ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЦИПА СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ НАЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА САМОПОГРУЖЕНИЕМ НА МЕРЗЛОТЕ

EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF THE PRINCIPLE OF CONSTRUCTION AND OPERATION OF THE GROUND PIPELINE SELF-LOADING ON PERMAFROST

З. Р. Глухова

Zemfira R. Glukhova

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Н. А. Гаррис

Nina A. Garris

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

При длительном тепловом воздействии на мерзлый грунт в процессе эксплуатации трубопровода происходит оттаивание грунта, что приводит к неравномерной осадке и перекосу конструкций до полного их разрушения. Силовое взаимодействие трубопровода с грунтом происходит под действием морозного пучения и оттаивания, что приводит к значительным немонотонным деформациям металла труб, к возникновению аварийных ситуаций. Кроме того, при повышении температуры мерзлых грунтов изменяются их физико-механические свойства, что уменьшает несущую способность, даже если грунты не начали таять.

Показано, что для протяженного объекта, каким является трубопровод, допустимо его сооружение на торфяном основании с ненарушенным растительным покровом. Соответствующий эксперимент, проведенный на основе моделирования многолетнего процесса теплового и механического взаимодействия наземного трубопровода в режиме самопогружения, показал, что при условии температурного регулирования ореола протаивания и поддержании его в допустимых пределах происходит достаточно быстрая стабилизация осадки и пучения, трубопровод принимает устойчивое положение с минимальными колебаниями «вверх — вниз», уменьшается усталостное напряжение.

Торфяное основание с ненарушенным поверхностным слоем ягеля обладает теплозащитными свойствами и дополнительно защищает основание трубопровода от проникновения тепла и таяния нижележащих мерзлых грунтов, что дает определенный запас энтальпии перекачиваемой нефти и снижает гидравлическое сопротивление трубопровода.

During prolonged heat exposure to the frozen soil while pipeline operation, thawing of soil occurs, it leads to erratic rainfall and distortion of structures, up to their full destruction. Force interaction of the pipeline with the soil occurs due to frost heaving and thawing, which leads to significant non-monotonic deformations of the metal pipe, to accidents. In addition, with the increase in temperature of frozen soils their physico-mechanical properties change, which reduces the carrying capacity, even if the soils have not started to melt.

It is shown that for an extended object, what is the pipeline, its construction on peat foundation with the undisturbed vegetation is admitted. The corresponding experiment conducted on the basis of modelling long-term process of thermal and mechanical interaction the ground pipeline

Ключевые слова

вечная мерзлота;
III принцип строительства;
наземная прокладка трубопровода;
мохово-растительный покров;
тепловой баланс;
экспериментальная установка;
осадка; пучение; стабилизация оси;
критерии подобия теплообмен

Key words

permafrost; III construction principle;
ground laying of the pipeline;
moss-vegetation cover; heat balance;
experimental setup; draft; swelling;
axis stabilization;
heat exchange similarity criteria

in a mode of self-loading, showed that under temperature regulation in halo thawing and maintaining it within the acceptable range is sufficiently rapid precipitation and stabilization of swelling, the pipeline adopts a stable position with minimum oscillation up and down, decreases fatigue loading.

Peat base with an unbroken surface layer of moss has heat-shielding properties and additionally protects the base of the pipe against heat penetration and the underlying frozen soils melting, which gives a certain amount of enthalpy of oil pumped and reduces the hydraulic resistance of the pipeline.

В процессе строительства, введения в действие, эксплуатации трубопроводов происходит их «вживление» в естественную природную среду. На многолетнемерзлых грунтах «вживление» происходит с нарушением теплового и динамического равновесия, сопровождается развитием просадки или всплытия (выпучивания), активизацией мерзлотных, эрозийных, оползневых процессов. Очевидно, что необходимо стремиться к минимизации техногенного воздействия на окружающую среду в районах мерзлоты.

На большей территории Севера, сложенной низкотемпературными твердомёрзлыми и пластично-мёрзлыми грунтами, строительство объектов выполнено по I принципу, в соответствии с которым грунты оснований сооружений используются в мерзлом состоянии. Здесь этот принцип является основным: более 75 % всех зданий и сооружений на мерзлоте построено и эксплуатируются по I принципу.

Строительство по II принципу, допускающему оттаивание мерзлых грунтов, целесообразно при наличии благоприятных для этой цели грунтовых пород оснований (скальных пород залегания или малопросадочных грунтов при оттаивании) [1].

