

УЧЕТ СТЕПЕНИ ТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ВМЕЩАЮЩИХ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

THE EFFECT OF UNDERGROUND PIPELINE TECHNOGENIC IMPACT ON FROZEN SOIL THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT

Н. А. Гаррис
Nina A. Garris

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

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

А. И. Русаков
Alexander I. Rusakov

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

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Техногенное воздействие, неизбежное как при строительстве, так и при длительной эксплуатации подземного нефтепровода, приводит к значительному изменению теплофизических свойств вмещающего грунта. Кроме того, имеет место значительное сезонное изменение эффективного коэффициента теплопроводности, при этом наблюдаемые в зимний и летний периоды значения могут различаться в два раза.

Необходимость решения задачи теплообмена системы «трубопровод – мерзлый грунт» как сопряженной делает использование численных методов решения малоприменимыми. Ореол протаивания, формирующийся под влиянием теплового воздействия трубопровода, делает практически невозможным проведение теплогидравлического расчета по причине неопределенности его размеров. Процессы миграции влаги и фазовых превращений, происходящие во вмещающем мерзлом грунте под действием периодически изменяющегося градиента температур и направления теплопередачи, также оказывают значительное влияние на изменение коэффициента теплопроводности и практически не поддаются моделированию, что дополнительно усложняет поставленную задачу.

Интегральный подход к решению вопроса распределения температур по длине трубопровода позволяет избежать весьма трудоемкой и далеко не всегда эффективной процедуры определения размеров ореолов протаивания вокруг трубопровода на этапе теплогидравлического расчета.

Предложен способ учета теплового воздействия подземного трубопровода на теплопроводность вмещающего многолетнемерзлого грунта. На основании результатов физического эксперимента, моделирующего процессы протаивания-промерзания вокруг подземного трубопровода в мерзлом песчаном грунте в квазистационарном режиме теплообмена, была определена степень изменения теплопроводности грунта в зависимости от направления движения ореола протаивания.

Использование коэффициента техногенного воздействия, учитывающего изменение теплопроводности грунта в результате нарушения криогенной текстуры грунта при тепловом воздействии подземного трубопровода, позволит повысить точность теплогидравлических расчетов. Данные рекомендации по определению расчетного значения коэффициента теплопроводности грунта можно использовать также и в случае дефицита исходной информации.

Ключевые слова

подземный трубопровод;
мерзлый грунт; техногенное
воздействие; ореол протаивания;
зона теплового влияния;
коэффициент теплопроводности

The technogenic impact that is inevitable both during construction and long-term operation of an underground oil pipeline leads to a significant change of the enclosing soil thermal properties. Furthermore, there is a considerable seasonal variation of the effective thermal conductivity coefficient, wherein the values observed in winter and summer may vary twice.

The necessity of solving the «pipeline – frozen soil» system heat transfer problem as conjugate makes the use of numerical solution methods poorly applicable. The thawing halo, which is formed under the pipeline thermal influence, makes it virtually impossible to conduct a thermohydraulic calculation because of its size uncertainty. Moisture migration and phase transformations taking place in the enclosing frozen soil due to periodically changing temperature gradient and heat transfer direction also have a significant effect on change of the thermal conductivity coefficient and can be poorly modeled, which further complicates the task.

A method for correction of enclosing frozen soil thermal conductivity coefficient under pipeline thermal influence is proposed. The degree of change in soil thermal conductivity coefficient was determined based on the results of a physical experiment simulating thawing-freezing processes around an underground pipeline in frozen sandy soil in a quasi-stationary heat transfer mode.

The coefficient of technogenic impact, accounting the change of frozen soil thermal conductivity as a result of cryogenic texture distortion under pipeline thermal influence, will improve the accuracy of thermohydraulic calculations. These recommendations for estimating the soil thermal conductivity coefficient can also be used in case of initial information deficit.

Введение

Техногенное воздействие на грунты в полосе отчуждения неизбежно как при строительстве подземного нефтепровода, так и при его длительной многолетней эксплуатации [1–3]. По причине теплового воздействия происходит разрушение криогенной структуры грунта без возможности восстановления исходного состояния. Изменение механической структуры за счет переноса микрочастиц грунта при миграции влаги под воздействием температурного градиента усиливает этот эффект [4, 5]. Это приводит к тому, что в зоне теплового воздействия образуются улучшенные капиллярные протоки [6]. В результате механического разрушения грунта при рытье траншей, укладке трубопровода, обратной засыпке и т.д., неизбежно изменяются и свойства грунта, прилегающего к трубопроводу. Теоретический учет влияния этих факторов также является сложной и малоизученной задачей.

