

ния координат пересечения отрезков трассы с границами областей карты требует больше вычислительных ресурсов и времени на проведение расчетов. Причем затрачиваемое время напрямую зависит от площади рассматриваемого участка карты (от количества и сложности выделенных областей).

Применение растровых вариантов карты весов позволяет значительно сократить время, затрачиваемое на расчеты, но дает менее точный результат в связи с погрешностью определения границ областей карты с различным удельным весом. При увеличении разрешения карты погрешность снижается, однако повышаются затраты памяти и время вычисления стоимости трассы трубопровода.

Библиографический список

1. Выбор трасс магистральных трубопроводов / Л. А. Бабин [и др.]. – М.: Недра, 1970. – 128 с.
2. Бородавкин П. П., Березин В. Л., Рудерман С. Ю. Выбор оптимальных трасс магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1974. – 240 с.
3. Дубровин Д. Д., Земенкова М. Ю. Анализ проблем обеспечения минимальных расстояний от объектов магистральных газопроводов // Нефтегазовый терминал: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. магистрантов им. профессора Н. А. Малюшина. – Тюмень, 2017. – С. 72–77.
4. Мутавалиев Ш. Т., Земенков Ю. Д., Земенкова М. Ю. Строительство, проектирование трубопроводов в горной местности и их задачи оптимизации // Нефтегазовый терминал: сб. науч. ст. междунар. науч.-техн. конф. / Под общ. ред. С. Ю. Подорожникова. – 2015. – С. 132–135.
5. Бородавкин П. П., Березин В. Л. Сооружение магистральных трубопроводов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 471 с.
6. Григорьева П. В., Воронин К. С., Черенцов Д. А. Выбор трассы трубопровода с учетом особенностей рельефа местности // Нефтегазовый терминал: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. магистрантов им. профессора Н. А. Малюшина. – Тюмень, 2017. – С. 56–60.
7. Zemenkova M. Yu., Zemenkov Yu. D., Shipovalov A. N. Mathematic modeling of complex hydraulic machinery systems when evaluating reliability using graph theory // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – P. 012–056.
8. Белоусов А. И., Ткачев С. Б. Дискретная математика: учеб. для вузов / Под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – 4-е изд., исправл. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2006. – 744 с. – (Математика в техническом университете; Вып. XIX).
9. Повышение надежности и эффективности технологического режима сети нефтесбора / А. Н. Смирнов [и др.] // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2011. – № 1 (23). – С. 27–29.

Сведения об авторах

Воронин Константин Сергеевич, к. т. н., доцент кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: voronin_tsogu@mail.ru

Григорьева Полина Вадимовна, магистрант, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: polino4ka.g@yandex.ru

Черенцов Дмитрий Андреевич, к. т. н., доцент кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: cherentsovda@bk.ru

Information about the authors

Voronin K. S., Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen, e-mail: voronin_tsogu@mail.ru

Grigorieva P. V., Master's Student, Industrial University of Tyumen, e-mail: polino4ka.g@yandex.ru

Cherentsov D. A., Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen, e-mail: cherentsovda@bk.ru

УДК 624.131;621.644

МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ПОМОЩЬЮ ГРУНТОВОЙ ПОДУШКИ

PROCEDURE OF PROVIDING ENGINEERING PROTECTION FROM FROST HEAVING OF UNDERGROUND TRUNK PIPELINES BY THE SOIL BED

Е. В. Марков

E. V. Markov

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Ключевые слова: магистральный трубопровод; морозное пучение; инженерная защита; грунтовая подушка

Key words: trunk pipeline; frost heaving; engineering protection; soil bed

Введение

Магистральные трубопроводы северных регионов Западной Сибири сооружаются и эксплуатируются в экстремальных климатических и инженерно-геологических условиях, характеризующихся низкими температурами воздуха, высоким уровнем грунтовых вод, заболоченностью и заторфованностью, глубоким сезонным промерзанием на участках локальных поднятий и подтоплением территорий во время весеннего и осеннего паводков [1], что в совокупности приводит к обширному распространению грунтов, подверженных процессам морозного пучения.

При осуществлении транспорта продукта с отрицательной температурой по подземному трубопроводу высокая потенциальная опасность возникновения морозного пучения обусловлена тем, что его линейная часть сама по себе является источником холода и зачастую становится одним из первичных факторов запуска процесса пучения грунтов. При подобных режимах эксплуатации в целях защиты трубопровода от негативного воздействия морозного пучения в инженерной практике преимущественно применяется теплоизоляция. При особо низких температурах транспортируемого продукта для обеспечения напряженно-деформированного состояния (НДС) трубопровода в границах допустимых значений применение одной теплоизоляции является недостаточным условием, и возникает необходимость применения второго наиболее распространенного способа инженерной защиты от морозного пучения — сооружение непучинистой грунтовой подушки.

В результате анализа проработанности существующих расчетных подходов в указанном направлении, приводимых в справочной литературе и нормативной документации, выявлены ограничения их применения для сложных инженерно-геокриологических условий. В связи с этим, нами была поставлена цель — разработать методику обеспечения инженерной защиты от морозного пучения подземных магистральных трубопроводов с помощью сооружения грунтовой подушки, учитывающей производственные и материальные ресурсы, применяемые для строительства и эксплуатации инженерных объектов в северных регионах.