При использовании I принципа следует учитывать температурные условия: чем ниже температура мерзлых пород, тем больше цементирующие связи и силы смерзания и, значит, больше несущая способность оснований. Промораживание грунта в основании трубопровода получается эффективным только в случае относительной стабильности мерзлоты, что наблюдается далеко не всегда.

В связи с глобальным потеплением климата, по данным климатологов, географов, мерзловедов уже в ближайшие десятилетия среднегодовая температура воздуха *может повыситься в северных регионах на 2–4 °C, температура грунта на 1 °C* [2].

Данные мониторинга указывают также на почти повсеместное повышение температуры

вечной мерзлоты, которое в отдельных районах на глубинах 10–15 м достигло 1,0–1,5 °C, и на активизацию термокарста [3].

С повышением температуры грунтов наблюдается резкое уменьшение несущей способности оснований. Трещины, неравномерные осадки, провалы, всплытия трубопроводов — это результаты повышения температуры мерзлоты. При проектировании новых трубопроводных систем необходимо учитывать изменение климата, возможное снижение предельной нагрузки, использовать современные материалы и оборудование, искать альтернативные способы прокладки с учетом будущих изменений.

Влияние деградации мерзлоты на магистральные трубопроводы

Деградация мерзлоты на фоне глобального потепления — явление прогрессирующее. Но не стоит забывать и о техногенном воздействии трубопроводов на мерзлоту. Они способны сами по себе вызвать деструктивные процессы в грунте и привести к повреждению трубопроводов, при этом изменение климата только усиливает их влияние. Было замечено, что при нарушении мохово-растительного слоя глубина сезонного протаивания увеличивается в 2–4 раза [4]. Это, в свою очередь, приводит к еще большей осадке и пучению грунта (рисунок 1).

Рисунок 1. Термостабилизаторы на южном участке трубопровода Ванкор — Пурпе [5]

При эксплуатации нефтепровода Возей – Головные сооружения (Республика Коми) вследствие коррозии металла (нефтепровод изначально проектировался как магистральный, но использовали его как промысловый), часто происходили мелкие разливы нефти. Подобные разливы в зоне вечной мерзлоты, несмотря на малые размеры, крайне ощутимы, со временем в местах разлива происходило заболачивание, образовались термокарстовые озера. Неравномерные термокарстовые осадки земной поверхности послужили одной из причин крупнейшей наземной аварии на нефтепроводе Возей — Головные сооружения в 1994 г. В результате множественных разрывов трубы произошел разлив около 160 тыс. т нефтесодержащей жидкости [6]. Практика эксплуатации трубопроводов в районах мерзлоты показывает, что *не существует приемлемых способов рекультивации земель мерзлых массивов*. Время восстановления растительного покрова из ягеля намного превышает 50 лет.

Мониторинг опытного неэксплуатируемого 45-километрового надземного трубопровода, выполненный институтом ПечорНИПИнефть, показал, что даже сезонные неравномерные термокарстовые осадки земной поверхности вызывают многочисленные аварийные ситуации [7].

Из-за неравномерных просадок грунта, вызванных таянием вечной мерзлоты, газопровод Василково — Нарьян-Мар вынуждены были реконструировать уже через несколько лет после начала его эксплуатации. Причиной было то, что проектировщики учли только влияние газопровода на мерзлоту, но не учли воздействие на неё изменяющихся климатических условий [7].

Обоснование использования III принципа

При проектировании необходимо учитывать, что в северной части распространения вечной мерзлоты возможно уменьшение несущей способности грунтов вследствие увеличения температуры грунтов и глубины сезонного оттаивания, в южной части отмечается нестабильность «вялой мерзлоты», границы которой находятся постоянно в движении, а несущая способность практически остается неопределенной по причине малой изученности.

Чтобы сохранить целостность трубопроводов в условиях нестабильных мерзлых массивов, в ряде случаев рационально следовать

альтернативному III принципу строительства на мерзлом грунте, согласно которому строительство линейной части трубопроводов выполняется *без нарушения мохового покрова грунта, обеспечивая минимальное вторжение в мерзлый грунт с учетом стабилизации осадки трубопровода* [8].