На сегодняшний день известно достаточное количество методик лабораторного и аналитического определения теплофизических свойств грунтов [3, 7–11]. Однако все они позволяют определить свойства грунта лишь в ненарушенном состоянии, что ограничивает их применимость в практике трубопроводного транспорта углеводородов, когда массив мерзлого грунта подвергается тепловому воздействию. Периодическое протаивание и промерзание грунта приводит к значительному изменению его теплофизических свойств. Как

Key words

underground pipeline;
frozen soil; technogenic impact;
thawing halo; thermal influence zone;
thermal conductivity coefficient

показывает опыт численного моделирования [12, 13], учесть эти эффекты пока не представляется возможным.

Покажем, на основании многочисленных исследований теплообмена промышленных трубопроводов с грунтом при эксплуатации в режимах низкотемпературного теплообмена малой интенсивности [14], а также специально поставленных и проведенных экспериментов в условиях мерзлоты [2, 15], что можно использовать интегральный подход к определению коэффициента теплопроводности в пределах зоны теплового влияния трубопровода, прокладываемого в мерзлоте.

Теплопроводность обычных вмещающих грунтов

Расчет любого неизотермического трубопровода возможен на основании решения сопряженной задачи теплообмена, поскольку температура перекачиваемой среды и теплофизические свойства вмещающего грунта, определяющие его способность проводить и аккумулировать тепло, являются взаимозависимыми параметрами [2, 14]. Для трубопровода, проложенного в мерзлых грунтах, такая задача чрезвычайно сложна вследствие образования неопределенных размеров ореола протаивания.

Расчет внутренней теплоотдачи трубопровода не представляет сложности, поскольку имеется достаточно математических моделей и формул для определения внутренней коэффициента теплоотдачи α_1 .

Величина внешнего коэффициента теплоотдачи α_2 прямо пропорционально зависит от коэффициента теплопроводности грунта в зоне теплового воздействия λ_{cp} [1]. Это делает определение действительного значения коэффициента теплопроводности грунта одним из важнейших вопросов при выполнении технологических расчетов.

Определение расчетного значения λ_{cp} является сложной задачей даже для обычных однородных по структуре грунтов, без наличия ореола протаивания вокруг трубопровода. Как известно, при отсутствии градиента температур в грунте влагоперенос может осуществляться за счет фильтрации, капиллярного или пленочного движения влаги и диффузии пара [4, 5]. В результате теплового воздействия трубопровода на вмещающий грунт происходит дополнительная миграция влаги под действием термодвижущих сил [4–6]. В зависимости от интенсивности теплообмена может наблюдаться различное распределение влажности, однако в любом случае влажность и, следовательно, теплопроводность прилегающего к трубопроводу грунта уменьшается [1, 2, 14]. Это приводит к тому, что теплопроводность грунта в зоне теплового влияния трубопровода непостоянна, неравномерно изменяется по мере удаления от стенки трубопровода и отличается от постоянной по объему теплопроводности грунта в ненарушенном (естественном) состоянии λ_e .

Несмотря на сложные процессы перераспределения влаги в грунте под действием источника тепла, для решения различных задач теплообмена успешно применяется модель эквивалентной теплопроводности. В практических расчетах значение эффективного коэффициента теплопроводности грунта $\lambda_{эф}$ в зоне теплового влияния трубопровода определяется при этом как среднеинтегральное значение [2, 14]:

$$\lambda_{эф} = \frac{\lambda_e - \lambda_{cm}}{\ln \frac{\lambda_e}{\lambda_{cm}}}, \quad (1)$$

где λ_e и λ_{cm} — соответственно коэффициенты теплопроводности грунта в естественном ненарушенном тепловом состоянии на глубине заложения оси трубопровода и грунта, прилегающего к стенке трубопровода.

Формула (1), полученная Н. А. Гаррис и П. И. Тугуновым, принята в качестве основной при определении расчетного коэффициента теплопроводности грунта при проектировании неизотермических трубопроводов [1, 2].

