

УДК 658.264

Ю.Д. Земенков, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой транспорта углеводородных ресурсов Института транспорта, Тюменский государственный нефтегазовый университет (Тюмень, Россия); **Б.В. Моисеев**, д.т.н., профессор, Тюменский государственный архитектурно-строительный университет (Тюмень, Россия); **С.М. Дудин**, ассистент, Тюменский государственный нефтегазовый университет (Тюмень, Россия); **Н.В. Налобин**, к.т.н., Тюменский государственный нефтегазовый университет (Тюмень, Россия)

Разработка алгоритма построения температурного поля мерзлого грунта вокруг трубопроводов

Обустройство нефтяных и газовых месторождений требует сооружения различных трубопроводов (водопроводов, газопроводов и нефтепроводов) подземной прокладкой. При эксплуатации трубопроводов в мерзлых грунтах происходит теплообмен между ними и образование талой зоны, что приводит к деформации трубопроводов. Условия строительства и эксплуатации трубопроводов существенно связаны с их температурным режимом. В связи с этим необходимо знать закономерности формирования ореолов протаивания вокруг трубопроводов. В статье рассмотрены проблемы, связанные с устройством трубопроводов в вечномерзлых грунтах. Имеются способы ограничения экологических нарушений при сооружении и эксплуатации трубопроводов [2, 4, 5]. Эффективность каждого из них определяется на основе расчетов тепло- и массопереноса в природной среде, которые позволяют прогнозировать осадку и пучение грунтов, а следовательно, и возникающие при этом деформации трубопроводов. Один из способов ограничения теплового воздействия трубопровода на мерзлый грунт – применение теплоизоляции.

Для поддержания необходимых параметров технологических сред в трубопроводах их покрывают тепловой изоляцией.

Для выбора оптимальной толщины изоляции трубопроводов необходимо иметь методику расчета. На параметры режима работы нефтепроводов и газопроводов большое влияние оказывает температурное поле грунта вокруг трубопроводов.

Таким образом, выяснение закономерностей формирования ореолов протаивания вокруг трубопроводов и определение оптимальных условий их прокладки при строительстве в районах с вечномерзлыми грунтами на севере Тюменской области является весьма актуальной задачей [2, 3, 5].

Для построения температурного поля мерзлого грунта авторами был разработан алгоритм и получены зависимости на примере Нового Уренгоя. Было выполнено решение некоторых задач на основе полученных зависимостей и построены графики зависимости.

Исследования и выполненные расчеты по подземной прокладке трубопроводов позволили авторам дать рекомендации, направленные на увеличение надежности трубопроводов.

Ключевые слова: трубопровод, теплоизоляция газопроводов и нефтепроводов, мерзлый грунт, температурное поле грунта.

.....

Yu.D. Zemenkov, Tyumen State Oil and Gas University (Tyumen, Russia), Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of the Chair for Transportation of Hydrocarbon Resources of the Institute of Transport; **B.V. Moiseev**, Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering (Tyumen, Russia), Doctor of Sciences (Engineering), Professor; **S.M. Dudin**, Tyumen State Oil and Gas University (Tyumen, Russia), Assistant, e-mail: srghome@mail.ru; **N.V. Nalobin**, Tyumen State Oil and Gas University (Tyumen, Russia), Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor

Algorithm design of frozen ground thermal field definition round pipelines

Development of the infrastructure of oil and gas fields require construction of different pipelines (water, gas and oil pipelines) by means of underground laying. When using pipelines in frozen soils, heat exchange between them and formation of a melted area occur that causes pipeline deformation. The building and operating conditions of pipelines are to a considerable extent connected with their temperature conditions. Due to this it is necessary to know the regularities of formation of the thawing haloes around the pipelines. The problems connected with construction of pipelines in the permanently frozen soils are considered in the articles. There are methods of limitation of ecological disturbances when constructing and operating the pipelines [2, 4, 5]. The efficiency of each of them is determined based on the calculations

of heat and mass transfer in the natural environment that allow to forecast soil settlement and expansion and consequently pipeline deformations arising herewith. One of the methods of limitation of the pipeline thermal effect on the frozen soil is use of heat insulation.