Задачи исследования

- Разработать методику оценки изменения напряженно-деформированного состояния трубопровода на участках пучинистых грунтов, учитывающую особенности формирования их температурно-влажностного режима и НДС.
- Выявить зависимость изменения НДС трубопровода от заданных геометрических и деформационных свойств сооружаемой грунтовой подушки на примере действующего магистрального конденсатопровода «Ямбург — Уренгой».
- Разработать инженерный способ определения требований к геометрическим параметрам и деформационным свойствам грунтовых подушек, достаточных для обеспечения требуемых условий по защите трубопровода от морозного пучения грунтов.

Разработка методики оценки изменения НДС трубопровода на участках пучинистого грунта

В качестве объекта моделирования был выбран трубопровод с техническими и эксплуатационными характеристиками, соответствующими магистральному конденсатопроводу «Ямбург — Уренгой», линейная часть которого подвержена многолетнему воздействию сил морозного пучения, и где задача обеспечения ее инженерной защиты поставлена особо остро. Методика оценки изменения напряжений в стенке рассматриваемого трубопровода на участках пучинистых грунтов реализуется в четырех этапах.

Этапы I и II предназначены для решения задачи тепло- и массопереноса в грунтах. На этапе I определяются значения температуры грунта, содержания воды, солей и льда в грунте в момент запуска трубопровода в эксплуатацию. Для этого корректируются входные параметры математической модели. Далее, на этапе II в расчетную схему (рис. 1) вносится модель трубопровода (λ_T — теплопровод-

ность грунта, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$; \vec{n}_{zp} — единичный вектор нормали к поверхности грунта; \vec{j}_w, \vec{j}_s — диффузионный поток воды и солей в грунте, $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$; \vec{j}_{ws} — конвективный поток водно-солевого раствора в грунте, $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$; ω_w, ω_s — концентрация воды и солей в грунтовой жидкости, д.ед.).

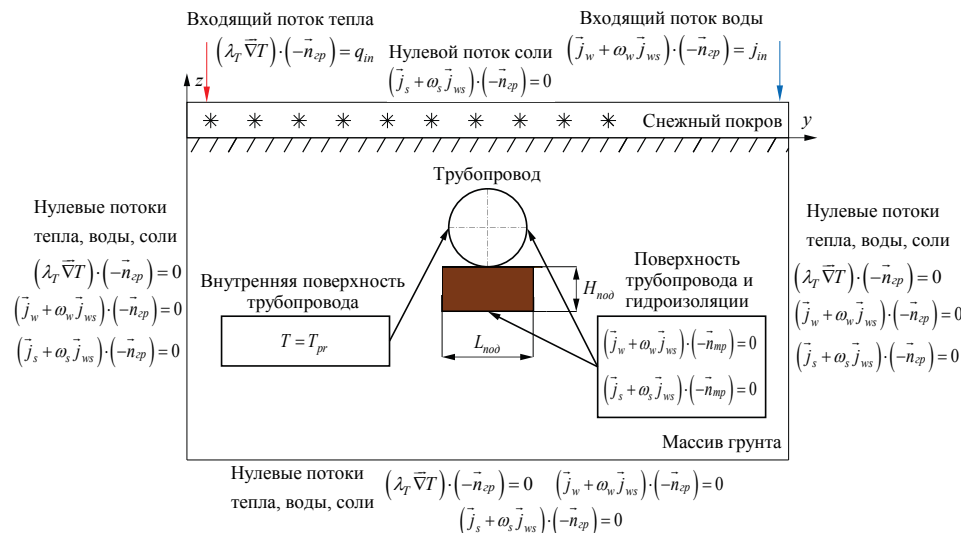


Рис. 1. Расчетная схема для определения пространственного распределения относительной объемной деформации грунта от морозного пучения ϵ_V с учетом сооружаемой грунтовой подушки размером $L_{под} \times H_{под}$

Расчетная схема представляет собой двумерное описание подземного трубопровода в грунте с температурой транспортируемого продукта T_{pr} (К). На поверхности грунта заданы граничные условия, характеризующие входящий поток тепла q_{in} ($\text{Вт}/\text{м}^2$) и воды j_{in} ($\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$) посредством конвективного и радиационного теплообмена, испарения, конденсации и выпадения осадков.

Для описания применены выражения.

- При отсутствии снега и льда в порах с учетом капиллярно-сорбционного и химических потенциалов, влияющих на скорость испарения [2]

$$\begin{aligned}
 & (-\lambda_T \vec{\nabla} T) \cdot (-\vec{n}_{zp}) = \alpha(T_{air} - T) + \\
 & + \sigma_0 \varepsilon (b_{air} T_{air}^4 - T^4) + (1 - A_{surf}) (1 - \theta \bar{C}) Q_{sun} + \\
 & + 8,49 \cdot 10^{-11} \rho_w L_{evp} U^{0,8} \left(P_w \varphi_{air} - P_{soil} \exp \left(\frac{(\psi_w + \mu_w^c) M_w}{RT} \right) \right),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где α — коэффициент конвективного теплообмена поверхности грунта и атмосферы, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$; T_{air} — температура воздуха, К; T — температура грунта, К; σ_0 — постоянная Стефана — Больцмана, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-4}$; ε — степень черноты поверхности грунта, д.ед.; b_{air} — коэффициент противои излу чения атмосферы, д.ед.; A_{surf} — альbedo де я тельной поверхности, д.ед.; θ — коэффициент отражения солнечной радиации от облаков по рекомендациям из [3], д. ед.; \bar{C} — балл общей облачности, б.р.; Q_{sun} — сумма прямой и рассеянной солнечной радиации при ясном небе, $\text{Вт}/\text{м}^2$; ρ_w — плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$; L_{evp} — теплота парообразования воды, Дж/кг; U — скорость ветра на высоте флюгера (10 м), м/с; P_w — давление