Помимо техногенного воздействия, значительное влияние на теплофизические характеристики вмещающего грунта оказывают климатические факторы. Кроме периодических сезонных колебаний температуры, наибольшее влияние оказывает таяние снегового покрова, приводящее к резкому увеличению влажности грунта вокруг трубопровода.

В таблице 1 представлены значения эффективных коэффициентов теплопроводности грунтов для некоторых неизотермических нефтепроводов, характеризующихся средне- и малоинтенсивным теплообменом с окружающей средой. На всех нефтепроводах наблюдается значительное сезонное изменение эффективного коэффициента теплопроводности, при этом максимально наблюдаемое значение (зимний период) $\lambda_{эф}^{max}$ превышает минимальное (летний период) $\lambda_{эф}^{min}$ в среднем в два раза. Эти значения также отличаются от проектных, что свидетельствует о сложности определения действительного значения коэффициента теплопроводности грунта даже при отсутствии ореола протаивания.

Как видно, даже для обычных нефтепроводов, работающих без подогрева, в значительной степени проявляется эффект теплового воздействия, выражающийся в перераспределении влаги вокруг трубопровода и снижении коэффициента теплопроводности грунта в зоне теплового влияния.

Теплопроводность вмещающих грунтов при образовании ореола протаивания

В мерзлых грунтах, под влиянием теплового воздействия трубопровода, происходит не только перераспределение влаги, но и изменение льдистости. Это делает задачу теплового расчета нефтепровода в мерзлом грунте более сложной, поскольку вокруг трубопровода образуется ореол протаивания, и в массиве вмещающего мерзлого грунта формируется обособленная зона грунта в измененном, талом состоянии.

Процессы протаивания и промерзания, происходящие при этом в грунте, являются термодинамически неустойчивыми. Они сопровождаются миграционными процессами, которые идут под действием термодвижущих сил и при сопутствующем изменении фазового состояния грунтовой влаги [2]. Эти процессы сопровождаются поглощением (протаивание) или выделением (промерзание) тепла при фазовых переходах.

Таблица 1. Значения эффективных коэффициентов теплопроводности грунтов в зонах теплового влияния неизотермических нефтепроводов [14]

| Нефтепровод, участок | Теплопроводность грунта, Вт/(м·К) | | | $\frac{\lambda_{эф}^{max} - \lambda_{эф}^{min}}{\lambda_{эф}^{cp}} \cdot 100 \%$ |
|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|---------------------|--|
| | $\lambda_{эф}^{max}$ | $\lambda_{эф}^{min}$ | $\lambda_{эф}^{cp}$ | |
| Шаим — Тюмень: | | | | |
| Шаим — Кума | 0,696 | 0,474 | 0,582 | 37,6 |
| Кума — Тюмень | 0,719 | 0,291 | 0,479 | 89,4 |
| Александровское — Анжеро-Судженск: | | | | |
| Александровское — ПарABELь | 0,595 | 0,344 | 0,477 | 52,6 |
| ПарABELь — Анжеро-Судженск | 0,547 | 0,295 | 0,436 | 57,7 |
| Усть-Балык — Омск: | | | | |
| Усть-Балык — Вагай | 0,956 | 0,351 | 0,689 | 87,8 |
| Вагай — Омск | 0,888 | 0,430 | 0,653 | 71,6 |
| Нижневартовск — Каркатеевы | 0,808 | 0,397 | 0,625 | 65,7 |
| Каркатеевы — Торгили | 0,761 | 0,531 | 0,639 | 35,9 |
| Торгили — Юргамыш | 0,761 | 0,492 | 0,569 | 47,2 |
| Нефтепровод «Дружба»: | | | | |
| Сызрань — Никольское | 0,424 | 0,386 | 0,404 | 9,4 |
| Никольское — Высокое | 0,429 | 0,392 | 0,411 | 9,0 |
| Альметьевск — Лопатино | 0,562 | 0,475 | 0,527 | 30,9 |
| Горький — Рязань | 0,940 | 0,684 | 0,839 | 30,8 |
| Горький — Ярославль | 0,489 | 0,354 | 0,433 | 31,2 |
| Тэбук — Ухта: | | | | |
| I нитка | 1,166 | 0,719 | 0,860 | 51,9 |
| II нитка | 0,930 | 0,456 | 0,700 | 67,9 |
| Уса — Ухта | 0,589 | 0,239 | 0,374 | 93,5 |

Так, при остановке перекачки происходит остывание нефти в трубопроводе и уменьшение размеров ореола протаивания R_0 вплоть до полного смерзания, если не возобновить перекачку. С последующим возобновлением перекачки тепло вновь начинает поступать в грунт, идет процесс растепления, сопровождающийся увеличением размеров ореола протаивания в грунте.