In order to maintain process media required parameters in pipelines they are covered with heat insulation.

In order to choose an optimal pipeline insulation thickness it is necessary to have a calculation method. A great influence on oil and gas pipeline operating mode parameters is exerted by the soil thermal field around the pipelines.

Therefore, determination of the regularities of formation of the thawing haloes around the pipelines and determination of the optimal conditions of their laying for construction in the areas with permanently frozen soils in the north of the Tyumen Region is a quite a vital task [2, 3, 5].

In order to determine the frozen soil thermal field the authors developed an algorithm and obtained a dependence using Novy Urengoy as an example. Some tasks were solved and dependence diagrams were constructed based on the obtained dependences.

The studies and the made calculations on the underground pipeline laying allowed to the authors to give recommendations aimed at the pipeline reliability growth.

Keywords: pipeline, gas and oil pipeline heat insulation, frozen soil, soil thermal field.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для построения температурного поля мерзлого грунта был разработан алгоритм. Сезонное изменение температуры на поверхности грунта было представлено в следующем виде:

$$t_n(\tau) = A \sin\left(\frac{\pi\tau}{\tau_x}\right),$$

где τ – время отсчета с момента наступления холодного периода, в днях или месяцах, τ_x – продолжительность холодного периода сезонного изменения температуры ($\tau_x=236$ суток или $\tau_x=7,76$ месяца для района Новый Уренгой, $A=-26,9$ °С – амплитуда колебания температуры наружного воздуха).

Глубина сезонного промерзания или уровень ВМГ (вечномерзлых грунтов) $H_T=2$ м для песчаных грунтов или $H_T=1,7$ м для глинистых грунтов. Зависимость глубины промерзания от времени

$$H_M(\tau) = H_T \sqrt{\frac{\tau}{\tau_x}}.$$

Зависимость температуры на глубине заложения трубопровода тогда можно представить в следующей форме:

$$t_h = t_n(\tau) \left(1 - \frac{h}{H_M(\tau_x)}\right).$$

После подстановки $t_n(\tau)$ в это выражение получим:

$$t_h = A \sin\left(\frac{\pi\tau}{\tau_x}\right) \left(1 - \frac{h}{H_M(\tau)}\right). \quad (1)$$

Кроме того, время, когда фронт температуры будет на глубине заложения, определяется из

$$\tau_0 = \tau_x \left(\frac{h}{H_T}\right)^2.$$

Таким образом, изменения температуры на глубине заложения трубопровода h можно рассчитать по следующей зависимости. Наиболее холодная температура

на этой глубине равна минимуму данной функции, и именно она будет участвовать в дальнейших расчетах.

$$t_h = \begin{cases} 0; & \tau < \tau_0 \\ A \sin\left(\frac{\pi\tau}{\tau_x}\right) \left(1 - \frac{h}{H_M(\tau)}\right); & \tau_0 \leq \tau \leq \tau_x \\ 0; & \tau > \tau_x \end{cases} \quad (2)$$

На следующем этапе найдем толщину изоляции, обеспечивающей приемлемое качество доставки теплоносителя, которое определяется условием заданного