насыщенного пара воды при температуре воздуха, Па; φ_{air} — относительная влажность воздуха; P_{soil} — давление насыщенного пара воды при температуре поверхности грунта, Па; μ_w^c — понижение термодинамического потенциала воды в растворе, Дж/кг; ψ_w — капиллярно-сорбционный потенциал воды в грунте, Дж/кг; M_w — молярная масса воды, кг/моль; R — универсальная газовая постоянная, Дж·моль⁻¹·К⁻¹.

$$\begin{aligned} (\bar{j}_w + \omega_w \bar{j}_{ws}) \cdot (-\bar{n}_{zp}) = \rho_w \frac{h_{pr}}{t_m} - j_{out} + \\ + 8,49 \cdot 10^{-8} U^{0,8} \left(P_w \varphi_{air} - P_{soil} \exp \left(\frac{(\psi_w + \mu_w^c) M_w}{RT} \right) \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где h_{pr} — сумма смешанных и жидких осадков, м; t_m — продолжительность месяца в секундах, с; j_{out} — сток поверхностных вод, кг·с⁻¹·м⁻².

• При наличии льда в порах и отсутствии снега ($\gamma_i > 0$, $h_{sn} = 0$) выражения описывают испарение льда, под которым скрыта жидкая вода,

$$\begin{aligned} (-\lambda_T \bar{\nabla} T) \cdot (-\bar{n}_{zp}) = \alpha (T_{air} - T) + \\ + \sigma_0 \varepsilon (b_{air} T_{air}^4 - T^4) + (1 - A_{surf}) (1 - \theta \bar{C}) Q_{sun} + \\ + 8,49 \cdot 10^{-11} \rho_w L_{exp} U^{0,8} (P_w \varphi_{air} - P_{soil}), \end{aligned} \quad (3)$$

где L_w — скрытая теплота плавления льда, Дж/кг.

$$\begin{aligned} (\bar{j}_w + \omega_w \bar{j}_{ws}) \cdot (-\bar{n}_{zp}) = \rho_w \frac{h_{pr}}{t_m} - j_{out} + \\ + 8,49 \cdot 10^{-8} U^{0,8} (P_w \varphi_{air} - P_{soil}). \end{aligned} \quad (4)$$

• При наличии снежного покрова ($h_{sn} > 0$) выражения описывают испарение снега (в расчетах используется температура поверхности снежного покрова T_{sn})

$$\begin{aligned} (-\lambda_T \bar{\nabla} T) \cdot (-\bar{n}_{zp}) = \alpha (T_{air} - T) + \\ + \sigma_0 \varepsilon (b_{air} T_{air}^4 - T^4) + (1 - A_{surf}) (1 - \theta \bar{C}) Q_{sun} + \\ + 1,416 \cdot 10^{-11} \rho_w (L_w + L_{exp}) U (P_w \varphi_{air} - P_{sn}), \end{aligned} \quad (5)$$

где T_{sn} — температура поверхности снега, К; P_{sn} — давление насыщенного пара над поверхностью льда при температуре поверхности снега, Па.

Входящий поток воды рассчитывается как разница между уменьшением толщины снежного покрова, выпавшими осадками и испарением.

$$\begin{aligned} (\bar{j}_w + \omega_w \bar{j}_{ws}) \cdot (-\bar{n}_{zp}) = \rho_w \frac{h_{pr}}{t_m} - j_{out} + \\ + 1,416 \cdot 10^{-11} \rho_w U (P_w - P_{sn}), \end{aligned} \quad (6)$$

где h_{sn} — высота снежного покрова по снегосъемкам, м; ρ_{sn} — плотность снега по снегосъемкам, кг/м³; причем обратного движения воды нет, то есть

$$(\bar{j}_w^{ec} + \omega_w \bar{j}_{ws}^{ec}) \cdot (-\bar{n}) \geq 0 \text{ при } h_{sn} > 0.$$

Коэффициент к противозлучению атмосферы описывается следующим выражением [4]:

$$b_{air} = (0,89 - 0,2 \cdot 10^{-0,05 P_w}). \quad (7)$$

Коэффициент конвективного теплообмена для подстилающей поверхности без снежного покрова ($h_{\text{сн}} = 0$) [5]

$$\alpha = 0,93\sqrt{U}(6 + 6,2U^{-2}), \quad (8)$$

при наличии снежного покрова ($h_{\text{сн}} > 0$) [6]

$$\alpha = 6,16 + 4,19U. \quad (9)$$

Теплопроводность снега рассчитывается по формуле Б. В. Проскуракова [7]

$$\lambda_{\text{сн}} = 0,018 + 8,7 \cdot 10^{-4} \rho_{\text{сн}}, \quad (10)$$

где $\lambda_{\text{сн}}$ — коэффициент теплопроводности снежного покрова, Вт·м⁻¹·К⁻¹.

На остальных границах задаются граничные условия типа «гидроизоляция» и «теплоизоляция».

