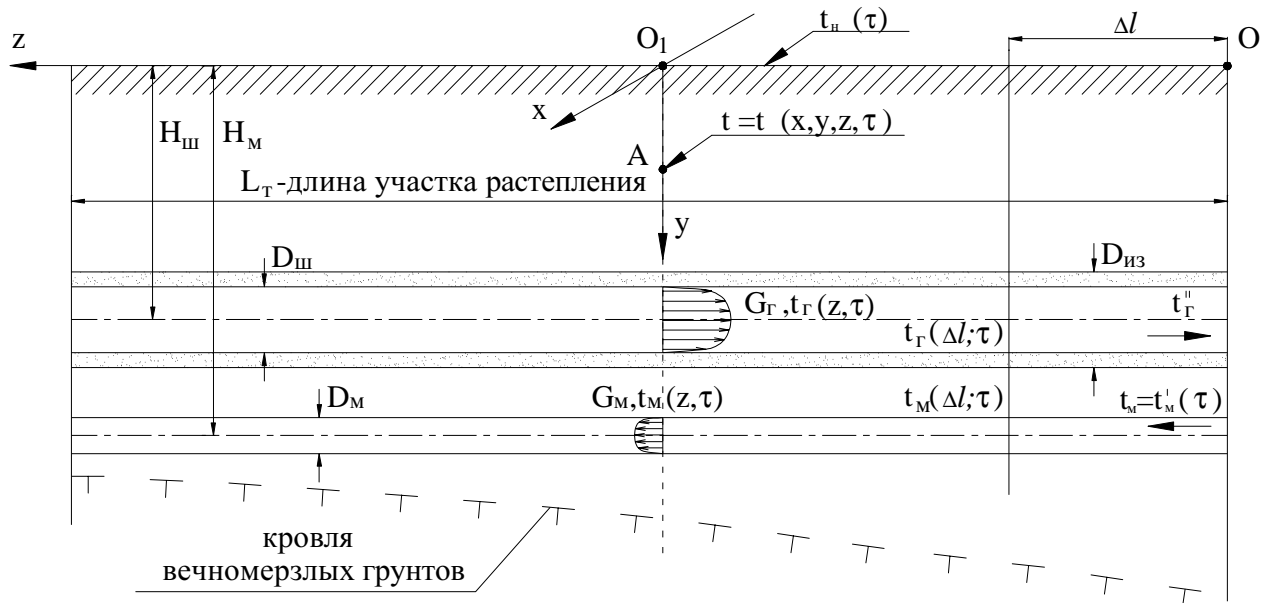


Рис.2. Схема оттаивания грунта по длине трубопроводов в теплый период времени

1. В сечении $z_0 = 0$ (вход для метанолопровода и выход для шлейфа) известны следующие зависимости по времени:

$$\begin{cases} t_{\text{г}}(0; \tau) = t_{\text{г}}''(\tau) - & \text{по эксплуатационным данным шлейфа;} \\ t_{\text{м}}(0; \tau) = t_{\text{н}}(\tau) - & \text{температура наружного воздуха.} \end{cases} \quad (7)$$

Дополнительные зависимости (7) полностью определяют процесс оттаивания грунта и позволяют рассчитать его температурное поле $t(x, y, z; \tau)$ в любой момент времени τ , а также найти линейные тепловые потоки шлейфа и метанолопровода в сечении $z = 0$ по следующим формулам:

$$\begin{cases} q_{\ell_{\text{г}}}(0; \tau) = -\lambda_{\text{г}} \int_{\Gamma_1} \frac{\partial t}{\partial n} \cdot ds \\ q_{\ell_{\text{м}}}(0; \tau) = -\lambda_{\text{г}} \int_{\Gamma_2} \frac{\partial t}{\partial n} \cdot ds. \end{cases} \quad (8)$$

2. Затем выбирается шаг Δl по длине шлейфа (метанолопровода) и для следующего поперечного сечения с координатой $z_1 = \Delta l$ вычисляются температуры газа и метанола:

$$\begin{cases} t_{\text{г}}(\Delta l; \tau) = t_{\text{г}}''(\tau) + \frac{G_{\text{г}} \cdot C_{\text{пр}}}{q_{\ell_{\text{г}}}(0; \tau) \cdot \Delta l} \\ t_{\text{м}}(\Delta l; \tau) = t_{\text{н}}(\tau) - \frac{G_{\text{м}} \cdot C_{\text{м}}}{q_{\ell_{\text{м}}}(0; \tau) \cdot \Delta l}, \end{cases} \quad (9)$$

где G_r , G_m , C_{rg} и C_m - массовые расходы газа и метанола и их удельные теплоемкости.

3. По найденным зависимостям $t_r(\Delta l; \tau)$ и $t_m(\Delta l; \tau)$ рассчитывается температурное поле грунта $t(x; y; \Delta l; \tau)$, находятся линейные тепловые потоки $q_{lr}(\Delta l; \tau)$, $q_{lm}(\Delta l; \tau)$ и температуры $t_r(2\Delta l; \tau)$, $t_m(2\Delta l; \tau)$ для сечения $z_2 = 2\Delta l$ и т.д.

В качестве объектов изучения в диссертационной работе выбраны шлейфы №105 и 115 как наиболее характерные для ЗГНКМ (УКПГ-1с). Ниже приводятся расчетные параметры и зависимости для шлейфа №115:

$$w_{tot} = 0,30; \quad t_{\phi} = 0^{\circ}\text{C}; \quad L_{\phi} = 1,34 \cdot 10^8 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}; \quad C(t) = \begin{cases} 3,51 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}, & t \geq 0^{\circ}\text{C}, \\ 2,48 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}, & t < 0^{\circ}\text{C}, \end{cases}$$

$$\lambda(t) = \begin{cases} 1,68 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, & t \geq 0^{\circ}\text{C}, \\ 1,86 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, & t < 0^{\circ}\text{C}. \end{cases} \quad G_r = 31,6 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \quad G_m = 4,30 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \quad (10)$$

$$C_{rg} = 2,22 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \quad (\text{при } t = +15^{\circ}\text{C}) \quad C_m = 1,92 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \quad (\text{при } t = +10^{\circ}\text{C});$$

$$\lambda_{из} = 0,033 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; \quad \delta_{из} = 60\text{мм}; \quad D_{ш} = 325\text{мм}; \quad D_{из} = 445\text{мм}; \quad H_{ш} = H_0 = 1,1\text{м};$$

$$H_m = 1,35\text{м}; \quad \ell_{мш} = 0,7\text{м}; \quad \begin{cases} t_h(\tau) = 19,0 \sin(0,785\tau) & (0 \leq \tau \leq \tau_T = 4\text{мес}) \\ t_r''(\tau) = t_r'^{\prime\prime} = 14,1^{\circ}\text{C}; \end{cases}$$

