ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Материаловедение

УДК 551.345:536.421

DOI 10.31242/2618-9712-2018-25-3-114-120

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния трубопровода при пучении грунта

М.П. Лебедев, П.П. Пермяков, Дж.С. Иванов, Ю.А. Яковлев

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия

m.p.lebedev@prez.ysn.ru

Аннотация. Магистральные трубопроводы в районах многолетней мерзлоты подвергаются различным экзогенным процессам, например, морозному пучению. В работе математическим моделированием показаны величины морозного пучения различного типа. Численная реализация поставленной задачи процесса тепловлагоденноса осуществлена схемой с направленными разностями с учетом знака скорости инфильтрации грунтовой воды. Для вычислительного эксперимента исходные параметры по тепло- и влагоденносу в основании трубопровода определены применительно к природно-климатическим условиям Центральной Якутии. При наличии грунтовых вод происходят образования пучения инъекционного типа. Со временем морозное пучение инъекционного типа растет, что приводит к изменению значения коэффициента неравномерности. Показано, что в результате морозного пучения напряженное состояние трубопровода постепенно переходит в пластическую деформацию. С помощью уравнения сгиба трубопровода дана оценка напряженно-деформационного состояния трубопровода от величины миграционного пучения. Пучения связаны с многогодичным «сезонным расшатыванием», которые могут привести к малоцикловым усталостным разрушениям.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, протаивание–промерзание грунта, подземные воды, пучение, численный прогноз, напряженно-деформационное состояние трубопровода.

DOI 10.31242/2618-9712-2018-25-3-114-120

Numerical simulation of stress-strain state of pipeline under heaving of ground

M.P. Lebedev, P.P. Permyakov, J.S. Ivanov, Yu.A. Yakovlev

V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems SB RAS, Yakutsk, Russia

m.p.lebedev@prez.ysn.ru

Abstract. The main pipelines in permafrost areas are exposed to various exogenous processes, for example, frost heaving. In the work, values of frost heaving of various types are shown by mathematical modeling. Numerical realization of the problem of heat and moisture transfer process is carried out by a scheme with directed differences considering the sign of the speed of groundwater infiltration. For the computational experiment, initial parameters for heat and moisture transfer at a base of the pipeline are defined in relation to natural and climatic conditions of Central Yakutia. In the presence of groundwater,

the heaving of an injection type is formed. Over time, frost injection of the injection type increases, which leads to a change in the value of the coefficient of unevenness. It is shown that the stress state of the pipeline as a result of frost heaving gradually transforms into plastic deformation. With the help of the pipeline fold equation, the stress-deformed state of the pipeline is estimated from the amount of migration heaving. The heaves are associated with a multi-year «seasonal loosening», which can lead to low-cycle fatigue failures.

Key words: permafrost, thawing-freezing of soil, groundwater, heave, numerical forecast, stress-strain state of pipeline.

Введение

Магистральные трубопроводы (нефтепроводы ВСТО, газопроводы Сила Сибири и др.), проходя через участки с различными мерзлотными и геомеханическими характеристиками, подвергаются различным экзогенным мерзлотным процессам (пучению, просадке, термокарсту и др.) [1–3].

Экзогенные мерзлотные процессы прогрессируют при резком многогодичном циклическом изменении климата, водного и мерзлотного условия в неоднородных средах. При этом создаются негативные напряженно-деформационные состояния линейных сооружений, что является актуальной проблемой, и для их устранения требуются большие экономические затраты.

Целью данной работы в связи с вышесказанным является численное моделирование процесса морозного пучения и оценка его влияния на напряженно-деформационное состояние трубопровода.

Методы

Математическая модель пучения основана на предположении, что расширение объема грунта происходит по высоте (по направлению к поверхности грунта) вследствие увеличения порового вещества за счет перехода воды в лед, т.е. без возможности бокового расширения, как это принимается в задаче о компрессионном уплотнении грунтов.

Величину пучения, используя суммарную объемную влажность θ , можно описать следующим образом [4]:

$$S_1 = \int_0^l (\theta - n) dy, \quad (1)$$

где θ – объемная влажность грунта, в долях единицы; n – пористость грунта.