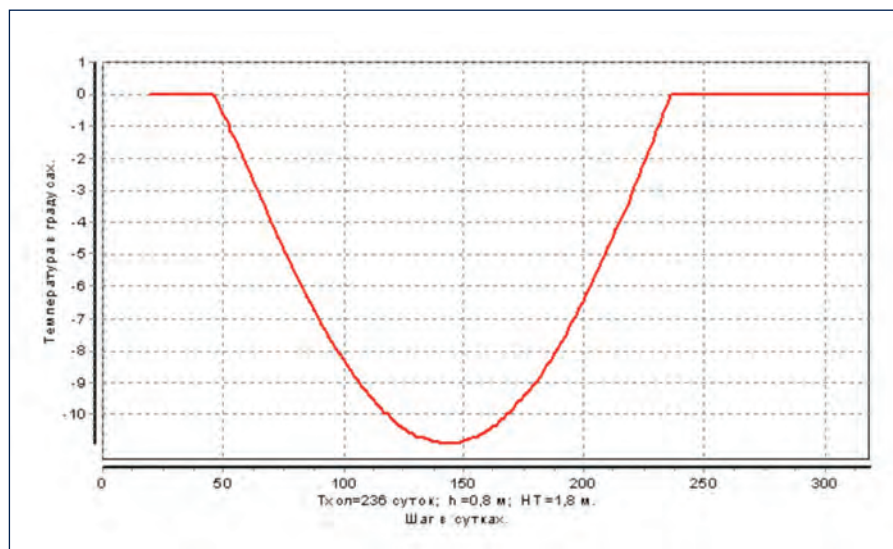


Рис. 1. График зависимости температуры грунта от времени на глубине заложения h
Fig. 1. The diagram of dependence of the soil temperature on the time at the laying depth h

Ссылка для цитирования (for references):

Земенков Ю.Д., Моисеев Б.В., Дудин С.М., Налобин Н.В. Разработка алгоритма построения температурного поля мерзлого грунта вокруг трубопроводов // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2015. № 9. С. 112–117.

Zemenkov Yu.D., Moiseev B.V., Dudin S.M., Nalobin N.V. Algorithm design of frozen ground thermal field definition round pipelines (In Russ.). *Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory*, 2015, No. 9. P. 112–117.

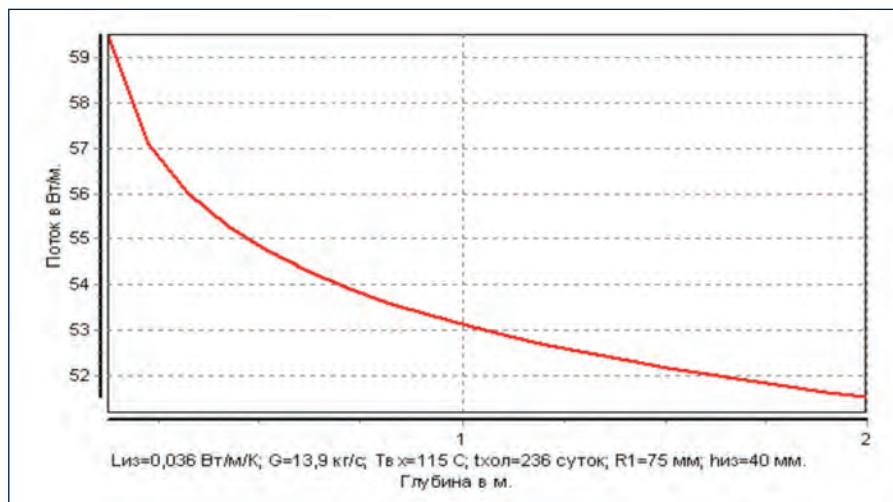


Рис. 2. График зависимости потока теплоты с поверхности трубы от глубины заложения
Fig. 2. The diagram of dependence of the pipe surface heat flow on the laying depth