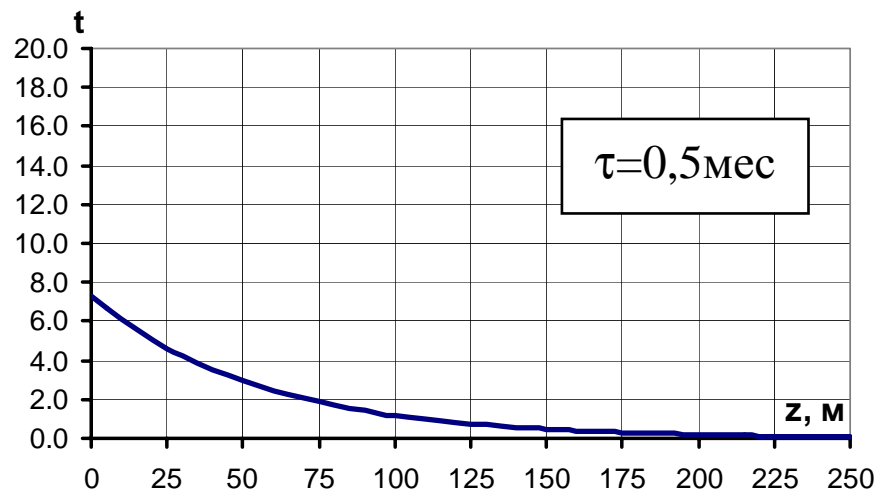
$$t_r' = 15^{\circ}\text{C}; \quad L = 1,7\text{км} \quad (\text{длина шлейфа}).$$

Время τ является текущим месячным временем, отсчитываемым с конца мая. Продолжительность теплого периода времени $[t_h(\tau) \geq 0^{\circ}\text{C}]$ принята равной $\tau_T = 4$ месяца. Поскольку изменение температуры $t_r''(\tau)$ является незначительным, то проведено её усреднение за время τ_T .

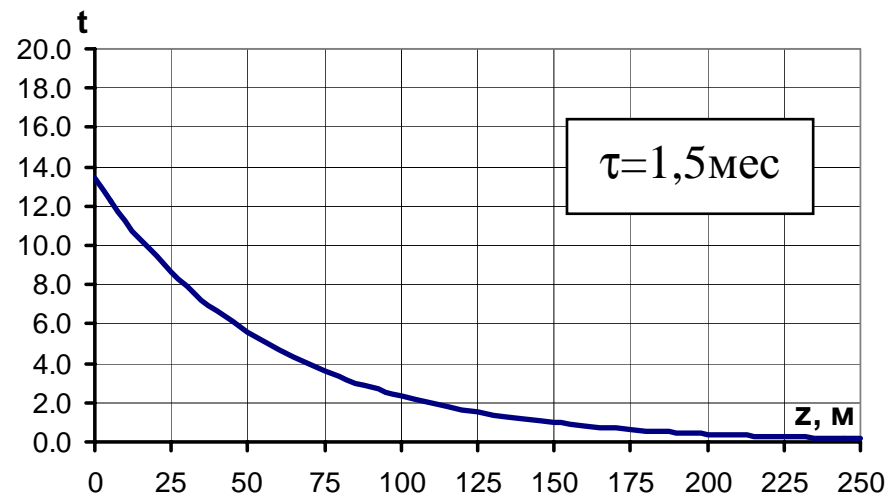
Численное решение задачи оттаивания грунта вокруг шлейфа и метанолопровода на основе системы уравнений (1)-(9) и расчетных данных (10) выполнено на кафедре механики грунтов и оснований ТГНГУ.

Результаты расчетов представлены на рис.3 и рис.4, где показаны положения фронтов оттаивания в выбранных поперечных сечениях и графики изменения температуры метанола по координате z и времени τ .

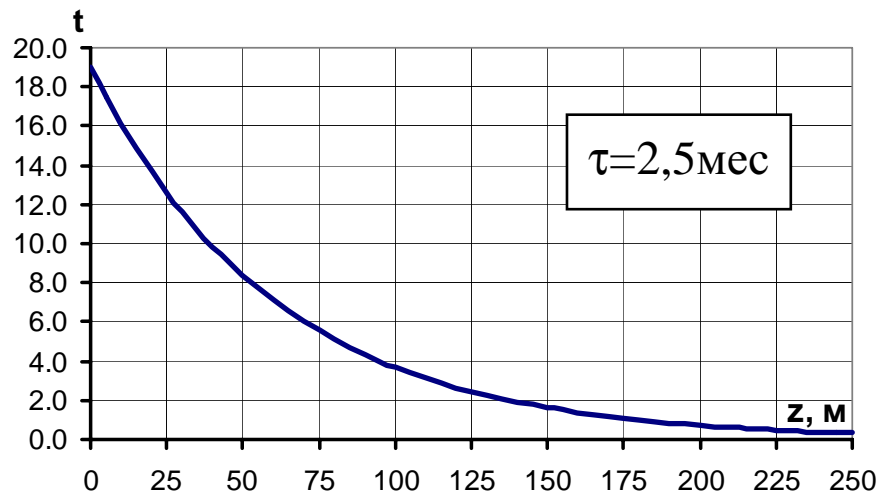
Рис.3. Оттаивание грунта вокруг шлейфа №115 в теплый период времени
1) $\tau = 0$; 2) $\tau = 0,5$; 3) $\tau = 1,0$; 4) $\tau = 1,5$; 5) $\tau = 2,0$; 6) $\tau = 2,5$; 7) $\tau = 3,0$; 8) $\tau = 4,0$



