

УДК 622.692.4

Модель деятельного слоя многолетнемерзлых пород с морозобойными трещинами и усовершенствование методики расчёта напряженно-деформированного состояния грунтовых оснований

А.А. Худякова, М.Г. Губайдуллин, А.В. Конюхов

Северный (Арктический) федеральный университет, Институт нефти и газа, кафедра транспорта и хранения нефти и газа, г. Архангельск

Аннотация. На основе предложенной новой модели деятельного слоя многолетнемерзлых пород усовершенствована методика расчёта напряженно-деформированного состояния промерзающих-оттаивающих оснований. Она учитывает влияние морозобойных трещин, вертикальных и горизонтальных составляющих теплообмена, что позволяет повысить достоверность результатов расчетов, надёжность, продолжительность эксплуатации надземных трубопроводов в северных регионах и позволяет более широко применять поверхностные фундаменты.

Abstract. On the basis of the offered new model of active layer permafrost the technique of calculation of intense-deformed condition of the freezing through-thawing bases has been advanced. It considers influence of cracks with ice, vertical and horizontal components of heat and mass exchange that allows to increase reliability of results of calculations, reliability, duration of elevated pipelines operation in the northern regions and allows to apply the superficial bases more widely.

Ключевые слова: многолетнемерзлый, морозобойные трещины, модель деятельного слоя, расчёт напряженно-деформированного состояния грунтовых оснований, надземный трубопровод, фундамент поверхностного типа

Key words: permafrost, cracks with ice, model of active layer, calculation of intense-deformed condition of soil bases, elevated oil pipeline, base of superficial type

1. Постановка задачи

Темп нефтегазового освоения северных регионов России существенно зависит от сроков возведения, эксплуатации трубопроводных систем. Трубопроводное строительство в Заполярье, и в частности в Ненецком автономном округе (НАО), в условиях повсеместного распространения многолетнемерзлых пород (ММП), избыточной обводненности, засоленности грунтов на побережье Баренцева моря, ранимости тундровых земель от техногенных воздействий характеризуется значительными затратами.

В НАО с учётом мерзлотно-грунтовых условий территории основная часть нефтегазопромысловых сооружений возводится на заглублённых фундаментах – бурозабивных и буроопускных сваях. Их применение часто приводит к сверхнормативным вертикальным и горизонтальным деформациям, осложнениям при эксплуатации сооружений (Винокуров и др., 2008), что обуславливает дополнительные затраты на ремонт и ликвидацию аварийных ситуаций. Фундаменты поверхностного типа (плитные) в НАО применяются в ограниченном количестве из-за недостаточной разработанности и адаптированности модели деятельного слоя, теории и методики расчетов оснований к условиям развития ММП. В связи с этим представляется актуальным усовершенствование методики расчёта напряженно-деформированного состояния (НДС) промерзающих-оттаивающих грунтовых оснований, устойчивости фундаментов и трубопроводов на ММП с учетом состояния и изменений геокриологической среды с морозобойными трещинами на контакте с фундаментами и нефтепроводами применительно к природно-климатическим условиям НАО.

2. Модель деятельного слоя ММП с морозобойными трещинами, учитывающая наличие горизонтальных и вертикальных составляющих теплообмена

Геокриологическими исследованиями С.Е. Гречищева, Л.В. Чистотинова, Р.П. Петровой, С.Е. Мельникова и др. установлено, что под воздействием фазовых превращений влаги в покровных отложениях при высоком положении уровня грунтовых вод (УГВ) формируются морозобойные трещины. Однако с позиций влияния на водный и тепловой режимы и физико-механические свойства деятельного слоя ММП морозобойные трещины до настоящего времени не изучались.