При изучении исследований по прокладке трубопроводов на мерзлых грунтах [9–13] можно отметить работу французских ученых [14]. Эксперимент проводился с целью изучения напряжений стального трубопровода диаметром 273 мм, находящегося в емкости с грунтом длиной 18 м, шириной 8 м, высотой 1,75 м. Эксперимент моделировал условия прокладки «холодного» газопровода в неоднородных грунтах: в пучиноопасном и непучиноопасном. Было проведено четыре цикла «замораживание — оттаивание» с периодом времени от 276 до 700 дней. Датчики напряжений показали, что максимальное напряжение в результате деформации трубы в период замораживания достигает 115 МПа. Такое напряжение было зафиксировано в конце первого периода замораживания. Напряжения в трубе увеличивались от цикла к циклу «охлаждение — нагревание» из-за остаточных напряжений. В цикле оттаивания происходило существенное сокращение ореола грунта, замороженного вокруг трубы. Напряжение в трубопроводе резко падало, а профиль трубы спрямлялся с небольшими остаточными вертикальными перемещениями в обоих грунтах. Давления в грунте ниже расположения трубы также уменьшались в течение процесса оттаивания.

Результаты эксперимента демонстрируют, что ограничение ореола протаивания в допустимых пределах минимизирует возникновение аварийных ситуаций при эксплуатации трубопроводов.

Уменьшить ореол протаивания под трубопроводом можно за счет укладки трубопровода в наземное положение. При наземной прокладке соблюдается принцип минимального вторжения в грунт — важнейший при сооружении трубопроводов в мерзлоте.

Постановка задачи исследования

Цель исследования — доказать возможность обеспечения устойчивого положения оси трубопровода и стабилизации осадки во времени при наземной прокладке трубопровода на мерзлоте способом «самопогружения» по результатам исследования выпучива-

ния и осадок трубопровода в режиме ограничения прогрессирующего таяния мерзлоты путем регулирования теплообмена.

Так как цель исследования преследует длительное наблюдение за состоянием трубопровода, то при планировании эксперимента предусматривался опыт, моделирующий многолетнее тепловое взаимодействие наземного трубопровода с подстилающим мерзлым грунтом. В процессе опыта определялось время, достаточное для установления стабильного положения оси трубопровода, которое при наземной прокладке определяется минимальным силовым воздействием на трубопровод.

В данной статье, для обоснования теоретических расчетов [15], приводятся результаты эксперимента, который выполнен с целью исследования теплообмена наземного трубопровода с подстилающим мерзлым грунтом, имеющим сохраненный моховой (из ягеля) покров. Опыт проводился на лабораторном стенде научно-исследовательского центра «Проблемы трубопроводного транспорта в мерзлоте» Уфимского государственного нефтяного технического университета [16].

Моделировались условия многолетнего теплообмена участка магистрального трубопровода диаметром 529 мм, проложенного в насыпи на многолетнемерзлом грунте. Модельный трубопровод представлен трубкой диаметром 20 мм и длиной 850 мм. Внутри модельного трубопровода концентрично установлен трубчатый электронагреватель (ТЭН) с диаметром оболочки 13 мм, с помощью которого выполнялось регулирование теплового потока в соответствии с заранее рассчитанным режимом. Моделировался климат с продолжительной зимой (8 месяцев) и коротким прохладным летом (4 месяца). Показания снимались по термопарам, установленным в контрольном сечении трубы, как показано на рисунке 1. Величина осадки и выпучивания трубопровода замерялась по реперам.

Отличительной особенностью представленных здесь результатов эксперимента, моделирующего 3-годовой период теплового и механического взаимодействия трубопровода с подстилающим мерзлым грунтом, является послойное расположение грунтовых формирований из суглинка, торфа и ягеля, моделирующих естественную текстуру грунтов.

Жестяной короб размерами 88 × 60 см и высотой 70 см заполнен послойно суглини-

стым грунтом северных регионов Ханты-Мансийского Автономного Округа, извлеченным шурфованием из глубины 0–7 м. Вертикальный разрез шурфа моделируется на установке, как показано на рисунке 2. Поверхностный слой уложен ягелем.

Моделирование и постановка эксперимента

Для экспериментального изучения процессов теплообмена на опытной установке и для создания адекватной физической модели необходимо выполнить условия подобия, которые записываются с применением безразмерных критериев подобия [17].

Физическая модель считается адекватной при обеспечении равенства чисел подобия, характеризующих процессы переноса тепла и влаги. В теории подобия безразмерные критерии получаются из дифференциальных уравнений, описывающих рассматриваемый физический процесс. Критерии подобия имеют численно одинаковые значения в подобных процессах.