Следует учитывать, что в мерзлом грунте при температурах ниже температуры фазового перехода, часть влаги находится в жидком и газообразном состояниях [3–5]. Данный эффект подтверждает и объясняет тот факт, что при наличии температурного градиента влажность и теплопроводность грунта в зоне теплового воздействия трубопровода изменяются и за пределами ореола протаивания. При этом может наблюдаться образование льдистых прослоек, сегрегационных включений льда и, в определенных случаях, морозное пучение.

Очевидно, что выбор расчетных характеристик грунта и расчет температурного режима трубопровода при наличии ореола протаивания становятся проблематичными.

Проблема заключается в том, что для расчета температурного режима трубопровода, образующего ореол протаивания, по суще-

ствующим методикам для обычных грунтов [1] требуется определить коэффициент теплоотдачи k от перекачиваемой жидкости в грунт. В таком случае задача становится неопределенной, т.к. для вычисления коэффициента k необходимо знать величину радиуса протаивания R_0 , который является на данном этапе неизвестной величиной.

Отсутствие актуальных методик и невозможность решения сопряженной задачи численными методами обуславливают необходимость поиска альтернативного подхода. В условиях мерзлоты рациональным представляется способ перекачки, допускающий регулирование ореола протаивания [2].

Рассмотрим способ перекачки нефти по подземному трубопроводу в изотермическом режиме, когда за счет выделяемого тепла трения ореол протаивания вокруг трубопровода поддерживается в допустимых пределах $R_{0min} \dots R_{0max}$.

Для исключения неопределенности при тепловом расчете системы «трубопровод — грунт» учтем изменение теплопроводности грунта в зоне теплового влияния трубопровода, определяя расчетное значение коэффициента теплопроводности грунта как среднеинтегральное значение. Это дает возможность,

при осреднении коэффициента теплопроводности по длине трубопровода, что находится в полном соответствии с нормами на технологическое проектирование, выполнять тепловой и теплогидравлический расчеты трубопровода по обычным методикам, что значительно упрощает расчет и позволяет выполнять расчеты не только проектных, но и эксплуатационных режимов работы трубопроводов.

Тепловое воздействие при квазистационарном теплообмене

С целью обоснования правомерности использования модели эффективной теплопроводности для низкотемпературных трубопроводов, проложенных в многолетнемерзлом грунте, рассмотрим результаты эксперимента [15]. Опыты проводились на модельном трубопроводе с относительной глубиной заложения $H/R_{mp} = 3,62$, находящемся в мерзлом незасоленном песчаном грунте с температурой начала фазовых переходов $t_{bf} = 0^\circ\text{C}$. Температурный режим моделировался для севера Тюменской области.

Начальная влажность грунта, теплопроводность которого представлена на рисунке 1, находилась в диапазоне 10,5–13,5 %, а коэффициенты теплопроводности грунта перед началом эксперимента были определены равными $\lambda_{me} = 1,61 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ и $\lambda_{me} = 2,25 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ для талого и мерзлого грунта соответственно.

На поверхности грунта поддерживалась постоянная отрицательная температура. Изменения температурного напора в сечении трубопровода производились путем изменения тепловой мощности ТЭНа, с помощью которого регулировался тепловой поток в соответствии с расчетным режимом.

В эксперименте моделировался многолетний режим работы подземного нефтепровода с регулируемым теплообменом. При этом происходила последовательная циклическая смена квазистационарных режимов с изменением радиуса ореола протаивания в диапазоне $R_{0max} \dots R_{0min}$. Режим регулировался путем изменения температуры ТЭНа и, как следствие, его теплоотдачей.