Ниже приведены результаты геокриологических изысканий, проведённых в НАО на трассе нефтепровода Харьяга – Южное Хыльчую, на НПС "Инзырей" и "Восточное Сарутаю". На указанных

объектах в 2007-2008 гг. изучались: геометрические размеры морозобойных трещин, процессы формирования в деятельном слое блочных структур, изменения водно-тепловых свойств покровных отложений и подстилаемых ММП. В плане трещины имели четырёхугольную и пятиугольную формы со сторонами 1,6...4,4 м при ширине раскрытия на поверхности 0,05...0,35 м. Глубина смыкания трещин соответствовала границам максимального оттаивания грунтов (0,5...2,1 м) или положению верхней плоскости подстилаемых слитых ММП. Наличие грунтовых блоков, разобшённых между собой трещинами (рис. 1), является определяющим фактором для оценки исходного и прогнозного состояний термовлажностного режима, физико-механических свойств покровных отложений.

Предлагаемая модель деятельного слоя ММП позволяет прогнозировать изменения капиллярной (вертикальной) и гидрологической (горизонтальной) составляющих водного режима грунтов на осваиваемых участках. Так, например, по данным наблюдений на площадке, имеющей морозобойные трещины шириной 0,25 м, глубиной 1,2 м, протяжённостью сторон в плане 2,4 м, было установлено следующее. Объём капиллярной влаги в одном грунтовом блоке, имеющем в плане размеры 2,4×2,4 м, УГВ = 1,2 м и осреднённую по высоте объёмную влажность $\hat{w} = 0,22$, к концу весеннего периода составлял 1,2 м³. Содержание воды в трещинах в этот период было наибольшим – 1,44 м³. В межлетний период года объём воды в трещинах составлял 30 % от максимального, в осенний период – 70 % от значений весеннего паводка. Объём капиллярной влаги внутри блоков был практически неизменным в течение всего периода. Содержание влаги (льда) в трещинах зависит от размеров трещин и положения УГВ в годовом режиме, а в разобшённых блоках – от атмосферных осадков, положения УГВ и объёма капиллярной влаги. Водный режим в блоках можно прогнозировать относительно УГВ экспоненциальными зависимостями.

Наличие в деятельном слое блоков, разобшённых между собой трещинами, существенно отражается на формировании вертикальных и горизонтальных составляющих теплопереноса в грунтовых разрезах, фазовых превращений влаги в трещинах и грунтовых блоках. Наблюдениями за промерзанием-оттаиванием деятельного слоя было установлено превышение значений осадков (на 25...35 %) при оттаивании грунтов в разобшённых трещинами блоках в сравнении с деформациями их пучения. Это вызвано одновременными процессами миграции влаги из блоков к верхней границе промерзания и горизонтального оттока влаги из блоков в промерзающие трещины.

Приведенные выше данные подтверждают, что при определении НДС грунтовых оснований с морозобойными трещинами необходимо учитывать наличие вертикальных и горизонтальных составляющих теплообмена как непосредственно в грунтовых блоках, так и в морозобойных трещинах. Результаты проведённых изысканий позволяют повысить достоверность оценок исходных данных, прогноза изменений геокриологического состояния среды на контакте с сооружениями, получить данные для расчётов НДС грунтовых оснований, устойчивости нефтепроводов и других объектов на Крайнем Севере.

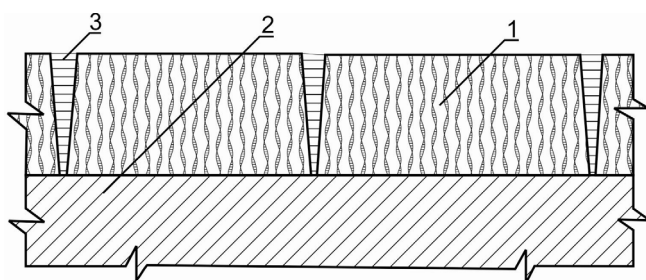


Рис. 1. Модель структуры деятельного слоя ММП с морозобойными трещинами

- 1 – грунтовые блоки, разобшённые морозобойными трещинами;
- 2 – водонепроницаемый подстилающий слой, верхняя граница которого соответствует глубине промерзания-оттаивания грунтов;
- 3 – морозобойные трещины, заполненные водой или льдом

3. Совершенствование методики расчёта напряженно-деформированного состояния промерзающих-оттаивающих грунтовых оснований, устойчивости фундаментов и нефтепроводов на ММП

В расчётах НДС талых и мёрзлых грунтовых оснований под сооружениями наиболее часто используют теорию линейно-деформируемых сред, позволяющую определять перемещения U_i точек в упругой среде грунтового полупространства, ограниченного плоскостью (x, y) , на которую действует сила $P(x, y)$. Тогда для силы

$$\vec{P} = \vec{F} \cdot \delta(x) \cdot \delta(y),$$

где δ – функция Дирака; F – сила, действующая на фундамент; с учётом работы Е.Ф. Винокурова можно получить численные значения перемещений U_x, U_y, U_z .