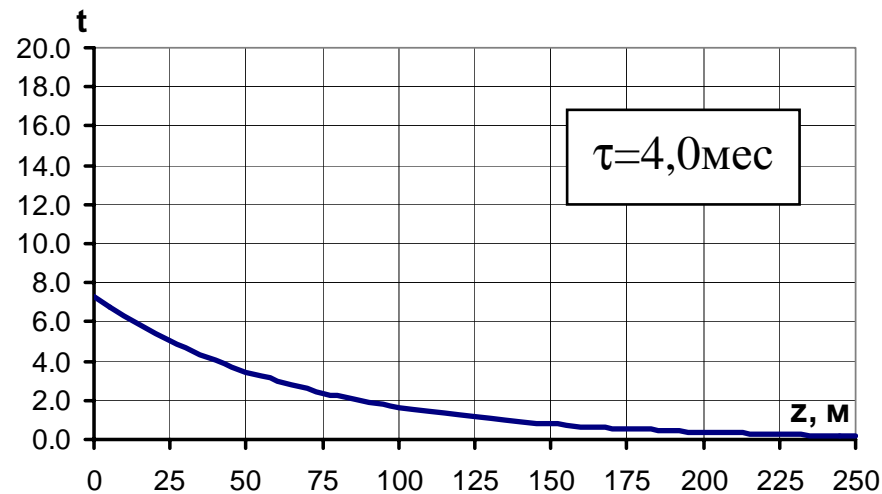
a)



б)



в)



г)

Рис.4. Распределение температуры по длине метанолопровода в теплый период времени (шлейф №115)

Анализ эксплуатационных данных шлейфов показал, что распределение температуры газа по их длине носит линейный характер, не зависящий от времени τ :

$$t_r(z; \tau) = \bar{t}_r'' + \frac{z}{L} (\bar{t}_r' - \bar{t}_r'') \quad (11)$$

(L - длина шлейфа; \bar{t}_r' - усредненная за теплый период температура $\bar{t}_r'(\tau)$).

Зависимость (11) позволяет упростить процедуру нахождения q_{eT} и уменьшить объем вычислений.

В третьей главе рассматривается вопрос определения осадки $s(z; \tau)$ оттаявшего грунта под шлейфом. По результатам второй главы выяснено, что в начальный период времени ($\tau_n \approx 0,5$ мес для обоих шлейфов) происходит оттаивание мерзлого грунта песчаной подушки и только после времени τ_n начинается растепление мерзлого суглинка под шлейфом. Поскольку осадка песчаной подушки практически равна нулю, то во всех дальнейших уравнениях и зависимостях время τ отсчитывается от значения τ_n .

Анализ численных результатов, проведенных во второй главе, показал, что основное растепление мерзлого суглинка под шлейфом приходится на относительно короткий участок L_T (100-350м), названный участком растепления.

Выполненные исследования позволили получить следующие регрессионные уравнения для толщины $h_T(z; \tau)$ оттаявшего суглинка под шлейфом:

$$\begin{cases} h_T(z; \tau) = \frac{A_1}{1 + \frac{z}{A_2}} \cdot \sqrt{\tau} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right) \right], & 0 \leq \tau \leq 3,5 \text{мес} \\ h_T'(\tau) = h(\infty; \tau) = A_\infty \cdot \sqrt{\tau} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right) \right], & 0 \leq \tau \leq 3,5 \text{мес.} \end{cases} \quad (12)$$

Величина $h'_T(\tau)$ характеризует толщину оттаявшего суглинка на большом расстоянии ($z \approx L$) от входа шлейфа. Параметры A_1 , A_2 , A_∞ и τ_0 в зависимостях (12) искались методом наименьших квадратов, что дало для шлейфа №115 следующие результаты:

$$\begin{cases} h_T(z; \tau) = \frac{0,535 \cdot \sqrt{\tau}}{1 + \frac{z}{38}} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{0,95}\right) \right], & 0 \leq \tau \leq 3,5 \text{ мес} \\ h'_T(\tau) = 5,00 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\tau} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{0,95}\right) \right], & 0 \leq \tau \leq 3,5 \text{ мес} \end{cases} \quad (13)$$

[$h_T(z; \tau)$ и $h'_T(\tau)$ измеряются в метрах].

Длина участка растепления $L_T(\tau)$ является корнем следующего определяющего уравнения:

$$0,95h_T[L_T(\tau); \tau] = h'_T(\tau), \quad (14)$$

что дает для шлейфа №115 следующее соотношение:

$$L_T(\tau) = 350 - 388 \exp\left(-\frac{\tau}{0,95}\right) \quad (0,5 \leq \tau \leq 3,5).$$

Для определения осадки $s(z; \tau)$ оттаявшего суглинка в работе используется формула Н.А.Цытовича:

$$s(z; \tau) = s_{от}(z; \tau) + s_p(z; \tau) = s_0 \cdot h_T(z; \tau) + s_p(z; \tau), \quad (15)$$

где $s_{от}(z; \tau)$ - осадка оттаивания грунта при переходе его из мерзлого состояния в талое;

s_0 - безразмерный коэффициент оттаивания, определяемый экспериментально;

$s_p(z; \tau)$ - компрессионная составляющая осадки.

Значение величины s_0 определяется по формуле Н.И.Вотякова:

$$s_0 = \frac{\kappa_5 w_{tot}}{2,7w_{tot} + 0,92}, \quad (16)$$

где κ_5 - безразмерный коэффициент, зависящий от вида грунта;

w_{tot} - суммарная влажность вечномерзлого грунта.

Осадку $s_p(z; \tau)$ напрямую зависит от времени τ через величину $h_T(z; \tau)$

и косвенно через консолидацию оттаявшего грунта.

С учетом того обстоятельства, что оттаявший суглинок имеет высокую водонасыщенность $I_w \approx 1,0$, была поставлена задача прогноза протекания компрессионной части осадки во времени.

В рамках фильтрационной теории консолидации грунтов было найдено приближенное решение для осадки оттаявшего грунта на основе метода, известного в теплофизике как интегральный метод теплового баланса.