Для моделирования работы наземного трубопровода в насыпи в режиме самопогружения необходимо соблюдение равенства чисел подобия, характеризующих процессы переноса тепла и влаги. Поэтому были учтены равенства следующих критериев:

1. Параметр Фурье Fo , характеризующий связь между скоростью изменения температурного поля, физическими свойствами и размерами тела;

1. Критерий Лыкова Lu , определяющий инерцию температурного поля относительно поля влагосодержания;

1. Критерий Коссовича K_o , показывающий отношение между количеством теплоты, затраченной на испарение жидкости, $r \cdot \Delta u$, и количеством теплоты, идущим при этом на нагревание влажного тела, $c_q \cdot \Delta T$;

1. Число Постнова Pn , характеризующее отношение термовлагопроводности к влагопроводности;

1. Теплообменный критерий Био Bi , мера отношения внутреннего и внешнего термических сопротивлений, характеризует связь между полем температур в твердом теле и условиями теплопередачи на его поверхности;

1. Теплообменный критерий Кирпичева Ki используется при изучении физических явлений, происходящих в тепловой изоляции различных инженерных сооружений.

1 — торфяно-моховой слой влажностью 30 %; 2 — суглинок влажностью 30 %; 3 — супесь влажностью 40 %

Рисунок 2. Схема установки датчиков в замерном сечении, сформированном послойной укладкой грунтов

Теплообменный критерий Кирпичева Ki характеризует отношение потока тепла, подводимого к поверхности тела, к потоку тепла, отводимого внутрь тела. Условия теплообмена моделировались критерием Кирпичева

$$Ki = \frac{q \cdot R_{тр}}{\lambda \cdot (t_{гр} - t_e)} \cong \frac{1}{\ln \frac{2H_0}{R_{тр}}} \quad (1)$$

$$H'_0 = H_0 \frac{R'_{тр}}{R_{тр}} \quad (2)$$

Полученное соотношение геометрических параметров определяет масштаб моделирования для основных элементов конструкции, в т.ч. и эквивалентного диаметра насыпи:

$$D'_{экр} = D_{экр} \frac{R'_{тр}}{R_{тр}} \quad (3)$$

При выполнении условия (1) обеспечивается подобие сил Архимеда и сил тяжести, от которых зависит положение трубопровода в талом грунте.

Подобие теплообменных и динамических процессов в данном случае осуществляется при выполнении условий геометрического подобия. Теплообменное и динамическое подобие сводятся к геометрическому. Задача моделирования условий тепломассообмена сводится к такому подбору параметров установки, при которых обеспечивается равенство чисел Фурье $Fo = Fo'$ и Кирпичева $Ki = Ki'$ для натурной и модели, и условия геометрического подобия.

Параметры модели: основание — суглинок с торфяным покровом; $D' = 0,020$ м; $R'_0 = 0,03$ м; $R''_0 = 0,005$ м; $\beta = 78^\circ$; $H'_0 = 0,048$ м; $D_{\text{экв}} = 0,282$ м; $\tau' = 12$ ч; размеры насыпи модели: $l_n = 0,200$ м; $l_0 = 0,175$ м; $l_b = 0,057$ м; $H_{\text{нас}} = 0,058$ м.

Длительность эксперимента установлена на основании равенства критерия Фурье для модельного и натурного трубопроводов $Fo = Fo'$. Продолжительность 1 года по условиям эксперимента равна 12 ч.

Для моделирования процесса теплообмена трубопровода на ТЭН подавалась мощность в соответствии с заданным режимом, при котором регулируются размеры талой зоны в допустимых пределах: $R_{0\text{max}} = 0,037$ м, $R_{0\text{min}} = 0,024$ м. Тепловой поток в грунт от модельного трубопровода определен на основании равенства критерия Кирпичева для модельного и натурного трубопроводов $Ki = Ki'$ и поддерживался в пределах: $Q_{\text{min}} = 55$ Вт, $Q_{\text{max}} = 135$ Вт. Изменение мощности ТЭНа позволило за счет регулирования теплового потока смоделировать на установке работу трубопровода в зимний и летний периоды. Обратное промерзание сверху производилось при помощи вентилятора, установленного в холодильной камере и направляющего поток холодного воздуха на поверхность оттаявшего грунта.

Моделирование многолетней работы трубопровода проводилось с ограничением прогрессирующего таяния грунта вокруг трубопровода. Перед началом эксперимента для воссоздания и поддержания свойств мерзлого грунта и окружающего воздуха короб был помещен в морозильную камеру, где он в течение 5 дней находился при постоянной минусовой температуре, пока температура грунта

не стала постоянной. Особенность данной серии опытов заключалась в том, что модельный трубопровод укладывался на ненарушенный поверхностный слой торфяного покрова суглинистого грунта с влажностью 30 %.