Ниже приведены результаты сравнения расчётных значений деформаций талых и мёрзлых грунтов в основании плитного фундамента, выполненные по теории линейно-деформируемых сред, с фактическими осадками плитного фундамента. Использование плитных фундаментов на деформируемых

засоленных грунтах позволяет снизить стоимость строительства до 32 %, повысить надежность эксплуатации нефтепроводов за счет возможности обеспечения горизонтальных перемещений и компенсации вертикальных подвижек (Худякова, 2010).

Расчёты деформаций неоднородных по глубине грунтов проводились из условий решения плоской задачи взаимодействия грунтового полупространства с пластинкой (шириной 0,9 м, длиной 10 м), на которую действует сила 123 кН/м. Изменения физико-механических свойств геологической среды в течение года учитывались соответствующими корректировками упругих констант грунта. Осадка плитного фундамента в натуральных условиях была определена в ходе наблюдений за его перемещениями в процессе бурения скважины № 21 на Восточно-Сарутаюском месторождении НАО. Фактическая осадка оттаивающих грунтов в основании поверхностного фундамента составила 0,28 м и в 7 раз превысила расчётное значение. Такое несоответствие результатов объясняется тем, что НДС деформируемых грунтов под подошвой мелко заглублённых или плитных фундаментов нельзя рассчитывать по теории, не учитывающей нелинейную зависимость между напряжениями и деформациями, явления консолидации и вязкости деформируемых при промерзании-оттаивании грунтов деятельного слоя.

Полученные результаты подтвердили необходимость применения для решения подобных задач вязкопластической теории. Для определения НДС сильно деформируемых грунтов деятельного слоя под фундаментами были использованы следующие уравнения Пыжина:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2\mu} \dot{S}_{ij} + \frac{1-2\nu}{E} \dot{S} \delta_{ij} + \gamma \left\langle \Phi \left[\frac{\alpha J_1^1 + J_2^{1/2}}{k} - 1 \right] \right\rangle \left(\alpha \delta_{ij} + \frac{S_{ij}}{2J_2^{1/2}} \right), \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ii} = \frac{1-2\nu}{E} \dot{S} + 3\alpha\gamma \left\langle \Phi \left[\frac{\alpha J_1^1 + J_2^{1/2}}{k} - 1 \right] \right\rangle; \quad S_{ij} = \delta_{ij} - S \delta_{ij}, \quad (2)$$

где J_1^1 – первый инвариант тензора напряжений; $J_2^{1/2}$ – второй инвариант девиатора напряжений; μ – упругий модуль сдвига; γ – постоянная вязкости; k – предел текучести при простом сдвиге; α – постоянная величина, характеризующая скорость объёмного расширения грунта; δ_{ij} – символ Кронекера, $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$ и $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$. Функция $\Phi(F)$ определяется по результатам испытаний грунтов на динамические воздействия.

Уравнение (2) удовлетворительно описывает скорость объёмных деформаций грунтового полупространства. Постулируя определённую зависимость между вторым инвариантом тензора скорости неупругой деформации и скоростью продвижения границы промерзания-оттаивания, используя решения теории линейно-деформируемой среды в качестве начальных условий, можно из уравнений (1) и (2) найти зависимость перемещений u_i точек основания во времени, определить площадь фундамента, в целом оценить устойчивость проектируемого сооружения. Результаты расчетов по вязкопластической теории не соответствовали деформациям грунтов под буровой установкой. Фактические осадки грунтов превышали расчётные значения более чем в 2,5 раза.