Полная система дифференциальных уравнений математической модели приведена в работе авторов [8]. Она описывает диффузионно-конвективное перемещение воды и растворенных солей в зонах частичного и полного насыщения пор при температурах выше и ниже точки замерзания, учитывает кристаллизацию льда через фазу метастабильных состояний и состоит из пяти дифференциальных уравнений, которые решаются относительно следующих неизвестных величин: температуры T (К), ψ_w , содержания льда в единице объема грунта γ_l (кг/м³), ω_s и содержания нерастворенной соли в единице объема грунта $\gamma_{\text{нс}}$ (кг/м³). Капиллярно-сорбционный потенциал ψ_w пересчитывается в содержание воды в грунте по зависимости, рекомендованной И. Л. Калюжным [9]

$$\psi_w = \psi_{\text{вз}} (\gamma_{\text{вз}} / \gamma_w)^\eta; \quad (11)$$

$$\eta = \log_{(\gamma_{\text{вз}} / \gamma_{\text{нв}})} (\psi_{\text{нв}} / \psi_{\text{вз}}), \quad (12)$$

где γ_w — содержание воды в единице объема грунта, кг/м³; $\gamma_{\text{вз}}$ — содержание воды в грунте при потенциале завядания $\psi_{\text{вз}}$, кг/м³; $\gamma_{\text{нв}}$ — содержание воды в грунте при потенциале наименьшей влагоемкости $\psi_{\text{нв}}$, кг/м³; $\psi_{\text{вз}}$ — потенциал завядания $\psi_w \approx -1500$ Дж/кг; $\psi_{\text{нв}}$ — потенциал наименьшей влагоемкости $\psi_w \approx -33$ Дж/кг; η — степень функции капиллярно-сорбционного потенциала, б.р.

В качестве грунта основания траншеи принят полностью водонасыщенный незасоленный суглинок с характеристиками, приведенными в таблице 1 ($\rho_{\text{ск}}$ — плотность скелета грунта, кг/м³; $\rho_{\text{т.ч.}}$ — плотность твердых частиц грунта, кг/м³; $c_{\text{ск}}$ — изобарная теплоемкость скелета грунта, Дж·кг⁻¹·К⁻¹; τ_{fr} , τ_{th} — параметры релаксации при кристаллизации и плавлении льда, соответственно, Дж·с·м³·кг⁻²; $\omega_s^{\text{ест}}$ — массовая концентрация соли в грунтовом растворе в естественном состоянии, д.ед; $\lambda_{\text{р0}}$ — коэффициент фильтрации, м/с).

Таблица 1

Тепло-влажностные и физико-механические характеристики пучинистого грунта

$\rho_{\text{ск}}$	$\rho_{\text{т.ч.}}$	$c_{\text{ск}}$	τ_{fr}	τ_{th}	$\omega_s^{\text{ест}}$	$\lambda_{\text{р0}}$	η	$\gamma_{\text{вз}} / \gamma_w^{\text{max}}$
1450	2700	950	10 ⁴	1,00	0,00	10 ⁻⁷	5,00	0,26

Для параметра релаксации при кристаллизации льда значение соответствует среднему из диапазона возможных значений $\tau_{\text{fr}} \approx 10^3 - 10^5$ Дж·с·м³·кг⁻². Для процесса таяния льда запаздывание почти не фиксируется [10]. Значения изобарной

теплоемкости скелета грунта c_{sk} и теплопроводности грунта соответствуют рекомендациям СП 25.13330.2012 (приложение Б 6)¹ для среднестатистического суглинка Западной Сибири с плотностью частиц и скелета грунта по [11]. Параметры капиллярно-сорбционного потенциала и коэффициент фильтрации соответствуют чрезмерно пучинистому суглинку по результатам исследования в работе [8]. Климатические условия района соответствуют метеостанции Уренгой.

Поскольку грунт в подушке ниже уровня грунтовых вод вспучивается в основном за счет содержащейся в порах воды (то есть приток влаги к фронту промерзания в нем незначителен), расчетная схема для грунта подушки была упрощена, и коэффициент фильтрации в подушке был принят равным нулю $\lambda_{p0} = 0$. Тогда относительная деформация морозного пучения грунтовой подушки рассчитывается по формуле (13)

$$\varepsilon_{V,под} = \left(1 - \frac{\delta^2_{ск}}{\rho_{м.ч.}} \right) \left(\frac{\rho_w}{\rho_l} - 1 \right), \text{ при } T < T_{нз}, \quad (13)$$

где ρ_w, ρ_l — плотность воды и льда, кг/м³.

Температура на глубине нулевых годовых амплитуд принята $T_0 = 0,5$ °С. Для поддержания указанной температуры толщина снежного покрова по замерам на метеостанции Уренгой (замеры в лесном массиве) была уменьшена на 24 %, что не превышает 50 % и соответствует границам допустимых значений.

По результатам моделирования на этапе II было определено пространственное распределение относительной объемной деформации грунта от морозного пучения ε_V , д.ед.