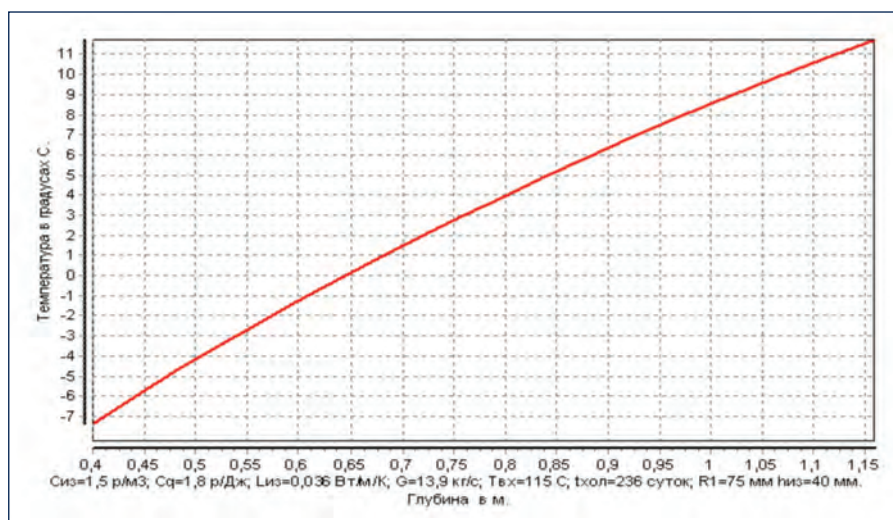


Рис. 3. График зависимости температуры на поверхности трубы от глубины заложения
Fig. 3. The diagram of dependence of the pipe surface temperature on the laying depth

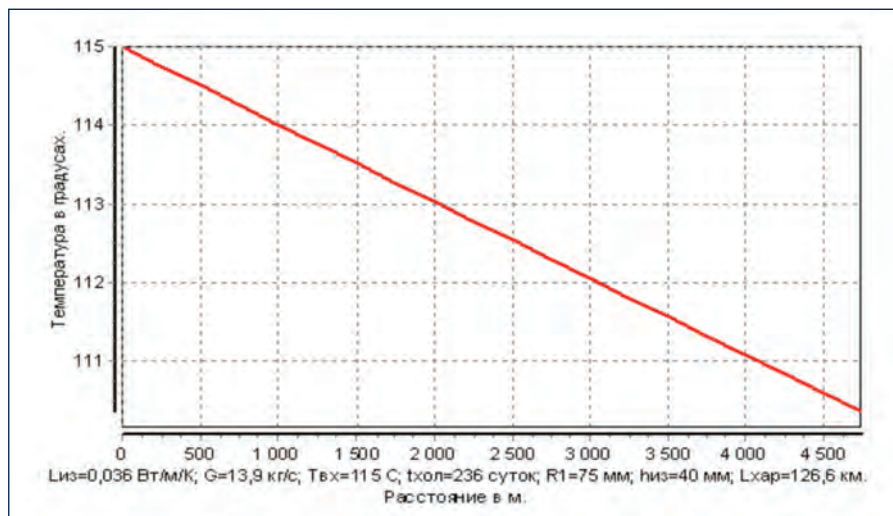


Рис. 4. График зависимости температуры жидкости от расстояния
Fig. 4. The diagram of dependence of the liquid temperature on the distance

уровня падения температуры теплоносителя по длине трубопровода $t' - t'' < \Delta t_0$, t' – температура на входе, t'' – температура на конце трубопровода, $\Delta t_0 \approx 7^\circ\text{C}$ – допустимое падение температуры.

Для определения температуры на поверхности изоляции составим уравнение баланса тепловых потоков.

Поток со стороны горячей воды к поверхности трубы

$$q_1 = \frac{2\pi\lambda_{из}(t_ж - t_г)}{\ln \frac{D_H + 2\delta_{из}}{D_H}} = \frac{2\pi\lambda_{из}(t_ж - t_г)}{\alpha} \quad (3)$$

Поток со стороны горячей трубы к мерзлому грунту

$$q_1 = \frac{2\pi\lambda_{гр}(t_г - t_г)}{\ln \left[\frac{2h}{D_H + 2\delta_{из}} + \sqrt{\left(\frac{2h}{D_H + 2\delta_{из}} \right)^2 - 1} \right]} = \frac{2\pi\lambda_{гр}(t_г - t_г)}{\beta} \quad (4)$$

Уравнение баланса в данном случае можно записать

$$\frac{q_1\alpha}{2\pi\lambda_{из}} + \frac{q_1\beta}{2\pi\lambda_{гр}} = t_ж - t_г,$$

где $\lambda_{гр}$ – усредненная теплопроводность, равная среднему значению мерзлого и талого грунта.