Полученное решение отличается от известного решения Ю.К.Зарецкого по следующим причинам:

1. закон движения фронта оттаивания (13) рассматриваемого процесса лишь асимптотически соответствует движению фронта в указанном решении ($h_\tau \sim \sqrt{\tau}$);

2. найденное компактное решение в квадратурах выгодно отличается от указанного решения, полученного с помощью рядов.

Анализ найденного решения показал, что даже при предельно низких значениях коэффициента фильтрации для суглинков характерное время τ_k консолидационного процесса на порядок меньше характерного времени τ_t перестройки температурного поля талого грунта. Это позволяет использовать при расчете компрессионной составляющей осадки ее полное стабилизированное значение, пропорциональное $h_\tau(z; \tau)$.

В главе четвертой рассматривается силовое взаимодействие шлейфового газопровода с оттаявшим грунтом. Изменение высотного положения шлейфа $w(z; \tau)$ описывается уравнением его упругой линии:

$$EI \frac{dw^4}{dz^4} + N \cdot \frac{d^2w}{dz^2} = q_\ell - p_\ell, \quad (17)$$

где EI - изгибная жесткость трубопровода;

N - сжимающая сила, определяемая тепловым режимом шлейфа и рабочим давлением газа;

$q_{\ell} = q_{\ell}^{(гр)} + q_{\ell}^{(тр)}$ - нагрузка, определяемая суммой погонного веса грунта над трубопроводом и его собственного погонного веса вместе с транспортируемым газом;

p_{ℓ} - погонный отпор оттаявшего грунта.

Значение силы N находится через кольцевое напряжение в стенке трубы

$$\sigma_1 = \frac{\bar{p} \cdot D_{вн}}{2\delta} \quad (18)$$

по следующей формуле:

$$N = \sigma_{20} \cdot F = (\mu\sigma_1 - \alpha E \Delta t) \cdot \frac{\pi}{4} (D_n^2 - D_{вн}^2), \quad (19)$$

где \bar{p} - рабочее давление газа;

D_n и $D_{вн}$ - наружный и внутренний диаметры трубы;

$\delta = 0,5(D_n - D_{вн})$ - толщина стенки трубы;

μ , α и E - коэффициент Пуассона, коэффициент линейного расширения и модуль упругости материала труб;

$\Delta t = t_3 - t_0$ - разность между температурой эксплуатации и температурой замыкания шлейфа в плеть.

Для всех изучаемых шлейфов начальное продольное напряжение

$$\sigma_{20} = \mu\sigma_1 - \alpha E \Delta t \quad (20)$$

является отрицательным, что объясняется строительством их в зимний период времени и существенно положительной температурой эксплуатации t_3 в течение всего года.

Нахождение полного значений погонной нагрузки q_{ℓ} не вызывает затруднений и проводится для $q_{\ell}^{(тр)}$ по известной геометрии шлейфа и уравнению Клапейрона-Менделеева для газа, а величина $q_{\ell}^{(гр)}$ вычисляется по известной формуле геостатики:

$$q_{\ell}^{(гр)} = \gamma \cdot H_0 \cdot D_n \quad (21)$$

(γ - удельный вес грунта; $H_0 = H_{ш}$ - расстояние от оси шлейфа до открытой поверхности).

Основная сложность рассматриваемого процесса заключается в нахождении отпора грунта p_ℓ , для чего используются результаты второй и третьей главы.

В работе используются два подхода к определению второго слагаемого в формуле (15). Первый из них основывается на результатах компрессионных испытаний грунтов, а во второй опирается на экспериментальные данные, полученные А.Б.Айнбиндером. Для обоих подходов диаграмма «осадка-погонная сила» имеет вид, показанный на рис.5.

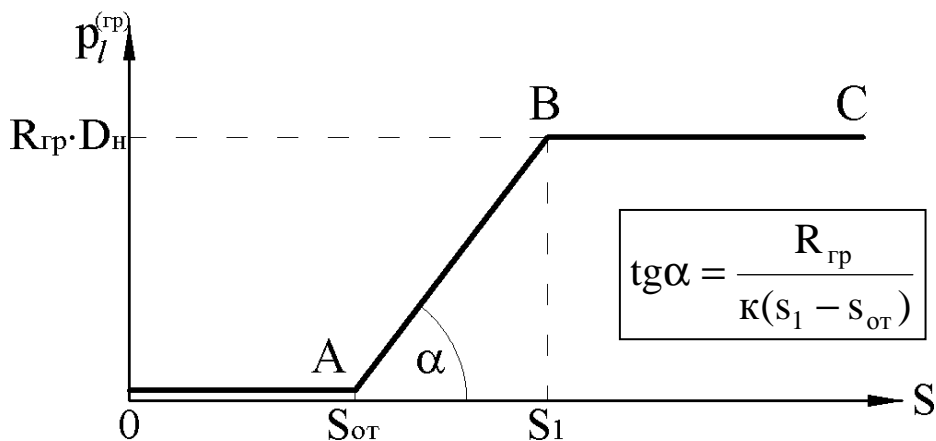


Рис.5. Зависимость погонной нагрузки p_ℓ от осадки s

Участок OA диаграммы соответствует процессу перехода грунта из мерзлого состояния в талое, участок AB - упругому отпору оттаявшего грунта, а участок BC описывает пластическое взаимодействие шлейфа с талым грунтом, имеющим несущую способность $R_{гр}$.

Аналитическая зависимость графика рис.5 имеет следующий вид:

$$q_\ell = \begin{cases} 0 & 0 \leq s < s_{от} \\ k \cdot (s - s_{от}) \cdot D_н & s_{от} \leq s < s_1 \\ R_{гр} \cdot D_н & s_1 \leq s. \end{cases} \quad (22)$$

Отличие двух способов подхода к взаимодействию шлейфа с оттаявшим грунтом состоит в различии определения коэффициента k ,

который фактически является коэффициентом постели. Если для первого варианта отпора грунта величина k определяется по формуле

$$k = \frac{E_{\text{гр}}}{\beta \cdot h_{\tau}(z; \tau)}, \quad (23)$$

то для второго - по формуле

$$k = \frac{0,12 \cdot E_{\text{гр}}}{(1 - \mu_{\text{гр}}^2) \cdot \sqrt{D_{\text{н}} \cdot \ell_0}}, \quad (24)$$

где $\beta = \left(1 - \frac{2\mu_{\text{гр}}^2}{1 - \mu_{\text{гр}}}\right)$ - коэффициент стеснения поперечной деформации;

$E_{\text{гр}}$, $\mu_{\text{гр}}$ - модуль деформации и коэффициент Пуассона талого грунта;

$\ell_0 = 1\text{ м}$ - единичная длина трубопровода.