На этапе III был выполнен расчет НДС грунтового массива для определения параметров силового взаимодействия трубопровода с грунтом с учетом подушки и расчетной величины ε_V , определенной на этапе II. Использована классическая теория упругости, обоснование возможности применения которой приведено в работе [12] и соответствует ВСН 29-85. Расчет был выполнен для двух случаев — незакрепленный трубопровод для определения его максимальных вертикальных перемещений H_{max} (м) и жесткая фиксация перемещений трубопровода для определения максимальных погонных усилий q_{fh}^{max} (Н/м) и коэффициента постели k_{fh} (Н/м²).

$$q_{fh}^{max} = \iint_S \tau_{zx} \cos(\vec{n}_{mp}, x) + \tau_{zy} \cos(\vec{n}_{mp}, y) + \sigma_{zz} \cos(\vec{n}_{mp}, z) dS \quad (14)$$

$$k_{fh} = q_{fh}^{max} / H_{max}, \quad (15)$$

где σ, τ — нормальные и касательные напряжения, Па; \vec{n}_{mp} — нормаль к поверхности трубопровода, интегрирование ведется по поверхности трубопровода dS .

Расчетная схема приведена на рисунке 2 (u — перемещение точек грунта, м; u_{mp} — перемещение поверхности трубопровода, м; $\sigma_{n,тр}, \tau_{n,тр}$ — нормальные и касательные напряжения на поверхности трубопровода, Па).

Модуль деформации $E_{тр}$ (Па), коэффициент поперечной деформации пучинистого грунта ν_{zp} (д.ед.) и коэффициент поперечной деформации грунта подушки $\nu_{под}$ (д.ед.) приняты в пределах ожидаемых значений одновременно талых и мерзлых грунтов Западной Сибири (СП 22.13330.2011)² [11, 13]. Модуль деформации грунта подушки $E_{под}$ (Па) при исследовании изменялся в широком диапазоне (табл. 2).

¹ СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. – Введ. 2013-01-01. – М., 2012. – 118 с.

² СП 22.13330.2011 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. – Введ. 2011-05-20. – М., 2011. – 162 с.

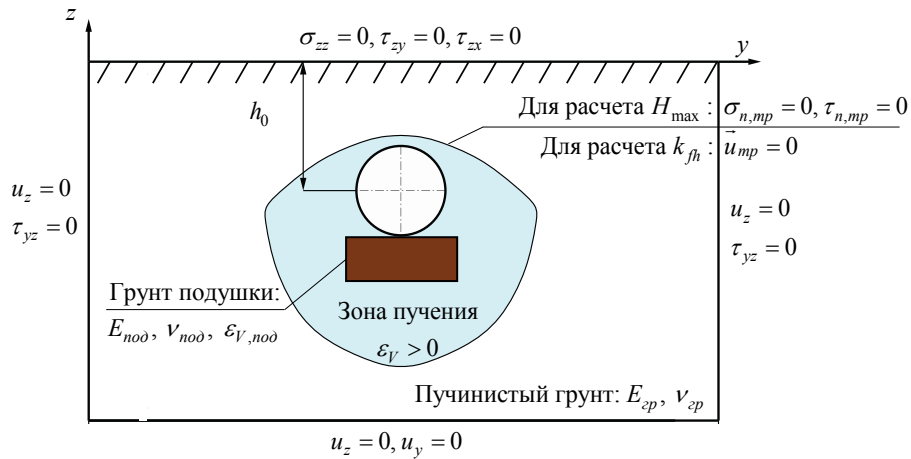


Рис. 2. Расчетная схема для определения параметров силового взаимодействия трубопровода и пучинистого грунта: H_{max} и k_{fh}

Таблица 2

Физико-механические характеристики пучинистого грунта и грунта подушки

$E_{сп}$	$\nu_{сп}$	$E_{под}$	$\nu_{под}$
$10^7, 2 \cdot 10^7$	0,35	$[3 \cdot 10^6; 6 \cdot 10^7]$	0,35

На этапе IV был выполнен расчет НДС трубопровода по расчетной схеме на рисунке 3 ($q_{гр}$ — отпор непучинистого грунта, Н/м; q_{fh} — отпор грунта перемещениям трубопровода на участке пучения, Н/м; w — вертикальные перемещения трубопровода, м; N — продольное растягивающее усилие, Н; L — длина прилегающих участков непучинистого грунта, м; L_{fh} — длина участка пучения, м; M_y — изгибающий момент, Н·м).

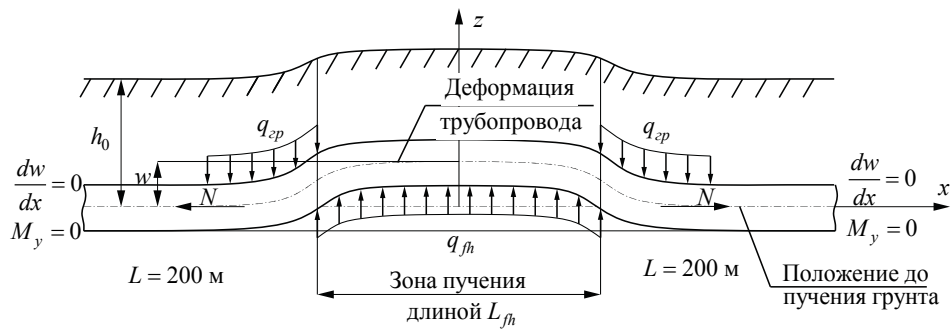


Рис. 3. Расчетная схема для определения НДС трубопровода на участке пучинистого грунта

На участке пучения для моделирования грунта применяются выражение (16) и результаты расчета из этапа III.

$$q_{fh} = k_{fh} (H_{max} - w) . \quad (16)$$

Отпор непучинистых грунтов, прилегающих к участку пучения $q_{гр}$, рассчитывается по методике А. Б. Айбиндера. Результатом этапа IV являются эквивалент-

ные напряжения $\sigma_{экв}$ (Па) в стенке трубопровода, определенные по СП 36.13330.2012³.