Отсюда можно получить значение величины потока

$$q_1 = \frac{t_ж - t_г}{\frac{\alpha}{2\pi\lambda_{из}} + \frac{\beta}{2\pi\lambda_{гр}}} \quad (5)$$

Зная поток, можно рассчитать температуру грунта в месте заложения трубопровода:

$$t_г = t_ж - \frac{\alpha q_1}{2\pi\lambda_{из}} \quad (6)$$

Падение температуры жидкости по длине трубопровода можно найти по следующей формуле:

$$t_ж(x) = t_г + (t' - t_г) \exp\left(-\frac{x}{1_{хар}}\right), \quad (7)$$

$$\text{где } 1_{хар} = GC_{ж} R = GC_{ж} \left(\frac{\alpha}{2\pi\lambda_{из}} + \frac{\beta}{2\pi\lambda_{гр}} \right). \quad (8)$$

Температура на конечном пункте потребления

$$t''(x) = t_ж''(x) = t_г + (t' - t_г) \exp\left(-\frac{L}{1_{хар}}\right), \quad (9)$$

где L – общая длина трубопровода.

Было выполнено решение некоторых задач, сформулированных на основе перечисленных зависимостей.

1. Определение температуры грунта в месте заложения подземного трубопровода.

Находим минимум температуры, установившейся в процессе промерзания $t_{гр}$. Для этого строим график зависимости $t_n(\tau)$ с некоторым шагом по времени (рис. 1). В этом пункте определяется минимальная температура грунта $t_{гр}$, связанная с природным влиянием холодного климатического изменения температуры воздуха на поверхности земли. Получен для Нового Уренгоя следующий ход изменения температуры грунта на глубине заложения трубопровода.

2. Определение температуры на поверхности трубы и теплового потока при известной толщине изоляции.

В зависимости от толщины изоляции $\delta_{из}$, которую задаем, например, по СНиП [4, 5], используя известные значения $t_{ж}$ и $t_{гр}$, определяем из уравнения баланса потоков тепла поток от теплой трубы, направленный в грунт, и температуру на поверхности изоляции трубопровода. Для этого найдем α , β , определим суммарное сопротивление R и

$$q_1 = \frac{t_{ж} - t_{гр}}{R}, \quad (10)$$

$$\text{где } R = \frac{\alpha}{2\pi\lambda_{из}} + \frac{\beta}{2\pi\lambda_{гр}}, \quad (11)$$

$$\alpha = \ln \frac{D_H + 2\delta_{из}}{D_H}; \quad (12)$$

$$\beta = \ln \left(\frac{2h}{D_H + 2\delta_{из}} + \sqrt{\left(\frac{2h}{D_H + 2\delta_{из}} \right)^2 - 1} \right)$$

определяются геометрическими размерами трубы и изоляционного слоя.

ТАКИМ ОБРАЗОМ, МОЖНО ПОСТРОИТЬ:

- зависимость потока q_1 от глубины заложения в мерзлый грунт h при фиксированной толщине изоляции $\delta_{из}$ (рис. 2);
- зависимость температуры на поверхности трубы t_1 от h при $\delta_{из}$ (рис. 3);
- зависимость температуры жидкости в трубопроводе от расстояния при заданных параметрах конструкции определяется по формуле

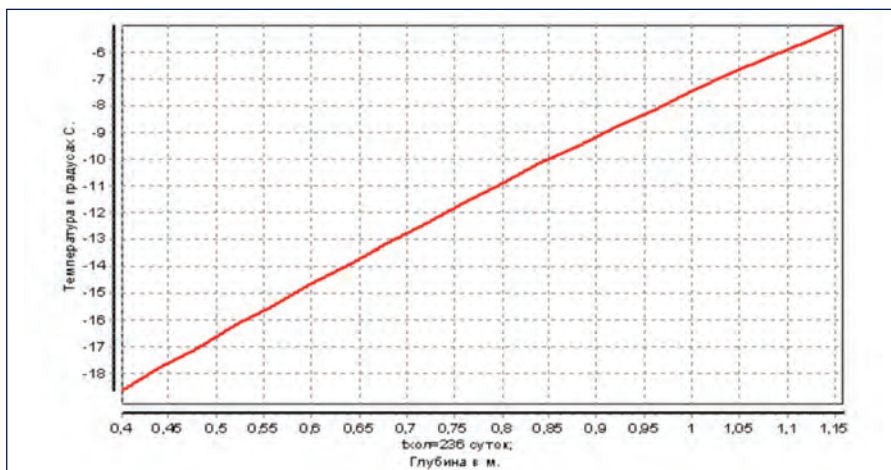


Рис. 5. График зависимости температуры грунта от глубины
Fig. 5. The diagram of dependence of the soil temperature on the depth