Параметр θ , входящий в формулу (1), определяется из решения системы совместных уравнений теплообмена. Исходный параметр n задается с учетом физико-механических свойств грунта. Суммарная объемная влажность θ выражается через весовую влажность следующим образом:

$$\theta = \frac{\rho_{ск} W}{\rho_l \rho_g} (\rho_l + (\rho_g - \rho_l) \cdot i(T)), \quad (2)$$

где $\rho_{ск}$, ρ_g , ρ_l – объемная плотность грунта, воды и льда, кг/м³; W – весовая влажность грунта, в долях единицы; $i(T)$ – функция льдистости от температуры.

Математическая модель с учетом процесса влагопереноса грунта описывается следующей системой уравнений [4, 5]:

$$c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - c_g \left(V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + L \frac{\partial W_g}{\partial \tau}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial W_g}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial W_g}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial W_g}{\partial y} \right) - \frac{\partial W_l}{\partial \tau}, \quad (4)$$

$$(x, y) \in \Omega, \quad \tau > 0, \quad \Omega = [0, R] * [0, l].$$

Система уравнений (3)–(4) замыкается уравнением количества незамерзшей воды:

$$W_{нг} = W_{нг}(T, W). \quad (5)$$

Область численного моделирования двумерная – вертикальный разрез грунта с координатами (x, y) .

На поверхности земли (верхней границе) может быть задано условие инфильтрации снеговой воды или испарения, в основании – граничное условие такого же типа. На левой и правой границах области задают условия непротекания.

На стенке трубопровода задается условие теплопроводности:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = Q(\tau). \quad (6)$$

Теплопередача через стенки трубы при вынужденном турбулентном движении транспор-

тируемого продукта описывается следующим образом:

$$Q(\tau) = \alpha(T_{np} - T), \quad (7)$$

где α – коэффициент теплоотдачи трубопровода определяется по формуле:

$$\alpha = Nu\lambda_{np} / D. \quad (8)$$

Здесь T – температура, K ; c , c_v – объемная теплоемкость грунта и воды, $Дж/(м^3 \cdot K)$; τ – время, $с$; $W = W_d + W_e$ – весовая суммарная влажность грунта (W_d – за счет льда, W_e – за счет незамерзшей воды); λ – теплопроводность грунта, $Вт/(м \cdot K)$; x , y – пространственные координаты, $м$; L – объемная теплота фазового перехода, $Дж/м^3$; $V = (V_x, V_y)$ – скорость фильтрации, $м/с$; k – коэффициент диффузии, $м^2/с$; R , l – ширина и глубина рассматриваемой области Ω , $м$; $\delta T / \delta n$ – производная по нормали n ; T_{np} – температура транспортируемого продукта, K ; Nu – число Нуссельта; λ_{np} – теплопроводность транспортируемого продукта, $Вт/(м \cdot K)$; D – наружный диаметр трубы, $м$.

Уравнение теплопроводности содержит конвективные слагаемые, которые могут быть представлены в нелинейной (неконсервативной) и дивергентной (консервативной) формах. При численном решении основное внимание уделяется вопросам аппроксимации конвективных слагаемых. Следует отметить, что на практике в схемах с направленными разностями широко применяются конвективные члены с учетом знака скорости фильтрации. Пучение промерзающих пород может происходить в условиях «открытой» (с подтоком влаги из водоносного горизонта) и «закрытой» (без подтока влаги извне) систем. Система уравнений (3)–(5) нелинейная и численная реализация осуществляется неявной разностной схемой с использованием итерации [5].

Результаты вычислительного эксперимента

Исходные параметры по тепло- и влагопереносу в основании трубопровода определены применительно к природно-климатическим условиям Центральной Якутии. Наружный диаметр трубопровода составляет 0,53 м, толщины стенок трубопровода – 0,008; 0,01; 0,014 м в зависимости от мерзлотно-гидрогеологических условий. Марка стали 09Г2С имеет характеристики: предел текучести 345 МПа; предел временного сопротивления 490 МПа; предел выносливости 235 МПа.

В качестве противокоррозионного покрытия трубопровода принято два слоя отечественных материалов «Полилен». Для защиты заизолиро-

ванного трубопровода от механических повреждений сделана сплошная футеровка деревянной антисептированной рейкой. Пропускная способность трубопровода – 528 млн. $м^3/год$, а расчетное рабочее давление – 5,5 МПа. На поверхности для теплопроводности задается граничное условие третьего рода с эффективным коэффициентом теплоотдачи, который учитывает растительный слой и толщину снежного покрова. Максимальная высота снежного покрова составляет 0,4 м. Среднемесячные температуры внешней среды и эффективный коэффициент теплоотдачи, испарение, данные по атмосферным осадкам взяты с поправками и показаниями осадкомера. Литология грунта и данные линейной части трубопровода подобраны с максимальным приближением к реальным данным инженерного изыскания.