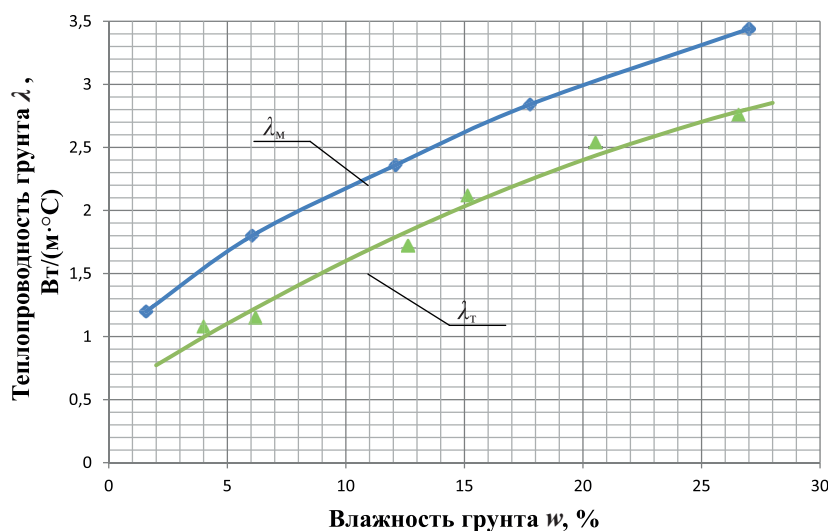


Рисунок 1. Теплопроводность модельного грунта в естественном состоянии [2]

С целью определения степени воздействия подземного трубопровода на коэффициент теплопроводности вмещающего мерзлого грунта, был проанализирован период, равный годовому периоду эксплуатации. В зависимости от изменения соотношения R_o/R_{mp} при смерзании и протаивании вмещающего грунта были выделены интервалы, соответствующие «осенне-зимнему» и «весенне-летнему» периодам соответственно.

Были определены осредненные коэффициенты теплопроводности λ_m и λ_t для мерзлого

и талого состояний грунта. Результаты представлены на рисунке 2.

Оценка изменения коэффициента теплопроводности

Несмотря на тот факт, что изменение теплового потока в ходе эксперимента достигалось регулированием температуры модельного трубопровода, а не сезонными колебаниями температуры воздуха, характер полученной зависимости соотносится с данными по действующим трубопроводам [1, 14], что позволяет применить выявленные закономерности к реальным объектам.

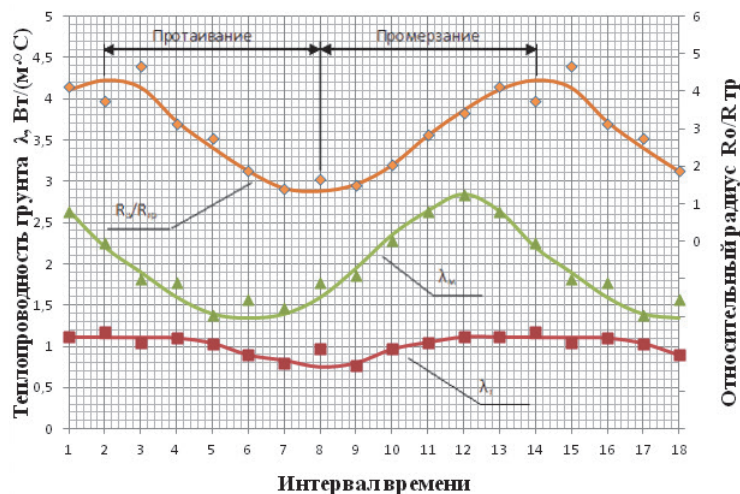


Рисунок 2. Изменение ореола протаивания и коэффициента теплопроводности грунта в ходе эксперимента при низкотемпературном теплообмене

Расчетное значение коэффициента теплопроводности грунта в зоне теплового влияния трубопровода, вычисленное по проектным данным, согласно [15]:

$$\lambda_{гр}^e = \frac{\lambda_m - \lambda_t}{\ln \frac{\lambda_m}{\lambda_t}} = \frac{2,25 - 1,61}{\ln \frac{2,25}{1,61}} = 1,91 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С}). \quad (2)$$

Но вследствие перераспределения и фазовых превращений грунтовой влаги в пределах зоны теплового влияния эффективное значение коэффициента теплопроводности вмещающего грунта изменяется.

На основании данного физического эксперимента были определены значения коэффициентов теплопроводности в талой λ_m и мерзлой λ_m зонах и получены среднеинтегральные значения коэффициента теплопроводности грунта $\lambda_{эф}$ в зоне теплового влияния трубопровода. Анализируя полученный результат, можно отметить следующее.