Принятые в расчетах физико-механические характеристики непучинистого грунта на участках трубопровода, прилегающих к пучинистому грунту, приведены в таблице 3 ($E_{зас}$, $E_{осн}$ — модуль деформации грунта засыпки и основания, Па; $\nu_{зас}$, $\nu_{осн}$ — коэффициент поперечной деформации грунта засыпки и основания, д.ед.; $\eta_{зас}$ — коэффициент понижения модуля деформации грунта засыпки с нарушенной структурой по сравнению с грунтом основания, д.ед.; $\rho_{зас}$, $\rho_{осн}$ — плотность грунта засыпки и основания, кг/м³; $c_{зас}$, $c_{осн}$ — сцепление грунта засыпки и основания, Па; $\varphi_{зас}$, $\varphi_{осн}$ — угол внутреннего трения грунта засыпки и основания, град.; L_{fn} — длина участка пучения, м) и соответствуют среднестатистическим глинистым грунтам [11] и обратной засыпке трубопровода местным грунтом, согласно схеме строительно-монтажных работ.

Таблица 3

Принятые в расчетах грунтовые условия на прилегающих участках непучинистых грунтов

$E_{зас} = E_{осн}$	$\nu_{зас} = \nu_{осн}$	$\eta_{зас}$	$\rho_{зас} = \rho_{осн}$	$c_{зас} = c_{осн}$	$\varphi_{зас} = \varphi_{осн}$	L_{fn}
10^7	0,35	0,3	2000	$2 \cdot 10^4$	16	3

Эксплуатационные характеристики трубопровода, принятые в расчетах, приведены в таблице 4 (D_{out} — наружный диаметр трубопровода, м; D_{in} — внутренний диаметр трубопровода, м; E_{st} — модуль упругости стали, Па; ν_{st} — коэффициент Пуассона стали, д.ед.; α_{st} — коэффициент температурного линейного удлинения стали, 1/°C; ρ_{st} — плотность стали, кг/м³; $\lambda_{ППУ}$ — коэффициент теплопроводности пенополиуретана (ППУ), Вт м⁻¹·К⁻¹; $\delta_{ППУ}$ — толщина стенки кольцевой теплоизоляции из ППУ, мм; ΔT — температурный перепад при эксплуатации, °C; T_{pr} — температура транспортируемого продукта, °C; P_{in} — внутреннее давление в трубопроводе, Па; ρ_{prod} — плотность перекачиваемого продукта, кг/м³; R_1^H , R_2^H — нормативные пределы прочности и текучести стали; m , k_1 , k_2 , k_n — коэффициенты запаса по СП 36.13330.2012⁴; \bar{R} — расчетное сопротивление стали, Па).

Таблица 4

Принятые в расчете характеристики магистрального конденсатопровода

D_{out}	D_{in}	E_{st}	ν_{st}	α_{st}	ρ_{st}	$\delta_{ППУ}$	$\lambda_{ППУ}$	T_{pr}	ΔT
0,53	0,5158	$2,06 \cdot 10^{11}$	0,3	$12 \cdot 10^{-6}$	7850	80	0,03	-6,5	30
ρ_{prod}	R_1^H	R_2^H	h_0	P_{in}	\bar{R}	m	k_1	k_2	k_n
750	$630 \cdot 10^6$	$530 \cdot 10^6$	1,465	$6,3 \cdot 10^6$	$371 \cdot 10^6$	0,99	1,40	1,20	1,10

Таким образом, на данном этапе нами была разработана методика расчета НДС трубопровода на участках пучинистых грунтов с учетом особенностей формирования их температурно-влажностного режима и НДС.

Оценка изменения НДС трубопровода от заданных параметров грунтовой подушки для защиты от морозного пучения грунта

К параметрам грунтовой подушки относятся ее геометрические размеры и деформационные свойства. Задача поставлена таким образом, чтобы определить оп-

³ СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*. — Введ. 2013-07-01. — М., 2012. — 92 с.

⁴ СП 36.13330.2012. — С. 37.

тимальные размеры грунтовой подушки, приводящие к минимальной площади ее поперечного сечения, то есть к минимальному расходу непучинистого грунта подушки.

В процессе численного исследования грунтовой подушки с различными размерами установлен способ определения оптимальных размеров грунтовой подушки (рис. 4). Оптимальному размеру соответствует обеспечение допустимого напряженного состояния при минимальной площади, то есть крайняя левая точка изолинии $\bar{R} = 371$ МПа.