Пучения миграционного типа, при изучении которых динамика «сезонного расшатывания» магистрального трубопровода и поверхности грунта приведена в работе [4]. Амплитуда сезонного колебания трубопровода равна 3,8 см, а поверхности грунта – 5 см. Пиковые значения расшатывания наблюдаются: в конце мая – максимальное, а в начале ноября – минимальное. Это вызвано тем, что в осенне-зимние месяцы (ноябрь–март) происходит промерзание деятельного слоя сверху, которое сопровождается миграцией поровой воды. Отрицательные зимние температуры зарождают кристаллы льда в свободной воде влажного грунта. Когда она вся перейдет в лед, под действием сил кристаллизации льда к нему притягивается сначала рыхлосвязанная, а затем какая-то часть пленочной воды. При этом на минеральных частицах, покрытых тонким слоем пленочной воды, возникает поверхностная нереализованная энергия, благодаря которой вода подтягивается к тонкой прочносвязанной пленке воды из нижерасположенного влажного грунта. Процесс передвижения пленочной и капиллярной воды к фронту промерзания принято называть миграцией влаги в процессе сезонного промерзания грунта. При этом величина пучения происходит за счет увеличения в объеме на 9 % замерзающей поровой влаги. Данный процесс играет основную роль в формировании морозного пучения. Величина пучения в течение зимы монотонно растет за счет миграции поровой влаги к фронту промерзания. В мае при поступлении снеговой воды наблюдается резкое увеличение объема (набухание) верхних слоев деятельного слоя. В летние месяцы (июнь–август), когда идет интенсивное испарение влаги, за счет высыхания верхних слоев грунта происходит усадка деятельного слоя. Следует отметить, что в Цен-

тральной Якутии в среднегодовом балансе испарение преобладает над осадками. Осенние дожди (сентябрь) останавливают процесс осадки от высыхания. Весь вышеуказанный процесс каждый год циклически повторяется.

Многогодичное сезонное промерзание и протаивание деятельного слоя связано с «расшатыванием» трубопровода, которые могут привести к малоцикловым усталостным разрушениям.

Пучения инъекционного типа могут образоваться при наличии грунтовых вод. Рассмотрим расчетную область с глубиной и шириной соответственно 16 м и 36 м. В правый нижний угол на глубине 16 м поступает грунтовая вода с положительной температурой 0,2 °С (открытая система, рис. 1). Сверху идет обычное циклическое сезонное промерзание и протаивание грунта с учетом атмосферных осадков и испарений. Наличие грунтовой воды имеет отопляющее влияние на температурный режим горного массива (рис. 1, а). Циклическое промерзание–протаивание с поверхности вызывает миграцию грунтовой воды, происходит образование инъекционного льда на глубине 10–13 м. Данный процесс в геокриологии известен как бугры пучения (булгунняхы – якутское название).

На рис. 2 приведена динамика пучения грунта по времени в левом и правом концах рассматриваемой области.

Величина пучения с течением времени растет и соответственно равна: 0,23 (через год), 0,58 (5 лет), 0,82 м (10 лет). Если его значения больше 0,5 м, то грунт относится к сильнопучиноопасным и неблагоприятно влияет на устойчивость трубопровода. Численное значение коэффициента неравномерности пучения влажных грунтов k_{np} (рис. 3) выражается следующей формулой:

$$k_{np} = \frac{h_{max} - h_{min}}{L_1},$$

где h_{max} , h_{min} – максимальная и минимальная величины пучения, м; L_1 – расчетное расстояние между точками максимального и минимального пучения, м.

Из рисунка видно, что с каждым годом коэффициент неравномерности пучения грунта монотонно растет. При объемной плотности грунта $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$ максимальное значение данного коэффициента неравномерности через 10 лет равно 0,0594 м/м при пористости $n = 0,38$. Рост коэффициента неравномерности негативно влияет на напряженно-деформационное состояние трубопровода. Вышеуказанный процесс в реальных условиях чаще встречается при переходе трубопровода водных преград [1–4].