1. Тепловое влияние трубопровода на окружающий его мерзлый грунт оказывается весьма значительным даже при низкотемпературном теплообмене. Выявляется значительное отличие эмпирического коэффициента теплопроводности $\lambda_{эф}$, полученного для случаев протаивания и промерзания грунта вокруг трубопровода, от исходного расчетного значения коэффициента теплопроводности в зоне теплового влияния, вычисленного по исходным проектным данным $\lambda_{гр}^e = 1,91 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{°С}^{-1}$:

- при протаивании $\lambda_{эф} = 1,56 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{°С}^{-1}$;
- при промерзании $\lambda_{эф} = 1,78 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{°С}^{-1}$;
- осредненное за годовой период значение $\lambda_{эф} = 1,67 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{°С}^{-1}$.

2. Коэффициент техногенного воздействия k^* , учитывающий снижение коэффициента теплопроводности, в данном случае песчаного

грунта, при нарушении его криогенной текстуры и трансформации грунтовой влаги, получается равным

$$k^* = \frac{\lambda_{эф}}{\lambda_{гр}^e} = \frac{1,67}{1,61} = 0,874. \quad (3)$$

3. С учетом полученных результатов формула для определения расчетного значения коэффициента теплопроводности грунта может быть уточнена введением коэффициента техногенного воздействия k^* :

$$\lambda_{гр}^* = k^* \cdot \lambda_{гр}^e = k^* \cdot \left(\frac{\lambda_m^e - \lambda_t^e}{\ln \frac{\lambda_m^e}{\lambda_t^e}} \right). \quad (4)$$

Следует отметить, что данные рекомендации можно использовать и в случае дефицита исходной информации. Несмотря на то, что эти результаты получены на песчаных грунтах, качественные соотношения справедливы и для грунтов других категорий: супесчаных, суглинистых и глинистых. Для уточнения количественных соотношений необходимо провести дополнительные исследования на грунтах более широкого спектра.

Особо следует отметить, что полученные результаты не противоречат и находятся в полном соответствии с результатами других исследователей [11, 16].

В работе [16] в условиях одномерного эксперимента было получено, что после сезонного промерзания-оттаивания резко увеличивается коэффициент фильтрации и активизируется движение влаги. В нашем случае при исследовании радиальной миграции влаги также отмечается активное перераспределение влажности в грунте, которое происходит

под действием термодвижущих сил, генерируемых трубопроводом.

В [16] также отмечен эффект значительного снижения теплопроводности горных пород в талом состоянии после циклов промерзания-протаивания по сравнению с первоначальной величиной. Для техногенных грунтов и сопоставимых условий эксперимента авторами было получено снижение теплопроводности в 0,7–0,9 раза. В работе [11] отмечается уменьшение теплопроводности глинисто-песчаной горной породы в 0,7 раза после первого цикла промерзания-протаивания. В нашем случае наблюдалось снижение теплопроводности талого грунта в среднем в 0,62 раза.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что теплопроводность вмещающего грунта изменяется вследствие техногенного воздействия, что рекомендуется учитывать на этапе проектирования трубопровода при определении расчетного значения коэффициента теплопроводности грунта по формуле (4).

Поскольку коэффициент теплопередачи подземного нефтепровода практически пропорционально зависит от теплопроводности

грунта, окружающего трубопровод, то соответственно повышается и точность теплогидравлического расчета.

Выводы

1. Теплогидравлический расчет подземного нефтепровода может быть значительно упрощен, если использовать в расчете среднеинтегральное значение коэффициента теплопроводности грунта с учетом его снижения вследствие нарушения криогенной текстуры в зоне теплового воздействия трубопровода.

2. Расчетное значение коэффициента теплопроводности грунта, определенное с учетом техногенного воздействия трубопровода, $\lambda_{сп}^{\phi} = 1,67$ Вт/(м·°C) значительно меньше исходного значения коэффициента теплопроводности мерзлого грунта $\lambda_m^c = 2,25$ Вт/(м·°C), но превышает коэффициент теплопроводности талого грунта $\lambda_r^c = 1,61$ Вт/(м·°C).

3. Для долгосрочных прогнозов как на этапе проектирования, так и при многолетней эксплуатации трубопровода в мерзлоте в режиме регулирования можно использовать в расчетах среднеинтегральное значение $\lambda_{сп}^{\phi}$, с учетом коэффициента техногенного воздействия k^* .

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Агапкин В.М., Кривошеин Б.Л., Юфин В.А. Тепловой и гидравлический расчеты трубопроводов для нефти и нефтепродуктов. М.: Недра, 1981. 256 с.