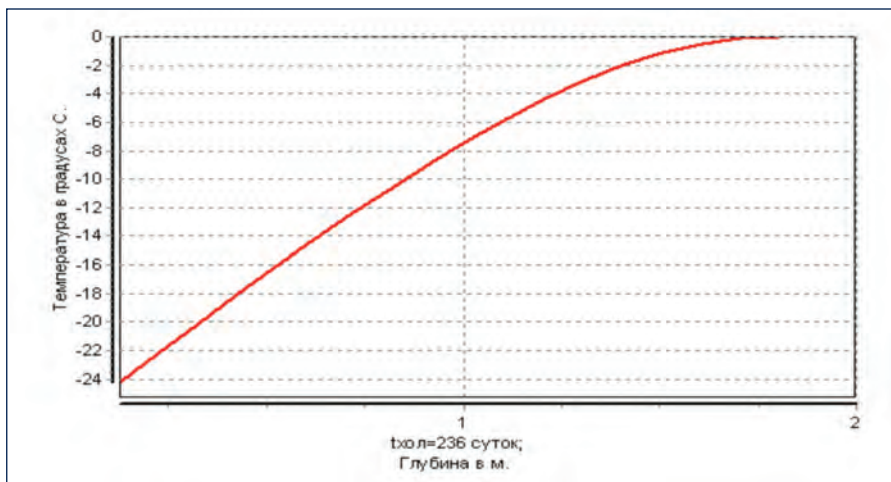


Рис. 6. График зависимости температуры грунта от глубины
Fig. 6. The diagram of dependence of the soil temperature on the depth

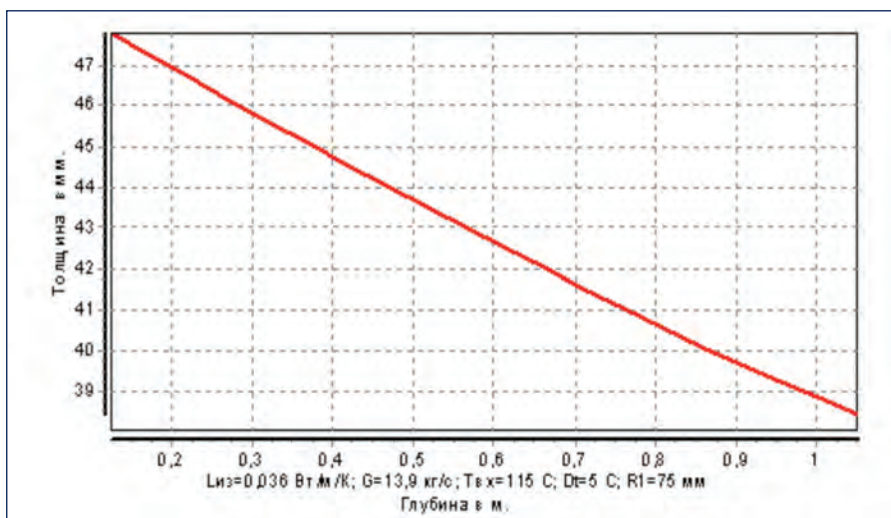


Рис. 7. График зависимости толщины изоляции от глубины заложения при заданном перепаде температур
Fig. 7. The diagram of dependence of the insulation thickness on the laying depth at the specified temperature difference