Размеры ореолов протаивания устанавливались по нулевым изотермам по направлениям вверх, вниз, по горизонтали и под углом 45° к оси трубопровода вверх и вниз. Значение радиуса протаивания R_0 взято по максимальному радиусу протаивания (направление вниз) [18]. Размеры и форма ореола протаивания определялись по положению нулевой изотермы, которая разделяла талую и мерзлую зоны грунта вокруг трубопровода.

Регулирование ореола протаивания в режиме «самопогружения» трубопровода

Моделирование периодического процесса растепления и промерзания торфяного основания позволило наблюдать опускание трубопровода в процессе протаивания мерзлоты и его выпучивание при обратном смерзании.

Регулирование ореола протаивания вокруг трубопровода в режиме «самопогружения» позволило установить время наступления квазистационарного состояния.

На рисунках 3–5 представлены результаты опыта, состоящего из трех циклов смены стационарных состояний «условная зима» — «условное лето». В опыте смоделирована трехлетняя работа нефтепровода в насыпи в режиме «самопогружения» на многолетнемерзлом грунте при наличии ореола протаивания.

На рисунке 3 приведены данные по перемещению трубопровода в вертикальном направлении. Как видно, осадки и выпучивания трубопровода даже в случае технологического регулирования температурой исключить не удастся. Но при сохранении минимально возможных размеров ореола протаивания их можно свести к минимуму. Чередование погружения и выпучивания трубопровода происходит со сменой сезонов с угасанием колебаний во времени. Из рисунка 3 видно, что квазистабильность положения оси трубопровода наступает относительно быстро: практически на 2–3 год эксплуатации.

Из анализа рисунков 4 и 5 видно, что тепловые потоки вверх и вниз изменяются в зависимости от режима и температуры воздуха. Максимальные тепловые потоки вверх — в январе, максимальные тепловые потоки

Рисунок 3. Влияние регулирования теплообмена наземного трубопровода на величину осадки и пучения

Рисунок 4. Регулирование ореолов протаивания в зависимости от сезона

вниз — в июле. Также летом наблюдается приток тепла от окружающей среды к трубопроводу, и поэтому стенки дополнительно нагреваются. Зимой ореол смещается вниз вследствие оттока тепла с верхней части трубопровода в окружающую среду, летом смещается вверх из-за притока тепла. Как можно заметить, трубопроводы на мерзлоте подвержены влиянию градиента температур.

На рисунке 6 представлены параметры регулирования теплообмена трубопровода в режиме протаивания — промерзания в пределах $Fo=0-130$. Хорошо выражен циклический характер теплофизических процессов «протаивания — промерзания» грунта и сохране-

ния талика вокруг трубопровода. При наземной прокладке трубопровода прогрессирующее протаивание можно предотвратить.

Результаты эксперимента подтверждают адекватность математической модели и верность полученного в [15, 19] алгоритма, реализация которого показывает, что при температурном регулировании образуются два максимума температуры: в ноябре (условно зима) и в июле (условно лето). Колебания трубопровода «вверх» происходят от всплытия при возникновении действия сил Архимеда на трубопровод, а также от пучения вследствие льдонакопления в зоне «протаивания — промерзания».

Рисунок 5. Температурные напоры в сечении трубопровода в зависимости от времени

Рисунок 6. Результаты эксперимента: N/N_{max} – отношение мощности ТЭНа к максимальной мощности в зависимости от Fo , $R_0/R_{тр}$ – отношение радиуса ореола протаивания к радиусу трубопровода в зависимости от Fo

При регулировании ореола протаивания реперные точки двигаются параллельно друг другу, с одинаковым перемещением. Такое свойство прокладки «самопогружением» сводит к минимуму возникновение дополнитель-

ных разрушающих деформаций из-за неравномерности «осадки — пучения».

В процессе опыта, проведенного в соответствии с установленным регламентом, допускающим самопогружение трубопровода, оре-

олы протаивания практически не выходили за допустимые пределы: $R_{0min} = 0,024$ м и $R_{0max} = 0,037$ м. Длительность данного опыта, состоящего из 3 циклов, что соответствует 3 годам эксплуатации нефтепровода, достаточна для того, чтобы утверждать, что подобное регулирование осуществимо.