Величина предельной осадки упругого отпора грунта s_1 находится по известному значению k :

$$s_1 = s_{\text{от}} + \frac{R_{\text{гр}}}{k}. \quad (25)$$

Первая пара граничных условий задачи (17) относится к сечению $z = 0$ и определяется технологическими условиями закрепления шлейфа:

$$w = \frac{dw}{dz} = 0, \quad \text{при } z = 0. \quad (26)$$

Вторая пара привязана к концу участка растепления:

$$w = w_{\infty} = s_0 \cdot h'_{\tau}(\tau); \quad \frac{dw}{dz} = 0, \quad \text{при } z = L_{\tau}(\tau). \quad (27)$$

Последнее замыкающее соотношение связывает между собой прогиб трубопровода $w(z; \tau)$ в некотором сечении с осадкой грунта $s(z; \tau)$ в этом сечении:

$$w(z; \tau) \leq s(z; \tau). \quad (28)$$

Неравенство (28) обусловлено граничными условиями (26), вследствие чего появляется участок провисания шлейфа длины $L_0(\tau)$, на

котором погонный отпор грунта $p_\ell = 0$.

Для определения величины $L_0(\tau)$ находилось решение $w_1(z;\tau)$ более простой задачи:

$$EI \frac{d^4 w_1}{dz^4} + N \frac{d^2 w_1}{dz^2} = q_\ell \quad (29)$$

с граничными условиями (26)-(27), после чего величина $L_0(\tau)$ находилась как корень следующего уравнения:

$$w_1[L_0(\tau); \tau] = s_0 \cdot h_\tau [L_0(\tau); \tau] \quad (30)$$

Полученное значение $L_0(\tau)$ позволило избавиться от неравенства (28) и перейти к следующей системе уравнений, описывающих прогиб трубопровода на участке растепления:

$$\begin{cases} EI \frac{d^4 w_1}{dz^4} + N \frac{d^2 w_1}{dz^2} = q_\ell & 0 \leq z < L_0(\tau); \\ EI \frac{d^4 w_2}{dz^4} + N \frac{d^2 w_2}{dz^2} = q_\ell - p_\ell; & L_0(\tau) \leq z \leq L_\tau(\tau). \end{cases} \quad (31)$$

$$\begin{cases} w_1(0) = 0; \\ w_1'(0) = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} w_2[L_\tau(\tau)] = w_\infty(\tau); \\ w_2'[L_\tau(\tau)] = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} w_1 = w_2; \\ w_1' = w_2'; \\ w_1'' = w_2''; \\ w_1''' = w_2'''. \end{cases} \quad \text{при } z = L_0(\tau).$$

Последняя четверка краевых условий отражает равенство перемещений, углов поворота, изгибающего момента и поперечной силы в сечении $z = L_0(\tau)$.

Основная система (31) решалась численными методами как для двух вариантов отпора грунта, так и с учетом взвешивающего действия воды, приводящего к уменьшению $q_\ell^{(гр)}$ и появлению архимедовой силы, действующей на трубопровод и вызывающей уменьшение значения $q_\ell^{(гр)}$.

Предварительно были проведены исследования потери устойчивости формы трубопровода, находящегося под действием сжимающей силы N . Выполненные расчеты показали, что даже при минимальном

коэффициенте постели, соответствующем зависимости (24), имеется большой запас по величине N :

$$N < 0,1N_{кр} \quad (32)$$

($N_{кр} = 2\sqrt{k \cdot D_n \cdot EI}$ - критическая сила, вызывающая потерю формы шлейфа).

Результаты проведенных расчетов иллюстрируются рис.6 и рис.7, где приведены графики изгиба шлейфа №115 и дополнительного продольного напряжения в его стенке, рассчитываемого по формуле:

$$\Delta\sigma_2 = \pm 0,5ED_n \cdot \frac{d^2w}{dz^2}. \quad (33)$$

(знак «+» соответствует растяжению, знак «-» - сжатию).

Указанные на рис.6 и рис.7 зависимости получены для обоих вариантов отпора грунта при следующих расчетных параметрах:

$$D_n = D_{ш} = 325\text{мм}; D_{вн} = 301\text{мм}; \delta = 12\text{мм};$$

$$E = 2,6 \cdot 10^{11}\text{Па}; EI = 2,99 \cdot 10^7 \text{Н} \cdot \text{м}^2; \mu = 0,3; \alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} (1/\text{К});$$

$$\bar{p} = 10,8\text{МПа}; t_s = t_r = 14,1^{\circ}\text{C}; t_0 = -20^{\circ}\text{C};$$

$$\sigma_1 = 135\text{МПа}; \sigma_{20} = -43,8\text{МПа}; N = 5,16 \cdot 10^5 \text{Н}; E_{гр} = 5\text{МПа};$$

$$\mu_{гр} = 0,37; \beta = 0,57; \rho_{гр} = 1,9 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \rho_w = 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$R_{гр} = 2 \cdot 10^5 \text{Па}; R_{гр} \cdot D_n = 6,50 \cdot 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}}; w_{tot} = 0,43; \kappa_5 = 0,23; s_0 = 4,75 \cdot 10^{-2};$$

$$q_{\ell}^{(гр)} = 6,66 \cdot 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{м}} - \text{без учета взвешивающего действия воды};$$

$$q_{\ell}^{(гр)} = 3,15 \cdot 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{м}} - \text{с учетом взвешивающего действия воды};$$

$$q_{\ell}^{(гр)} = 0,95 \cdot 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{м}} - \text{без учета взвешивающего действия воды};$$

$$q_{\ell}^{(гр)} = 0,14 \cdot 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{м}} - \text{с учетом взвешивающего действия воды}.$$