Для оценки напряжений, возникающих в трубопроводе при морозном пучении, рассмотрена следующая модель: полубесконечная труба лежит на талом грунте, начало трубы приподнято на некоторую высоту и зашпелено мерзлым грунтом. Труба лежит горизонтально и продольные напряжения не учитываются. Сверху давит грунт и собственный вес трубы p на единицу длины, Па·м, снизу – реакция грунта q .

Для оценки реакции грунта q воспользуемся моделью Фусса-Винклера [6], широко применяемой в проектировании фундаментов строений, согласно которой реакция грунта q прямо пропорциональна глубине продавливания грунта под нагрузкой:

$$q = cDy, \quad (9)$$

где c – коэффициент постели, зависит от свойств грунта, Па/м; D – ширина (диаметр трубы), по которой конструкция опирается на грунт, м; y – вертикальное смещение трубы, м.

Рис. 1. Распределения температуры (а) и суммарной влажности (б) при наличии подземных вод
Fig. 1. Distributions of temperature (a) and total humidity (b) in presence of groundwater

Рис. 2. Динамика пучения грунта по времени при наличии подземных вод: 1 – 1 год; 2 – 5 лет; 3 – 10 лет
Fig. 2. Dynamics of soil heaving over time in presence of groundwater: 1 – 1 year; 2 – 5 years; 3 – 10 years

Рис. 3. Динамика изменения коэффициента неравномерности при различных значениях пористости n: 1 – 0,44; 2 – 0,41; 3 – 0,38
Fig. 3. Dynamics of change in coefficient of unevenness at various values of porosity n: 1 – 0,44; 2 – 0,41; 3 – 0,38

Для песчано-гравийного грунта коэффициент постели составляет от 5 до 50 МПа/м [6].

Уравнение напряженно-деформационного состояния трубопровода при сжимающих усилиях имеет вид [7, 8]:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -cDy - p, \quad (10)$$

где E – модуль упругости материала трубы, Па; I – момент инерции поперечного сечения, $м^4$.

Трубопровод диаметром $D=0,53$ м и глубиной траншеи 4 м соответствует подводному переходу газопровода Хатассы — Павловск. Результаты решения уравнения (10) представлены на рис. 4. Кривая 1 описывает напряжение в основном металле, а кривая 2 – в зоне термического влияния, которая зависит от значений коэффициента концентрации напряжений. Со временем величина инъекционного льда увеличивается, и напряжение трубопровода возрастает. При этом происходит пластическая деформация металла, которая не выходит из упругой области (рис. 4).

Заключение

В результате численного моделирования установлено, что в областях с водными переходами или при наличии подземных вод наблюда-

Рис. 4. Напряжения в трубопроводе в зависимости от начального подъема: 1 – на основном металле; 2 – на шве термического влияния

Fig. 4. Stresses in pipeline depending on initial rise: 1 – on base metal; 2 – on heat-affected weld

ется морозное пучение инъекционного и миграционного типов. Показано, что с течением времени в результате инъекционного морозного пучения напряженное состояние трубопровода постепенно переходит в пластическую деформацию. При многогодичном миграционном «сезонном расшатывании» в деятельном слое могут происходить малоцикловые усталостные разрушения.

Литература

1. Соколов С.М., Лимарь О.В. Определение напряженно-деформационного состояния трубопровода на переходе через границу между различными грунтами // Нефтяное хозяйство. 2006. № 5. С. 127–129.
2. Akagawa S., Huang S., Ono T., Tanaka T., Oba A., O'hashi K., Fukuda M. Sudden up-lift of buried child gas pipeline monitored at the boundary of permafrost and non-permafrost: Permafrost engineering. Fifth international symposium. Proceeding. Yakutsk, 2002. V. 1. P. 125–129.
3. Amanuma C., Kanauchi T., Akagawa S., Kanie S. Evaluation of Frost Heave Pressure Characteristics in Transverse Direction to Heat Flow // Procedia Engineering. 2017. 171, 12. P. 461–468. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.357.
4. Пермяков П.П., Попов Г.Г., Матвеева М.В. Прогноз динамики «сезонного расшатывания» газопровода // Газовая промышленность. 2011. № 4. С. 17–19.
5. Пермяков П.П., Аммосов А.П. Математическое моделирование техногенного загрязнения в криолитозоне. Новосибирск: Наука, 2003. 224 с.
6. Икрин В.А. Сопротивление материалов с элементами теории упругости и пластичности. М.: изд. АСВ, 2004. 170 с.
7. Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н., Шишков И.В. Деформация газопровода от морозного пучения грунта // Нефть и газ. 2014. № 2. С. 56–59.
8. Торонов С.Ю., Редутинский М.В., Дорофеев С.М. Определение технологических параметров монтажа трубопровода по отклонениям от проекта // Нефть и газ. 2012. № 3. С. 72–76.