В соответствии также с более ранними исследованиями [20], для регулирования режима работы трубопровода, при прокладке на многолетнемерзлых грунтах, на этапе проектирования, должен быть разработан регламент по температуре, гарантирующий экологически безопасный режим теплообмена, при котором:

- а) не допускается прогрессирующее таяние грунта;
- б) исключается возможность защемления трубопровода в мерзлом грунте.

Выводы

Решение о наземной прокладке «самопогружением» принимается на основании геокриологического прогноза, который позволяет заранее оценить риск возникновения аварийных ситуаций и выработать наиболее эффек-

тивные и экономичные проектные решения для минимизации возможных аварийных последствий.

1. При температурном регулировании теплообмена и размеров ореола протаивания происходит квазистабильная осадка и пучения, со временем трубопровод принимает устойчивое положение с минимальными колебаниями «вверх — вниз», уменьшается усталостное напряжение.

2. Технологическое регулирование ореола протаивания с минимальным изменением температуры по длине трубопровода обеспечивает равномерность просадки трубопровода по длине, что предупреждает деформацию трубопровода.

3. Торфяное основание с ненарушенным поверхностным слоем ягеля обладает теплозащитными свойствами и дополнительно защищает основание трубопровода от проникновения тепла и таяния нижележащих мерзлых грунтов, что дает определенный запас энтальпии (теплосодержания) перекачиваемой нефти и снижает гидравлическое сопротивление трубопровода.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: МНТКС, 2013. 63 с.
2. Павлов А.В., Ананьева Г.В., Дроздов Д.С. Мониторинг сезонно-талого слоя и температуры мерзлого грунта на севере России // Криосфера Земли. 2002. № 4. С. 30–39.
3. Оберман Н.Г., Лыгин А.М. Прогнозирование деградации многолетнемерзлых пород на примере Европейского северо-востока страны // Разведка и охрана недр. 2009. № 7. С. 15–20.
4. Карев В.М. Новая Российская энциклопедия: В 12 т. М.: Изд-во Инфра, 2004, т. 1. 959 с.
5. Шмелев Д., Станиловская Ю., Грин Э., Добуан П. Российские магистральные трубопроводы на мерзлоте: практика изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации // Материалы пятой конференции геокриологов России: сб. тр. конф. Сумы: Университетская книга, 2016. Т. 1. С. 235–240.
6. Оберман Н.Г. Глобальное потепление и изменение криолитозоны Печоро-Уральского региона // Разведка и охрана недр. 2007. № 4. С. 63–68.
7. Анисимов О.А., Инстанес А. Основные природные и социально-экономические последствия изменения климата в районах распространения многолетнемерзлых пород: прогноз на основе синтеза наблюдений и моделирования. М.: Совет Гринпис, 2010. 43 с.
8. Гаррис Н.А., Закирова Э.А. Третий принцип использования мерзлых грунтов в качестве основания трубопроводов // Территория «Нефтегаз». 2017. № 5. С. 70–78.

9. Соколов С.М. Теоретические основы новых методов сооружения нефтепромысловых трубопроводов в условиях Западной Сибири: дис. ... д-ра техн. наук. Тюмень: 2009. 490 с.

10. РД 39Р-00147105-027-02. Инструкция по прокладке трубопроводов в обсыпке из гидрофобизированных грунтов. Уфа: Изд-во Монография, 2002. 45 с.

11. Харионовский В.В. Повышение прочности газопроводов в сложных условиях. Л.: Недра, 1990. 180 с.

12. Попов А.П. Управление геотехническими системами газового комплекса в криолитозоне. Прогноз состояния и обеспечение надежности: дис. ... д-ра техн. наук. Тюмень, 2005. 712 с.

13. Кривошеин Б.Л., Агапкин В.М., Двойрис А.Д. Способы прокладки и эксплуатации трубопроводов в условиях вечной мерзлоты. М.: ВНИИОЭНГ, 1975. 111 с.

14. Хренов Н.Н. Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Наземные исследования. М.: Газоил пресс, 2005. 607 с.

15. Кутлыева З.Р., Гаррис Н.А., Глухов О.А. Расчет регулируемого теплообмена наземного трубопровода в насыпи в режиме самопогружения с замерзшей поверхности // Нефтегазовое дело. 2019. Т. 17. № 5. С. 62–71. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-5-62-71.

16. Глухова З.Р., Гаррис Н.А. Экспериментальное обоснование проектирования и эксплуатации наземного трубопровода «на плаву» в районах вечномерзлых грунтов // Нефтегазовое дело. 2020. Т. 18. № 1. С. 92–101. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-1-92-101.