Совершенствование методики расчёта включало использование полученных данных по формированию морозобойных трещин, водного и теплового режимов в деятельном слое ММП. По методике с использованием известных теоретических положений определён радиус-вектор силы P в точке (x, y, z) грунта, составлен и реализован методами конечных элементов алгоритм определения НДС в грунтовых блоках с учетом наличия в них подвижной границы фазовых превращений влаги.

Расчет теплового режима в грунтовом блоке включал решение с учетом изменения физико-механических свойств основания двумерного уравнения теплопроводности. При двух переменных нестационарное уравнение теплопроводности можно представить в виде:

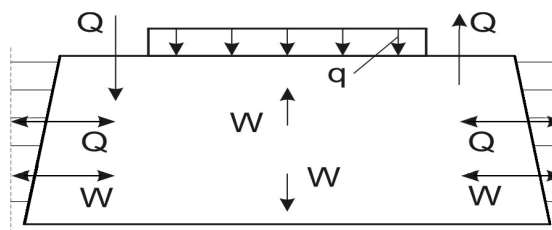
$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (3)$$

где $T = T(r, t)$ – температура в точке с радиус-вектором $r(x, y)$ в момент времени t ; $c(T)$ – коэффициент теплоемкости; $k(T)$ – коэффициент теплопроводности.

Поставленная задача была реализована численным методом с учетом переменных направлений тепловых Q и водных W потоков в грунтовом блоке, нагруженном усилием q (рис. 2).

Для нахождения численного решения уравнения (3) применительно к грунтовому блоку использовался метод контрольных объемов. Температура, теплофизические параметры породы рассчитывались в центрах объемов и принимались за характеристики всего объема. Предлагаемый подход позволил получить наиболее достоверные значения распределения тепловых потоков и НДС внутри грунтового блока под сооружениями. Реализация поставленной задачи была осуществлена с использованием данных инженерно-геологических изысканий. Результаты расчёта осадки фундамента при оттаивании грунтов в основании имели близкие к натурным значениям и равнялись соответственно 0,22 и 0,28 м.

Рис. 2. Схема расположения нагрузки, тепловых и водных потоков в грунтовом блоке



Для выполнения на основе теории вязкопластичности многочисленных расчётов НДС на неслитых ММП, расположенных под плитным фундаментом площадью 2,25 м², были использованы следующие исходные данные: глубина сезонного оттаивания пылеватых суглинков $H_{om} = 2,0$ м; диаметр нефтепровода изменялся в пределах от 273 до 500 мм; температура оттаивающего грунта $t_{нф}$ под подошвой фундамента изменялась от $-0,1$ °С до $+1,1$ °С, а в подстилающих ММП на глубине 4,0 м от дневной поверхности температура $t_{сп}$ изменялась от $-2,2$ °С до $-2,52$ °С; засоленность грунтов на глубине 4,0 м от дневной поверхности $Z_{сп}$ от 0 до 1,05 %, а в деятельном слое Z_o от 0 до 0,18 %; расчётные значения нагрузки от трубопровода P_{mp}^p включали массу фундамента, трубы и прокачиваемого флюида. В расчётах учитывалось, что трещины в плане имели четырёхугольную форму со сторонами блока 3,6 м, ширину раскрытия трещин 0,25 м, глубину 1,8 м. Результаты расчётов, приведенные в таблице, подтверждают существенную зависимость напряжений, деформаций оттаивающих грунтовых оснований с морозобойными трещинами от нагрузок, температур и засоленности грунтов. Следует отметить, что максимальные значения деформаций в оттаивающих грунтовых основаниях (151...172 мм) практически не отражались на устойчивости и надёжности эксплуатации пространственно гибких надземных трубопроводов. Аналогичные расчёты НДС грунтовых оснований под плитными фундаментами были проведены и на участках со слитыми ММП. Расчётные деформации в оттаивающих основаниях слитых ММП были на 5...7 % меньше значений, приведенных в таблице.

Предлагаемый усовершенствованный метод расчёта НДС грунтовых оснований под мелко заглублёнными и плитными фундаментами, учитывающий наличие в деятельном слое морозобойных трещин, сезонные изменения водно-теплого режима, физико-механические свойства грунтов, позволяет получать более достоверные показатели несущей способности оснований, устойчивости сооружений на деформируемых, засоленных ММП.