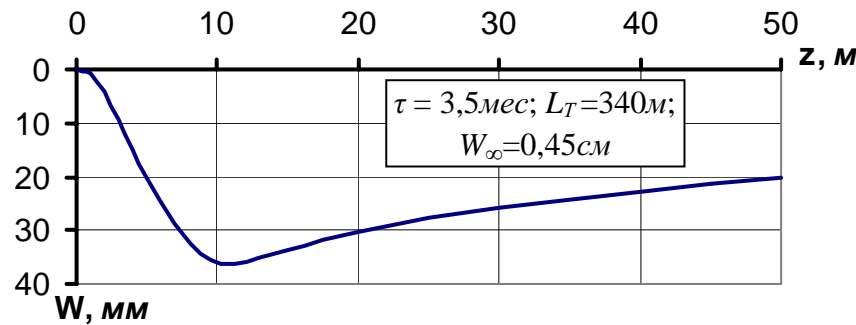
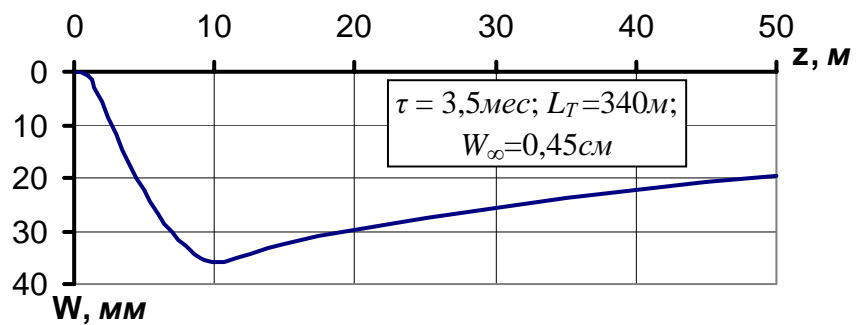
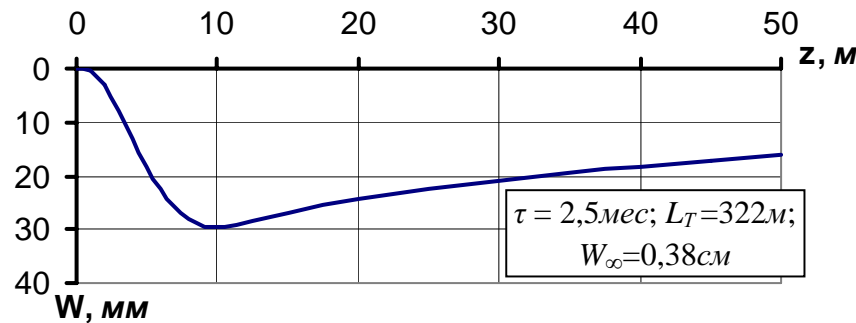
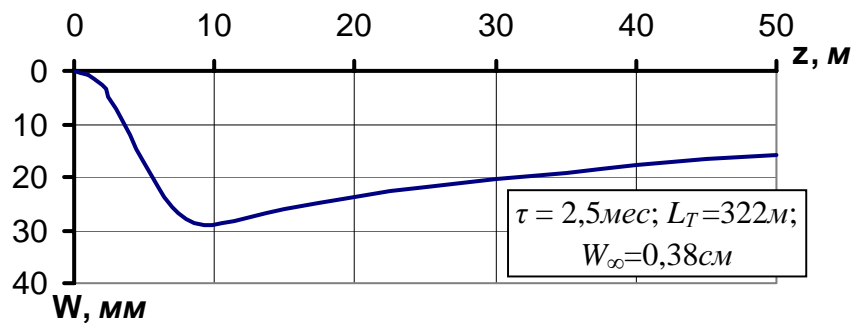
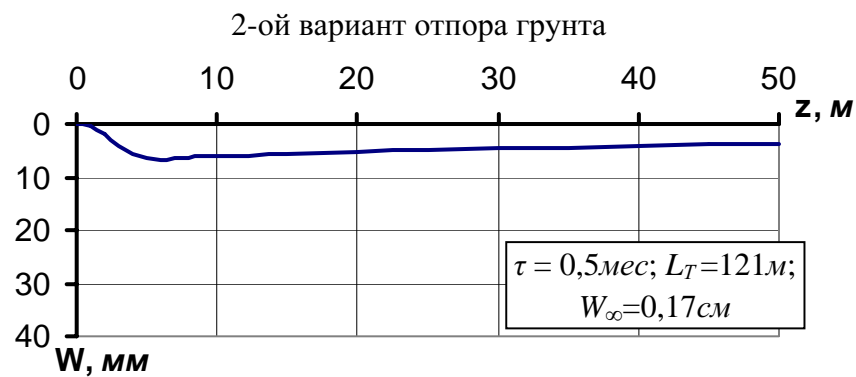
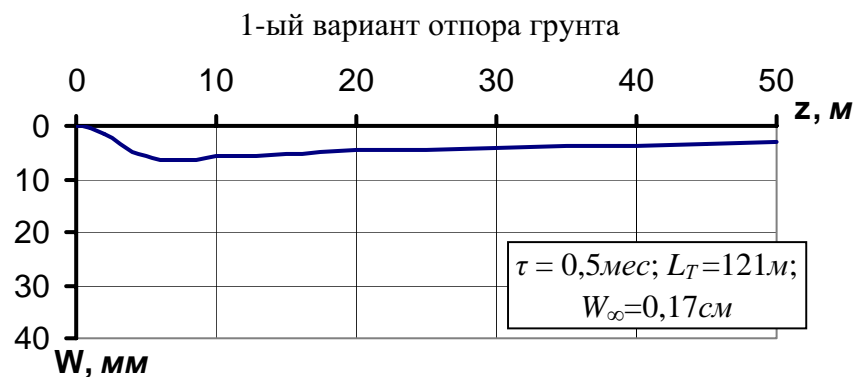
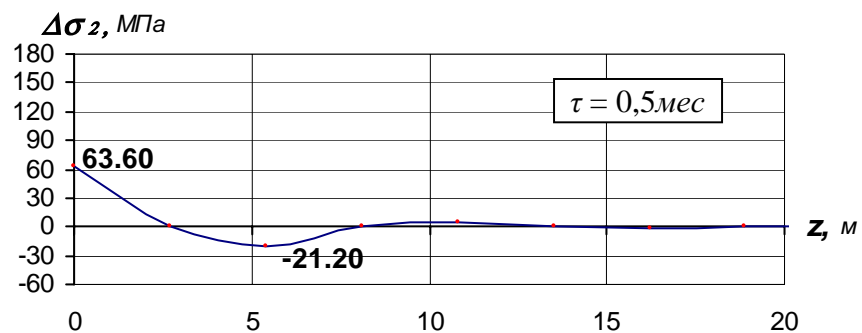