2. Гarris Н.А. Эксплуатация нефтепродуктопроводов в различных температурных режимах и нагрузках при условии сохранности экологической среды: дис. ... д-ра техн. наук. Уфа: Изд-во УГНТУ, 1998. 385 с.

3. Ершов Э.Д. Теплофизические свойства горных пород. М.: Изд-во МГУ, 1974. 203 с.

4. Чистотин Л.В. Миграция влаги в промерзающих неводонасыщенных грунтах. М.: Наука, 1973. 144 с.

5. Williams P.J., Smith M.W. The Frozen Earth. Fundamentals of Geocryology: Studies in Polar Research. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. 306 p.

6. Миронова О.Н., Гarris Н.А., Назырова Р.З. Определение порога чувствительности коррозионных процессов к колебаниям температуры газопровода // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2012. № 3. С. 32–35.

7. Jin H., Wang Y., Zheng Q., Liu H., Chadwick E. Experimental Study and Modelling of the Thermal Conductivity of Sandy Soils of Different Porosities and Water Contents // Applied Sciences. 2017. Vol. 7. No. 2. P. 117–119. DOI: 10.3390/app7020119.

8. Tian Z., Lu Y., Horton R., Ren T.A. Simplified de Vries-Based Model to Estimate Thermal Conductivity of Unfrozen and Frozen Soil // European Journal of Soil Science. 2016. Vol. 67. P. 564–572.

9. Arkhangelskaya T., Lukyashchenko K. Estimating Soil Thermal Diffusivity at Different Water Contents from Easily Available Data on Soil Texture, Bulk Density, and Organic Carbon Content // Biosystems Engineering. 2018. Vol. 168. P. 83–95. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2017.06.011.

10. Haigh S.K. Thermal Conductivity of Sands // Geotechnique. 2012. Vol. 62. Issue 7. P. 617–625. DOI: 10.1680/geot.11.P.043.

11. Тимофеев А.М. Методы и результаты исследования тепломассообменных свойств и температурно-влажностных режимов многокомпонентных систем с фазовыми переходами: дис. ... д-ра техн. наук. Якутск: 2007, 316 с.

12. Yu W.B., Liu W.B., Lai Y.M., Chen L., Yi X. Non-linear Analysis of Coupled Temperature-Seepage Problem of Warm Oil Pipe in Permafrost Regions of Northeast China // Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 70. P. 988–995.

13. Lu T., Wang K.S. Numerical Analysis of the Heat Transfer Associated with Freezing/Solidifying Phase Changes for a Pipeline Filled with Crude Oil in Soil Saturated with Water during Pipeline Shutdown in Winter // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2008. Vol. 62. P. 52–58.

14. Новоселов В.В. Прогнозирование теплофизических свойств грунтов при выполнении расчетов неизотермических трубопроводов. Обзорная информация. М.: ВНИИОЭНГ, 1989. 29 с.

15. Garris N., Rusakov A., Baykova L. New Approach to Estimation of Thermal Conductivity Coefficient for Underground Pipeline Forming a Thawing Halo in Perma-

frost // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1111. P. 12–16.

16. Степанов А.В., Далбаева Е.К. Влияние циклов замораживания-оттаивания на тепло-массообменные свойства техногенных криогенных грунтов // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4–5. С. 1296–1299.

REFERENCES

1. Agapkin V.M., Krivoshein B.L., Yufin V.A. *Тепловои и гидравлический расчеты трубопроводов для нефти и нефтепродуктов* [Thermal and Hydraulic Calculations of Pipelines for Oil and Oil Products]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 256 p. [in Russian].

2. Garris N.A. *Ekspluatatsiya nefteproduktoprovodov v razlichnykh temperaturnykh rezhimakh i zagruzkakh pri uslovii sokhrannosti ekologicheskoi sredy: dic. d-ra tekhn. nauk* [Operation of Oil Product Pipelines in Various Temperature Regimes and Loads, Provided that the Ecological Environment is Preserved: Doct. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU Publ., 1998. 385 p. [in Russian].

3. Ershov E.D. *Teplofizicheskie svoystva gornyykh porod* [Thermophysical Properties of Rocks]. Moscow, MGU Publ., 1974. 203 p. [in Russian].