17. Новоселов В.В., Тугунов П.И. Теплообмен подземных трубопроводов с внешней средой в сложных условиях. М.: ВНИИЭГазпром, 1992. 148 с.

18. Шамов С.А., Колоколова Н.А., Гarris Н.А. Экспериментальное обоснование возможности регулирования ореола протаивания вокруг трубопровода, проложенного в мерзлой насыпи // Нефтегазовое дело. 2013. Т. 11. № 4. С. 122–126.

19. Гarris Н.А., Кутлыева З.Р., Баева Г.Н. Алгоритм регулирования процесса протаивания — промерзания грунта вокруг наземного трубопровода в условиях вечной мерзлоты // Нефтегазовое дело. 2018. Т. 16. № 6. С. 46–55. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-6-46-55.

20. Гarris Н.А., Максимова С.А. Регламент эксплуатации магистрального трубопровода при условии сохранности окружающей среды // Нефтяное хозяйство. 1990. № 1. С. 63–64.

REFERENCES

1. GOST 25100-2011. *Grunty. Klassifikatsiya* [State Standard 25100-2011. Soils. Classification]. Moscow, MNTKS Publ., 2013. 63 p. [in Russian].
2. Pavlov A.V., Ananeva G.V., Drozdov D.S. Monitoring sezonnotalogo sloya i temperatury merzlogo grunta na severe Rossii [Monitoring of Seasonally Thawed Layer and Temperature of Frozen Soil in the North of Russia]. *Kriosfera Zemli — Earth's Cryosphere*, 2002, No. 4, pp. 30–39. [in Russian].
3. Oberman N.G., Lygin A.M. Prognozirovaniye degradatsii mnogoletnemerzlykh porod na primere Evropeiskogo Severo-Vostoka strany [Prognosis of the Degradation of Permafrost in an Example of European North-East of Russia]. *Razvedka i okhrana nedr — Prospect and Protection of Mineral Resources*, 2009, No. 7, pp. 15–20. [in Russian].
4. Karev V.M. *Novaya Rossiiskaya entsiklopediya: V 12 T.* [The New Russian Encyclopedia: In 12 Vol.]. Moscow, Infra Publ., 2004, Vol. 1. 959 p. [in Russian].
5. Shmelev D., Stanilovskaya Yu., Grin E., Dobuan P. Rossiiskie magistral'nye truboprovody na merzlote: praktika izyskaniy, proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii [Russian Trunk Pipelines in Permafrost: the Practice of Research, Design, Construction and Operation]. *Sbornik trudov pyatoi konferentsii geokriologov Rossii* [Proceedings of the Fifth Conference of Russian Geocryologists]. Sumy, Universitetskaya kniga Publ., 2016, Vol. 1, pp. 235–240. [in Russian].
6. Oberman N.G. Global'noe poteplenie i izmenenie kriolitozony Pechoro-Ural'skogo regiona [Global Warming and Changes in the Permafrost Zone of the Pechora-Ural Region]. *Razvedka i okhrana nedr — Prospect and Protection of Mineral Resources*, 2007, No. 4, pp. 63–68. [in Russian].
7. Anisimov O.A., Instanes A. *Osnovnye prirodnye i sotsial'no-ekonomicheskie posledstviya izmeneniya klimata v raionakh rasprostraneniya mnogoletnemerzlykh porod: prognoz na osnove sinteza nablyudenii i modelirovaniya* [The Main Natural and Socio-Economic Consequences of Climate Change in Permafrost Areas: Forecast Based on Synthesis of Observations and Modeling]. Moscow, Sovet Grinpis Publ., 2010. 43 p. [in Russian].
8. Garris N.A., Zakirova E.A. Tretii printsip ispol'zovaniya merzlykh gruntov v kachestve osnovaniya truboprovodov [The Third Principle of Using Frozen Soils as The Pipelines Foundation]. *Territoriya «Neftegaz» — Oil and Gas Territory*, 2017, No. 5, pp. 70–78. [in Russian].
9. Sokolov S.M. *Teoreticheskie osnovy novykh metodov sooruzheniya neftepromyslovykh truboprovodov v usloviyakh Zapadnoi Sibiri: dis. d-ra tekhn. nauk* [Theoretical Foundations of New Methods for Constructing Oil Field Pipelines in Western Siberia: Doct. Engin. Sci. Diss.]. Tyumen, 2009. 490 p. [in Russian].
10. RD 39R-00147105-02-02. *Instruktsiya po prokladke truboprovodov v obsypke iz gidrofobizirovannykh gruntov* [RD 39R-00147105-02-02. Instructions for Laying Pipelines Sprinkled from Hydrophobized Soils]. Ufa, Monografiya Publ., 2002. 45 p. [in Russian].
11. Kharionovskii V.V. *Povyshenie prochnosti gazoprovodov v slozhnykh usloviyakh* [Strengthening Gas Pipelines in Difficult Conditions]. Leningrad, Nedra Publ., 1990. 180 p. [in Russian].