Таблица. Значения напряжений $\sigma_{сжс}$, кПа (числитель), деформаций ε , мм (знаменатель) оттаивающих, неслитых ММП под фундаментом

№ п/п	Характеристика разрезов, сложенных пылеватыми суглинками с показателем текучести J_l , равным 0,15	Расчётные значения напряжений в грунте*		
		Деформации грунта под фундаментом**		
		Расчётные нагрузки на фундамент, P_{mp}^p (тс)		
		1,25	2,42	5,92
1	$z_o = 0,0$ %, $z_{гп} = 0,0$ %, $t_{нф} = -0,1$ °С, $t_{гп} = -2,3$ °С	62,5* / 13,5**	115,7 / 22,9	272,3 / 46,6
2	$z_o = 0,1$ %, $z_{гп} = 0,5$ %, $t_{нф} = -0,3$ °С, $t_{гп} = -2,4$ °С	60,2 / 14,3	122,6 / 26,3	288,1 / 49,8
3	$z_o = 0,2$ %, $z_{гп} = 1,05$ %, $t_{нф} = -0,5$ °С, $t_{гп} = -2,7$ °С	58,3 / 15,9	138,3 / 29,8	296,2 / 52,2
4	$z_o = 0,0$ %, $z_{гп} = 0,0$ %, $t_{нф} = +0,5$ °С, $t_{гп} = -2,0$ °С	64,6 / 29,6	148,3 / 61,2	303,6 / 151,3
5	$z_o = 0,1$ %, $z_{гп} = 0,5$ %, $t_{нф} = +0,1$ °С, $t_{гп} = -2,2$ °С	61,8 / 37,1	156,7 / 65,7	312,1 / 160,2
6	$z_o = 0,2$ %, $z_{гп} = 1,05$ %, $t_{нф} = 0,0$ °С, $t_{гп} = -2,4$ °С	59,1 / 52,6	169,3 / 68,4	312,1 / 160,2
7	$z_o = 0,0$ %, $z_{гп} = 0,0$ %, $t_{нф} = +1,1$ °С, $t_{гп} = -2,4$ °С	66,8 / 59,8	156,7 / 102,3	312,3 / 162,8
8	$z_o = 0,1$ %, $z_{гп} = 0,5$ %, $t_{нф} = -0,1$ °С, $t_{гп} = -2,5$ °С	63,5 / 62,5	159,5 / 108,2	315,1 / 168,9
9	$z_o = 0,2$ %, $z_{гп} = 1,0$ %, $t_{нф} = +0,9$ °С, $t_{гп} = -2,5$ °С	61,2 / 69,5	162,7 / 113,6	319,8 / 172,4

Ниже приведен расчёт устойчивости надземного нефтепровода 720*12 мм, полностью заполненного сырой нефтью, оснащённого теплогидроизолированным покрытием толщиной 140 мм (рис. 3). Нефтепровод возведён на свайных (в местах расположения неподвижных опор) и плитных, имеющих возможность пространственных перемещений, фундаментах (1). Фундамент (1) выполнен из искусственно-упрочнённого грунта и оснащён опорной стойкой (3) и армирующими диафрагмами (4). Для проведения расчёта были использованы следующие сведения. Трубопровод расположен в зоне распространения слитых ММП. В составе расчётного сценария не учитывались силы смерзания его подошвы с грунтовым основанием в осенне-зимние периоды, удерживающие силы от свайных фундаментов и углов поворота по трассе трубопровода. Сценарий рассматривает возможность опрокидывания штормовыми порывами ветра надземного нефтепровода на тундровую поверхность.