4. Chistotinov L.V. *Migratsiya vlagi v promerzayushchikh nevodonasyshchennykh gruntakh* [Moisture Migration in Freezing Non-Water-Saturated Soils]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 144 p. [in Russian].

5. Williams P.J., Smith M.W. *The Frozen Earth. Fundamentals of Geocryology: Studies in Polar Research*. Cambridge, Cambridge University Press, 1989. 306 p.

6. Mironova O.N., Garris N.A., Nazyrova R.Z. *Opredelenie poroga chuvstvitel'nosti korrozionnykh protsessov k kolebaniyam temperatury gazoprovoda* [Determination of the Sensitivity Threshold of Corrosion Processes to Fluctuations in Gas Pipeline Temperature]. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya — Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*, 2012, No. 3, pp. 32–35. [in Russian].

7. Jin H., Wang Y., Zheng Q., Liu H., Chadwick E. *Experimental Study and Modelling of the Thermal Conductivity of Sandy Soils of Different Porosities and Water Contents*. *Applied Sciences*, 2017, Vol. 7, No. 2, pp. 117–119. DOI: 10.3390/app7020119.

8. Tian Z., Lu Y., Horton R., Ren T.A. *Simplified de Vries-Based Model to Estimate Thermal Conductivity of*

Unfrozen and Frozen Soil. *European Journal of Soil Science*, 2016, Vol. 67, pp. 564–572.

9. Arkhangelskaya T., Lukyashchenko K. *Estimating Soil Thermal Diffusivity at Different Water Contents from Easily Available Data on Soil Texture, Bulk Density, and Organic Carbon Content*. *Biosystems Engineering*, 2018, Vol. 168, pp. 83–95. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2017.06.011.

10. Haigh S.K. *Thermal Conductivity of Sands*. *Geotechnique*, 2012, Vol. 62, Issue 7, pp. 617–625. DOI: 10.1680/geot.11.P.043.

11. Timofeev A.M. *Metody i rezul'taty issledovaniya teplomassoobmennykh svoystv i temperaturno-vlazhnostnykh rezhimov mnogokomponentnykh sistem s fazovymi perekhodami: dic. d-ra tekhn. nauk* [Methods and Results of the Study of Heat and Mass Transfer Properties and Temperature and Humidity Modes of Multicomponent Systems With Phase Transitions: Doct. Engin. Sci. Diss.]. Yakutsk, 2007, 316 p. [in Russian].

12. Yu W.B., Liu W.B., Lai Y.M., Chen L., Yi X. *Non-linear Analysis of Coupled Temperature-Seepage Problem of Warm Oil Pipe in Permafrost Regions of Northeast China*. *Applied Thermal Engineering*, 2014, Vol. 70, pp. 988–995.

13. Lu T., Wang K.S. *Numerical Analysis of the Heat Transfer Associated with Freezing/Solidifying Phase Changes for a Pipeline Filled with Crude Oil in Soil Saturated with Water During Pipeline Shutdown in Winter*. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2008, Vol. 62, pp. 52–58.

14. Novoselov V.V. *Prognozirovanie teplofizicheskikh svoystv gruntov pri vypolnenii raschetov neizotermicheskikh truboprovodov. Obzornaya informatsiya* [Prediction of the Thermophysical Properties of Soils when Performing Calculations for Non-Isothermal Pipelines. Overview Information]. Moscow, VNIIOENG Publ., 1989. 29 p. [in Russian].

15. Garris N., Rusakov A., Baykova L. *New Approach to Estimation of Thermal Conductivity Coefficient for Underground Pipeline Forming a Thawing Halo in Permafrost*. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1111, pp. 12–16.

16. Stepanov A.V., Dalbaeva E.K. *Vliyanie tsiklov zamorazhivaniya-ottaivaniya na teplo-massoobmennye svoystva tekhnogennykh kriogennykh gruntov* [Influence of Freezing-Thawing Cycles on the Heat-Mass Transfer Properties of Technogenic Cryogenic Soils]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN — Ivestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, Vol. 14, No. 4-5, pp. 1296–1299. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
ABOUT THE AUTHORS

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 Dynamics of Pipeline Networks and Fluid Machinery Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: nina_garris@mail.ru

Русаков Александр Игоревич, аспирант кафедры «Гидрогазодинамика трубопроводных систем и гидромашины», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Alexander I. Rusakov, Post-Graduate Student of Fluid Dynamics of Pipeline Networks and Fluid Machinery Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: chake100500@gmail.com