12. Popov A.P. *Upravlenie geotekhnicheskimi sistemami gazovogo kompleksa v kriolitozone. Prognoz sostoyaniya i obespechenie nadezhnosti: dis. d-ra tekhn. nauk* [Management of Geotechnical Systems of the Gas Complex in the Permafrost Zone. Forecasting and Ensuring Reliability: Doct. Engin. Sci. Diss.]. Tyumen, 2005. 712 p. [in Russian].
13. Krivoshein B.L., Agapkin V.M., Dvoiris A.D. *Sposoby prokladki i ekspluatatsiya truboprovodov v usloviyakh vechnoi merzloty* [Methods of Laying and Operation of Pipelines in Permafrost]. Moscow, VNIIOENG Publ., 1975. 111 p. [in Russian].
14. Khrenov N.N. *Osnovy kompleksnoi diagnostiki severnykh truboprovodov. Nazemnye issledovaniya* [Basics of Integrated Diagnostics of Northern Pipelines. Ground Research]. Moscow, Gazoil press Publ., 2005. 607 p. [in Russian].
15. Kutlyeva Z.R., Garris N.A., Glukhov O.A. Raschet reguliruемого teploobmena nazemnogo truboprovoda v nasypy v rezhime samopogruzheniya s zamerzshei poverkhnosti [Calculation of Regulated Heat Exchange of Ground Pipeline in Bunch in Self-Dipping Mode with Folded Surface]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2019, Vol. 17, No. 5, pp. 62–71. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-5-62-71. [in Russian].
16. Glukhova Z.R., Garris N.A. Eksperimental'noe obosnovanie proektirovaniya i ekspluatatsii nazemnogo truboprovoda «na plavu» v raionakh vechnomerzlykh gruntov [Experimental Substantiation of Designing and Operation of the Afloat Ground Pipeline in Permafrost Areas]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2020, Vol. 18, No. 1, pp. 92–101. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-1-92-101. [in Russian].
17. Novoselov V.V., Tugunov P.I. *Teploobmen podzemnykh truboprovodov s vneshnei sredoi v slozhnykh usloviyakh* [Heat Exchange of Underground Pipelines with the External Environment in Difficult Conditions]. Moscow, VNIIEGazprom Publ., 1992. 148 p. [in Russian].
18. Shamov S.A., Kolokolova N.A., Garris N.A. Eksperimental'noe obosnovanie vozmozhnosti regulirovaniya oreola protaivaniya vokrug truboprovoda, prolozhennoho v merzloi nasypy [Experimental Justification of Possibility to Control Thawing Halo around the Pipeline Laid in Frozen Fill]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2013, Vol. 11, No. 4, pp. 122–126. [in Russian].
19. Garris N.A., Kutlyeva Z.R., Baeva G.N. Algoritim regulirovaniya protsessa protaivaniya — promerzaniya grunta vokrug nazemnogo truboprovoda v usloviyakh

vechnoi merzloty [Algorithm for the Process of Thawing-Freezing Soil Regulating around the Ground Pipeline in Permafrost]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2018, Vol. 16, No. 6, pp. 46–55. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-6-46-55. [in Russian].

20. Garris N.A., Maksimova S.A. Reglament ekspluatatsii magistral'nogo truboprovoda pri uslovii sokhrannosti okruzhayushchei sredy [Schedule of Operation of the Main Pipeline Subject to Environmental Preservation]. *Neftyanoe khozyaistvo — Oil Industry*, 1990, No. 1, pp. 63–64. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Глухова Земфира Руслановна, аспирант кафедры «Гидрогазодинамика трубопроводных систем и гидромашины», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Zemfira R. Glukhova, Post-Graduate Student of Fluid-Gas Dynamics of Pipeline Systems and Hydraulic Machines Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: kutlyeva.zemfira@yandex.ru

Гаррис Нина Александровна, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Гидрогазодинамика трубопроводных систем и гидромашины», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Nina A. Garris, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Fluid-Gas Dynamics of Pipeline Systems and Hydraulic Machines Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: nina_garris@mail.ru