References

1. Sokolov S.M., Limar' O.V. Opredelenie napryazhenno-deformatsionnogo sostoyaniya truboprovoda na perekhode cherez granitsu mezhdurazlichnymi gruntami // Neftyanoe khozyajstvo. 2006. № 5. S. 127–129.
2. Akagawa S., Huang S., Ono T., Tanaka T., Oba A., O'hashi K., Fukuda M. Sudden up-lift of buried child gas pipeline monitored at the boundary of permafrost and non-permafrost. Permafrost engineering. Fifth international symposium. Proceeding. Yakutsk, 2002. V. 1. P. 125–129.
3. Amanuma C., Kanauchi T., Akagawa S., Kanie S. // Procedia Engineering, Evaluation of Frost Heave Pressure Characteristics in Transverse Direction to Heat Flow. 2017. 171, 12. P. 461–468. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.357.
4. Permyakov P.P., Popov G.G., Matveeva M.V. Prognoz dinamiki «sezonnogo rasshatyvaniya» gazoprovoda // Gazovaya promyshlennost'. 2011. № 4. S. 17–19.
5. Permyakov P.P., Ammosov A.P. Matematicheskoe modelirovanie tekhnogennoho zagryazneniya v kriolitozone. Novosibirsk: Nauka, 2003. 224 s.
6. Ikrin V.A. Soprotivlenie materialov s elementami teorii uprugosti i plastichnosti. M.: Izd. ASV, 2004. 170 s.
7. Kuz'bozhev A.S., Birillo I.N., Shishkov I.V. Deformatsiya gazoprovoda ot moroznogo pucheniya grunta // Neft' i gaz. 2014. № 2. S. 56–59.
8. Toronov S.Yu., Redutinskij M.V., Dorofeev S.M. Opredelenie tekhnologicheskikh parametrov montazha truboprovoda po otkloneniyam ot proekta // Neft' i gaz. 2012. № 3. S. 72–76.

Поступила в редакцию 05.02.2018

Об авторах

ЛЕБЕДЕВ Михаил Петрович, член-корр. РАН, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, Россия,
<http://orcid.org/0000-0003-0086-9921>, m.p.lebedev@prez.ysn.ru;

ПЕРМЯКОВ Петр Петрович, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, Россия,
<http://orcid.org/0000-0002-6123-9985>, permyakov2005@mail.ru;

ИВАНОВ Джулустан Семенович, ведущий инженер-электроник, Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, Россия,
<http://orcid.org/0000-0003-0635-1891>, ivanovds@gmail.com;

ЯКОВЛЕВ Юрий Аркадьевич, ведущий электроник, Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, Россия,
<http://orcid.org/0000-0003-1111-2748>, Djukka@mail.ru.

About the authors

LEBEDEV Mikhail Petrovich, Corresponding Member of the RAS, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, 1 Oktyabrskaya St., Yakutsk, 677980, Russia,
<http://orcid.org/0000-0003-0086-9921>, m.p.lebedev@prez.ysn.ru;

PERMYAKOV Petr Petrovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, 1 Oktyabrskaya St., Yakutsk, 677980, Russia,
<http://orcid.org/0000-0002-6123-9985>, permyakov2005@mail.ru;

IVANOV Dzhulustan Semenovich, Leading Electronics Engineer, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, 1 Oktyabrskaya St., Yakutsk, 677980, Russia,
<http://orcid.org/0000-0003-0635-1891>, ivanovds@gmail.com;

YAKOVLEV Yuri Arkadyevich, Leading Electronics, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, 1 Oktyabrskaya St., Yakutsk, 677980, Russia,
<http://orcid.org/0000-0003-1111-2748>, Djukka@mail.ru.