Удельные нормативные ветровые нагрузки g^H в примере приняты для шестого климатического района и соответствуют: $g^H=73,0$ кгс/м² [84]. Расчётная площадь трубопровода $D^P=1,2$ м², воспринимающая ветровую нагрузку $F^P_{вм}$, определялась произведением диаметра надземного нефтепровода (5), имеющего теплогидроизоляционное (6) и гололедное в осенне-зимние периоды покрытие, на шаг расстановки опор фундаментов L по длине осваиваемой трассы. Шаг расстановки опор фундаментов по длине осваиваемой трассы L принят равным 12 м. Тогда $F^P_{вм}=1,2$ м × 12 м = 14,4 м². Следует отметить, что в расчёте на устойчивость трубопровода учитывалась и вертикальная площадь каждого из плитных фундаментов. Поверхностные фундаменты выполнены в виде трапеций, имеющих в плане размеры 2,2×1,1 м, 0,8×0,4 м, высоту 1,1 м. Площадь плитных фундаментов для расчета устойчивости трубопровода равна 0,825 м² ($F^P_{вф} = [(0,4+1,1)/2] \times 1,1$ м²).

Тогда суммарная площадь контакта надземного нефтепровода и плитного фундамента составит $\Sigma F^P_{вм} + F^P_{вф} = 14,4 + 0,825 = 15,225$ м². Проверка на устойчивость нефтепровода под ветровым напором включала определение опрокидывающего момента $M^H_{опр} = 73,0 \cdot 15,225 \cdot 1,8 = 2000,565$ кгс·м.

Можно рассчитать значение опрокидывающего момента

$$M^P_{оп} = M^H_{опр} \cdot m_{cm} \cdot m_{дин} = 2000,565 \cdot 1,1 \cdot 1,4 = 3080,87 \text{ кгс·м.}$$

Расчётное значение момента ($M^P_{уд}$), удерживающего надземный нефтепровод от опрокидывания (рис. 3), можно рассчитать по формуле:

$$M^P_{уд} = M^P_{нф} + M^P_{мп} + M^P_{н} + M^P_{ис}, \quad (4)$$

где $M^P_{нф}$ – удерживающий момент поверхностного фундамента; $M^P_{мп}$ – удерживающий момент стальной трубы; $M^P_{н}$ – удерживающий момент прокачиваемой нефти; $M^P_{ис}$ – удерживающий момент изоляционного слоя.

Расчётное значение удерживающих моментов зависит от веса соответствующих элементов

$$m^H_{эл} = V^H_{эл} \cdot v^H_{эл}, \quad (5)$$

где $V^H_{эл}$ – объём элемента; $v^H_{эл}$ – объёмный вес элемента.

Подставляя в выражение (5) соответствующие значения получим:

$$\begin{aligned} m^H_{нф} &= [(2,2+0,8)/2 \cdot (1,1+0,4)/2] \cdot 1,1 \cdot 1,6 = 1,98 \text{ тс;} \\ m^H_{мп} &= 0,2095 \cdot 12 = 2,514 \text{ тс;} \\ m^H_{н} &= 0,348 \cdot 12 = 4,176 \text{ тс;} \\ m^H_{ис} &= (3,14 \cdot 0,6^2 - 3,14 \cdot 0,36^2) \cdot 0,05 \cdot 12 = 0,4341 \text{ тс.} \end{aligned}$$

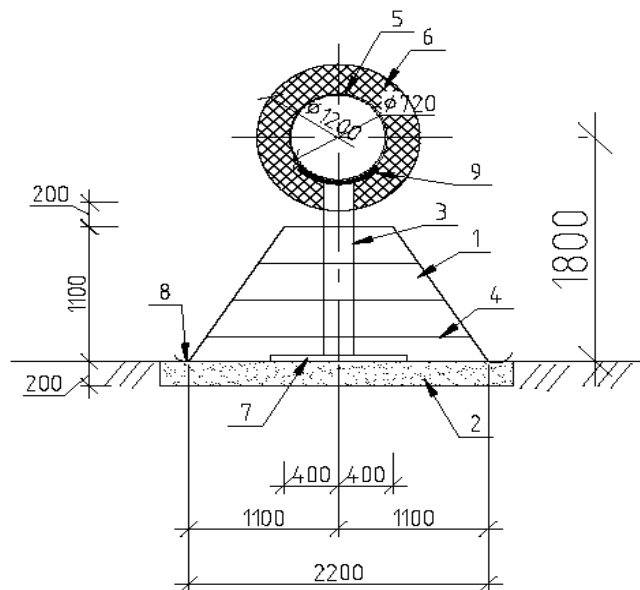
Расчетное значение удерживающего момента от опрокидывания надземного трубопровода на тундровый покров равно:

$$M^P_{уд} = M^H_{уд} \cdot k_3, \quad (6)$$

где k_3 – коэффициент запаса.