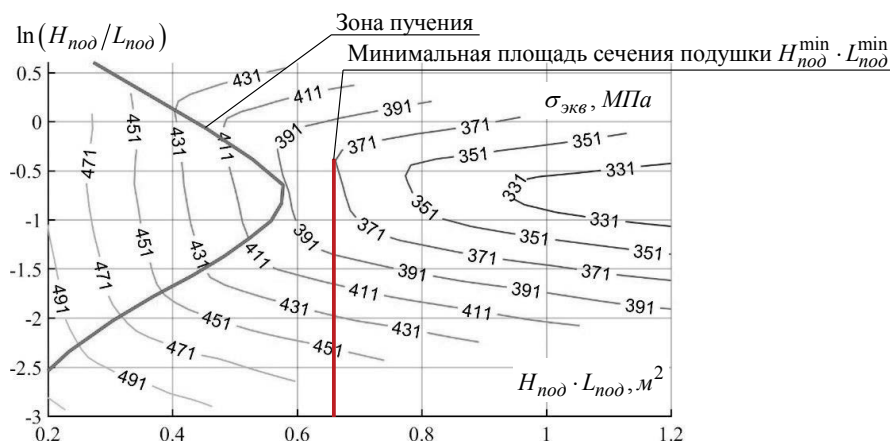


Рис. 4. Зависимость максимальных напряжений от соотношения размеров и площади грунтовой подушки с модулем деформации $E_{под} = 10$ МПа (местный грунт)

Аналогичное исследование было выполнено нами при различных соотношениях модуля деформации пучинистого грунта основания и грунта подушки (см. табл. 2). Результаты приведены на рисунках 5 и 6.

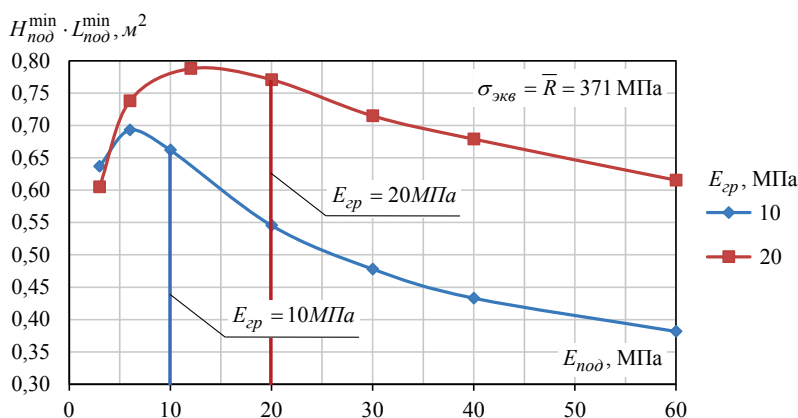


Рис. 5. Зависимость минимальной площади грунтовой подушки $H_{под}^{min} \cdot L_{под}^{min}$ от модуля деформации грунта $E_{сп}$ и грунтовой подушки $E_{под}$ при эквивалентных напряжениях в трубопроводе: $\sigma_{экв} = \bar{R} = 371$ МПа

Результаты анализа графической зависимости (см. рис. 5) позволили установить способ определения оптимального модуля деформации грунтовой

подушки. При соотношении модуля деформации грунта основания и грунта подушки $E_{nod}/E_{zp} = 0,6$ наблюдается максимум расхода непучинистого грунта подушки. Таким образом, соотношение $E_{nod}/E_{zp} = 0,6$ является наименее благоприятным с точки зрения экономии непучинистого грунта подушки: перерасход достигает величин от 30 до 85 % в зависимости от модуля деформации грунта основания. Существенной экономии непучинистого грунта подушки можно добиться при использовании грунтов с модулем деформации в следующем интервале: $E_{nod}/E_{гр} \in (0; 0,25] \cup [2; \infty)$.

При невозможности подвезти грунт с рекомендованными деформационными свойствами из ближайшего карьера возможно устройство гидроизолированной грунтовой подушки из местного пучинистого грунта с предварительной подготовкой его по авторской технологии. Для этого подошву слоя грунтовой подушки перекрывают полиэтиленовой мембраной. Затем укладывают объемную георешетку с высотой ячеек 200–250 мм, заполняют ячейки местным пучинистым грунтом из отвала с помощью экскаватора или бульдозера и перекрывают кровлю вторым слоем полиэтиленовой мембраны. Местный грунт, окруженный со всех сторон водонепроницаемым полиэтиленом, приобретает свойства, сопоставимые по пучинистости с привозным непучинистым крупнозернистым песком. Такой подход хоть и приводит к увеличению размера грунтовой подушки, однако позволяет экономить на подвозе песка из удаленного карьера. Окончательный выбор технологии сооружения грунтовой подушки обосновывается экономическим расчетом.

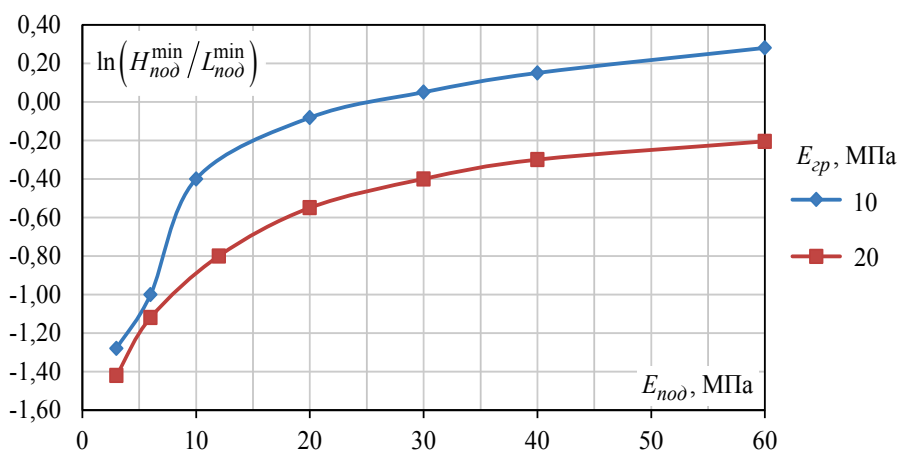


Рис. 6. Отношение высоты и ширины подушки $\ln(H_{nod}^{\min} / L_{nod}^{\min})$ при ее минимальной площади $H_{nod}^{\min} \cdot L_{nod}^{\min}$ от модуля деформации грунта E_{zp} и грунтовой подушки E_{nod} при эквивалентных напряжениях в трубопроводе: $\sigma_{экс} = \bar{R} = 371 \text{ МПа}$