Рис.6. Изменение высотного положения шлейфа №115 (без учета взвешивающего действия воды)

1-ый вариант отпора грунта



2-ой вариант отпора грунта

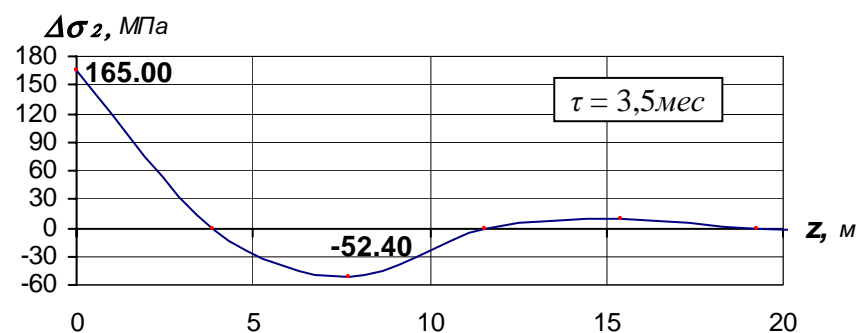
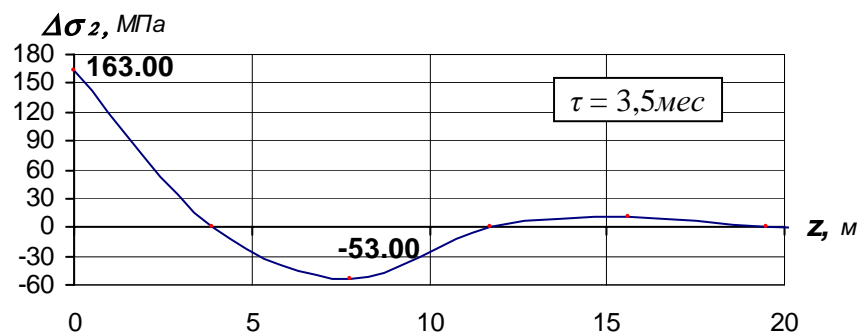
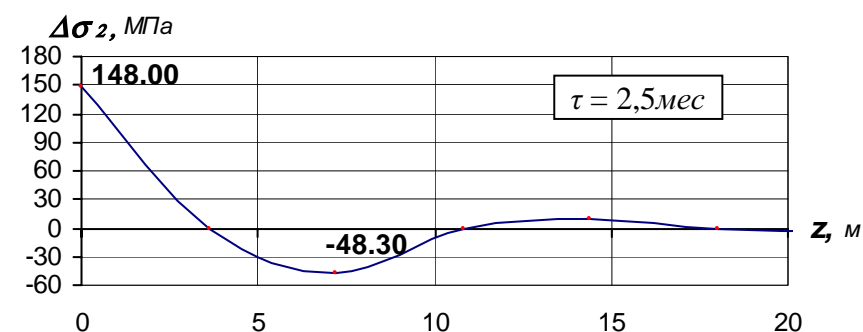
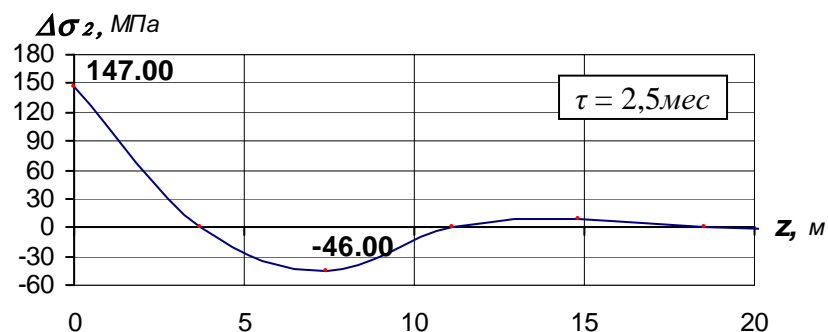
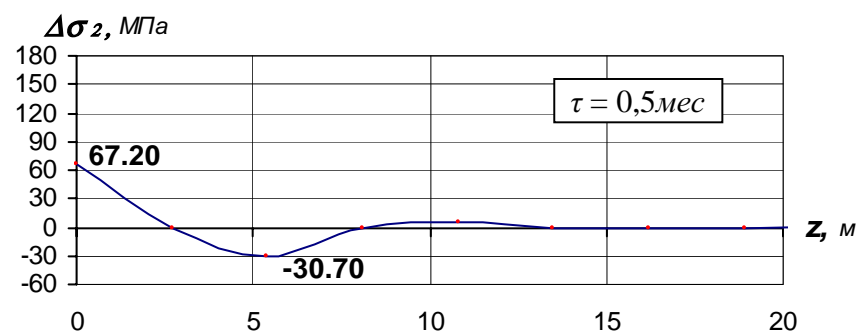


Рис.7. Изменение добавочного продольного напряжения $\Delta\sigma_2$ по длине шлейфа №115 (без учета взвешивающего действия воды)

В таблице 1 приведены значения дополнительного $\Delta\sigma_2$ и полного продольного напряжения $\sigma_2 = \sigma_{20} + \Delta\sigma_2$ в опасных сечениях шлейфа №115 (координата z_1 соответствует глобальному минимуму величины $\Delta\sigma_2$).