Рис. 3. Вертикальный разрез поверхностного фундамента для надземного нефтепровода

- 1 – поверхностного типа фундамент;
- 2 – песчано-гравийная подготовка;
- 3 – опорная стойка;
- 4 – армирующие диафрагмы;
- 5 – нефтепровод;
- 6 – теплогидроизоляционный слой;
- 7 – опорная плита стойки;
- 8 – стальной лист;
- 9 – опорная площадка трубы.



Суммарное максимальное значение удерживающего момента от опрокидывания надземного трубопровода на тундровый покров равно:

$$M_{yo}^{p, max} = [1,98+2,514+4,176+0,434] \cdot 1,1 \cdot 0,9 = 9,013 \text{ тс}\cdot\text{м.}$$

Суммарное минимальное значение удерживающего момента от опрокидывания надземного трубопровода на тундровый покров равно:

$$M_{yo}^{p, min} = [1,98+2,514+0,434] \cdot 1,1 \cdot 0,9 = 4,879 \text{ тс}\cdot\text{м.}$$

Следовательно, $M_{on}^p = 3,081 \text{ тс}\cdot\text{м} < M_{yo}^{p, min} = 4,879 \text{ тс}\cdot\text{м} < M_{yo}^{p, max} = 9,013 \text{ тс}\cdot\text{м.}$

Выполненный расчет подтверждает устойчивость поверхностных фундаментов в случаях воздействий на надземные нефтепроводы опрокидывающих усилий без использования на их трассах промежуточных свайных опор при сокращении числа компенсаторов. На деформируемых грунтах в качестве промежуточных опор для надземных трубопроводов следует применять поверхностные фундаменты с учётом возможностей их пространственных перемещений при сезонных вертикальных перемещениях поверхностных отложений, а также при температурных горизонтальных деформациях непосредственно надземных нефтепроводов. Целесообразность применения поверхностных фундаментов подтверждена и результатами экономического сравнения их стоимости с затратами на возведение свайных промежуточных подвижных опор. Расчёты показывают, что частичное (до 80 %) применение плитных фундаментов снижает стоимость строительства нефтепроводов более чем на 32 %.

4. Выводы

1. Наличие в покровных отложениях блоков, разобщённых между собой трещинами, существенно отражается на вертикальных и горизонтальных составляющих теплопереноса. Предложена модель деятельного слоя ММП, в котором процессы миграции влаги одновременно происходят внутри блоков не только в вертикальном, но и в горизонтальном направлении путем ее разгрузки в систему трещин.

2. Усовершенствована методика расчёта НДС промерзающих-оттаивающих оснований. Она учитывает влияние морозобойных трещин, вертикальных и горизонтальных составляющих теплообмена, что позволяет повысить достоверность результатов расчетов, надёжность, продолжительность эксплуатации трубопроводов в северных регионах и позволяет более широко применять поверхностные фундаменты.

3. В качестве подвижных опор надземных трубопроводов на деформируемых засоленных грунтах предлагается использовать плитные фундаменты, которые снижают стоимость строительства до 32 %, повышают надёжность эксплуатации нефтепроводов за счет возможности обеспечения горизонтальных перемещений и компенсации вертикальных подвижек. Выполненный расчет на устойчивость подтверждает возможность и целесообразность их применения в НАО.

Литература

- Винокуров Р.С., Колюхов А.В., Садриев Р.А.** Анализ результатов геокриологического мониторинга по трассе нефтепровода Южно-Шапкино-Харьяга. *Вестник АГТУ, серия Прикладная геоэкология, Архангельск*, вып. 75, с.117-124, 2008.
- Худякова А.А.** Совершенствование строительства нефтепроводов в северных регионах. *Автореферат дисс. ... канд. техн. наук, Уфа, ИИПЭР*, 24 с., 2010.