По соотношению между высотой и шириной подушки H_{nod}/L_{nod} (см. рис. 6) установлено, что жесткая и мягкая подушки обладают различными демпфирующими свойствами. Жесткая подушка хорошо защищает от поперечных деформаций в вертикальном направлении, вызванных боковым давлением расширяющегося пучинистого грунта. Мягкая подушка, наоборот, хорошо защищает от пучения грунта снизу, но при этом не способна защитить от поперечных деформаций в вертикальном направлении, вызванных боковым давлением. Следовательно, геометрические размеры грунтовых подушек не являются постоянными и подлежат опти-

мизации на этапах проектирования объекта для максимальной защиты от воздействия морозного пучения.

Результаты исследования и предлагаемая методика позволяют на практике обеспечить требуемую инженерную защиту трубопровода от воздействия морозного пучения грунта с учетом имеющихся в наличии производственных и материальных ресурсов и рекомендованы авторами к применению при проектировании подземных магистральных трубопроводов в сложных геокриологических условиях.

Выводы

- Разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния трубопровода на участках пучинистых грунтов, учитывающая климат района, диффузионно-конвективное перемещение воды и растворенных солей в зонах частичного и полного насыщения пор при температурах выше и ниже точки замерзания, кристаллизацию льда через фазу метастабильных состояний и напряженно-деформированное состояние грунта.

- Установлена зависимость изменения НДС трубопровода от заданных геометрических и деформационных свойств сооружаемой грунтовой подушки на примере действующего магистрального конденсаторпровода «Ямбург — Уренгой». По результатам анализа полученной зависимости определены пределы значений модуля деформации грунта подушки, устанавливаемые в зависимости от значений модуля деформации грунта основания, и геометрические размеры (ширина и толщина).

- Разработан инженерный способ определения требований к геометрическим параметрам и деформационным свойствам грунтовых подушек, достаточных для обеспечения требуемых условий по защите трубопровода от морозного пучения грунтов.

Библиографический список

1. Исследование процесса формирования эксплуатационного положения протяженных участков МГ Уренгой — Челябинск в сложных гидрогеологических условиях / М. Ю. Карнаухов [и др.] // Газовая промышленность. – 2015. № 5 (724). – С. 53–58.
2. Королёв В. А., Блудушкина Л. Б. Взаимосвязь потенциала влаги в грунтах с параметрами испарения из них воды // Инженерная геология. – 2015. – № 3. – С. 22–33.
3. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 752 с.
4. Энергия, природа и климат / В. В. Клименко [и др.]. – М.: Издательский дом МЭИ, 1997. – 214 с.
5. Павлов А. В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. – Якутск: Кн. изд-во, 1975. – 304 с.
6. Справочник по строительству на вечномерзлых грунтах / Под ред. Ю. Я. Велли, В. И. Докучаева, Н. Ф. Федорова. – Л.: Стройиздат, 1977. – 552 с.
7. Основы геокриологии. Часть 4. Динамическая геокриология / Под ред. Э. Д. Ершова. – М.: МГУ, 2001. – 688 с.
8. Марков Е. В., Пульников С. А. Теоретическое исследование методов инженерной защиты подземных трубопроводов от морозного пучения на участках прерывистого распространения многолетнемерзлых грунтов // Газовая промышленность. – 2018. – № 5. – С. 70–77.
9. Калужный И. Л., Лавров С. А. Гидрофизические процессы на водосборе: Экспериментальные исследования и моделирование: моногр. – СПб.: Нестор-История, 2012. – 616 с.
10. Даниэлян Ю. С., Яницкий П. А. Особенности неравновесного перераспределения влаги при промерзании-оттаивании дисперсных пород // Инженерно-физический журнал. – 1983. – Т. 44, № 1. – С. 91–98.
11. Иванов И. А., Кушнир С. Я. Магистральные трубопроводы в районах глубокого сезонного промерзания пучинистых грунтов. – СПб.: Недра, 2010. – 174 с.
12. Markov E. V., Pulnikov S. A., Sysoev Yu. S., S Mathematical Model for Frost Heaving Normal Force Calculation // International Journal of Applied Engineering Research. – 2018. – Vol.13, Issue 1. – P. 612–616.
13. Роман Л. Т., Котов П. И., Царапов М. Н. Модуль деформации мерзлых грунтов при компрессионных испытаниях // Основания, фундаменты, механика грунтов. – 2016. – № 5. – С. 35–40.

Сведения об авторе

Марков Евгений Викторович, аспирант кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89068231447, e-mail: markov.ev@mail.ru

Information about the author

Markov E. V., Postgraduate at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen, phone: 89068231447, e-mail: markov.ev@mail.ru