Таблица 1

Значения дополнительного и полного продольного напряжения в стенке шлейфа по второму варианту отпора грунта (в квадратных скобках с учетом взвешивающего действия воды)

τ, мес.	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$\Delta\sigma_2$ при $z = 0$	67,2 [34,7]	94,8 [49,8]	118 [62,9]	134 [72,5]	148 [78,7]	157 [84,2]	165 [88,1]
$ \Delta\sigma_2 $ при $z = z_1$	30,7 [10,3]	37,1 [15,7]	40,2 [19,3]	45,1 [22,9]	48,3 [24,5]	50,8 [27,1]	52,4 [29,0]
σ_2 при $z = 0$ (верхняя образующая)	23,4 [-9,1]	51,0 [6,0]	74,2 [19,1]	90,2 [28,7]	104 [34,9]	113 [40,4]	121 [44,3]
σ_2 при $z = 0$ (нижняя образующая)	-111 [-78,5]	-139 [-93,6]	-162 [-107]	-178 [-116]	-192 [-122]	-201 [-128]	-209 [-132]
σ_2 при $z = z_1$ (верхняя образующая)	-74,5 [-54,1]	-80,9 [-59,5]	-84 [-63,1]	-88,9 [-66,7]	-92,1 [-68,3]	-94,6 [-70,9]	-96,2 [-72,8]
σ_2 при $z = z_1$ (нижняя образующая)	-13,1 [-33,5]	-6,7 [-28,1]	-3,6 [-24,5]	1,3 [-20,9]	4,5 [-19,3]	7,0 [-16,7]	8,6 [-14,8]

Расчеты по 1-ому варианту отпора грунта дают аналогичные результаты, осадка для обоих отпоров не превышает значения s_1 .

Проверка шлейфов на прочность проводилась в работе по энергетической теории, согласно которой эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{эКВ}}$ связано с пределом текучести σ_T следующим соотношением:

$$\sigma_{\text{эКВ}} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \leq \sigma_T. \quad (34)$$

Результаты расчетов шлейфа №115 на прочность приведены в таблице 2.

Эквивалентные напряжения в опасных сечениях шлейфа №115
($\sigma_1 = 135\text{МПа}$)

τ, мес.	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$\sigma_{\text{экв}}$ при $z = 0$ (нижняя образующая)	210 [187]	236 [195]	257 [203]	273 [213]	284 [222]	294 [230]	298 [237]
$\sigma_{\text{экв}}$ при $z = z_1$ (верхняя образующая)	177 [169]	182 [173]	187 [176]	191 [178]	196 [179]	199 [181]	202 [182]

Примечания: 1. В квадратных скобках приведены значения $\sigma_{\text{экв}}$ с учетом взвешивающего действия воды.

2. Предел текучести материала труб $\sigma_T = 420\text{МПа}$.

Начальное эквивалентное напряжение, одинаковое для всех сечений и любых образующих, равняется:

$$\sigma_{\text{экв}}^{(\text{нач})} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_{20} + \sigma_{20}^2} = 160\text{МПа}. \quad (35)$$

Достаточно большой запас позволяет, на первый взгляд, говорить о надежной эксплуатации шлейфов. Однако полученные в работе результаты не учитывают стохастичность большого числа факторов, заложенных в расчетные уравнения и зависимости, коррелирующие вводимые коэффициенты по работе и надежности трубопровода, по материалу труб и т.д.

Тем не менее, на основании результатов работы, можно утверждать, что на участках растепления в конце теплого периода времени в стенках шлейфов может наблюдаться значительное увеличение продольного и эквивалентного напряжений, что требует, по крайней мере, организации мониторинга на указанных участках.

Основные выводы по работе

1. Поставлена и решена численными методами задача оттаивания мерзлого грунта вокруг системы «метанолопровод-шлейфовый газопровод» в теплый период времени года.

2. Определены расчетные параметры, связывающие эксплуатационные характеристики шлейфовых газопроводов и вдольтрассовых грунтов.

3. Для конкретных эксплуатируемых шлейфов определены длины участков растепления, изучена динамика оттаивания грунта и найдены регрессионные уравнения для толщины и осадки оттаявшего грунта.

4. На основе предложенной силовой модели получена система дифференциальных уравнений, описывающая продольно-поперечный изгиб газопровода на участках провисания и растепления.

5. Найденные уравнения упругой линии трубопроводов позволяют выделить опасные по максимальной величине эквивалентного напряжения участки шлейфового газопровода.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах автора:

1. Кушнир С.Я. Проблемы эксплуатации газопроводных систем в условиях Тюменского Заполярья / Кушнир С.Я., Горелов А.С. // Сборник научных трудов: «Проблемы транспорта в Западно-Сибирском регионе России». – Тюмень: ТюмГНГУ, 2000г.-С.160-162с.

2. Кушнир С.Я. Грунтовый фактор в надежности надземной прокладки трубопроводов на вечномерзлых грунтах / Кушнир С.Я., Горелов А.С. // Материалы международного семинара: «Геотехнические и эксплуатационные проблемы нефтегазовой отрасли»; под общей редакцией профессора, д.т.н. С.Я.Кушнира. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2002г.-С.95-96.

3. Кушнир С.Я. О способах прокладки газопроводов на шельфах Заполярного месторождения / Кушнир С.Я., Горелов А.С. // Материалы международного семинара: «Геотехнические и эксплуатационные проблемы нефтегазовой отрасли»; под общей редакцией профессора, д.т.н. С.Я.Кушнира. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2002г.-С.108-111.

4. Карнаухов Н.Н. Исследование интенсивности деструкции мерзлых грунтов при подземной прокладке газопровода в условиях Чукотки / Карнаухов Н.Н., Кушнир С.Я., Горелов А.С., Качур В.М., Громов В.Н. // Известия вузов, «Нефть и газ». – Тюмень: ТГНГУ, 2003. - №1. – С.76-83.

5. Горелов А.С. Определение толщины оттаявшего мерзлого грунта под шлейфовым газопроводом в теплый период времени / Горелов А.С., Кушнир С.Я., Горковенко А.И., Потапов А.Ю. // Известия вузов, «Нефть и газ». - Тюмень: ТГНГУ, 2004, №3.-С.23-27.

6. Кушнир С.Я. Силовое взаимодействие шлейфового газопровода с оттаявшим мерзлым грунтом / Кушнир С.Я., Горелов А.С., Горковенко А.И. // Известия вузов, «Нефть и газ». – Тюмень: ТГНГУ, 2004, №4.- С.56-61.