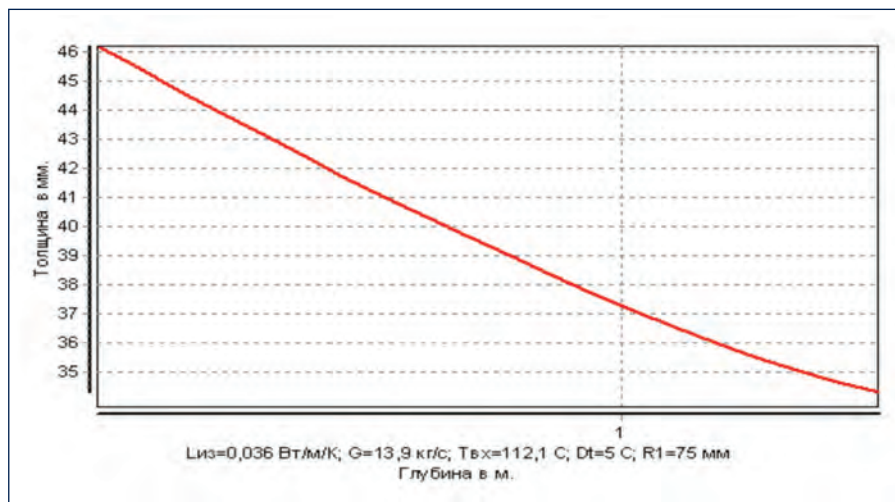


Рис. 8. График зависимости толщины изоляции от глубины заложения при заданном перепаде температур

Fig. 8. The diagram of dependence of the insulation thickness on the laying depth at the specified temperature difference

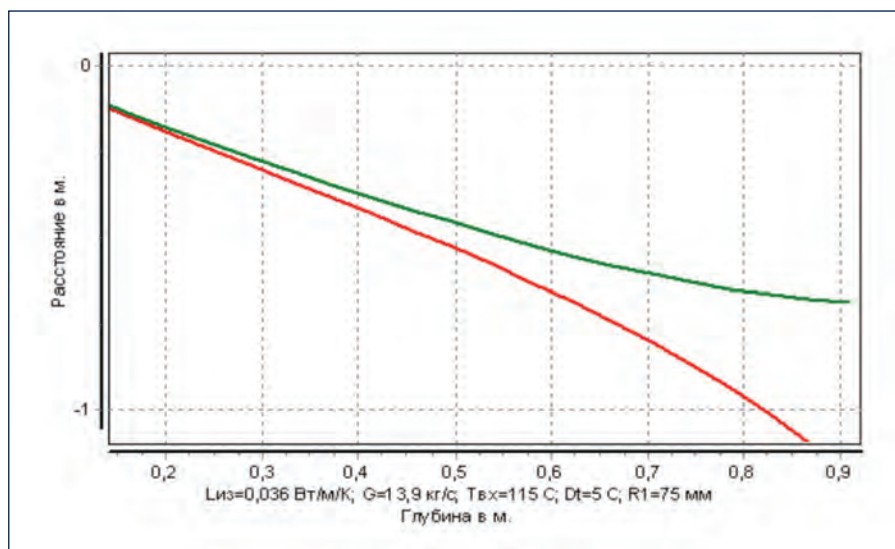


Рис. 9. График зависимости зон оттаивания от глубины заложения

Fig. 9. The diagram of dependence of the thawed zones on the laying depth

$$t_{ж}(x) = t_{гр} + (t' - t_{гр}) \exp\left(-\frac{x}{1_{хар}}\right). \quad (13)$$

По результатам расчета построен график (рис. 4);

• зависимость температуры грунта на глубине закладки трубопровода (рис. 5 и 6).
3. Определение толщины изоляции в зависимости от глубины заложения

$$R = \ln\left(\frac{D_H + 2\delta_{из}}{D_H}\right)^{\frac{1}{2\pi\lambda_{из}}} + \ln\left(\frac{2h}{D_H + 2\delta_{из}} + \sqrt{\left(\frac{2h}{D_H + 2\delta_{из}}\right)^2 - 1}\right)^{\frac{1}{2\pi\lambda_{гр}}}, \quad (19)$$

$$R = \ln\left(\left(\frac{D_H + 2\delta_{из}}{D_H}\right)^{\frac{1}{2\pi\lambda_{из}}} \left(\frac{2h}{D_H + 2\delta_{из}} + \sqrt{\left(\frac{2h}{D_H + 2\delta_{из}}\right)^2 - 1}\right)^{\frac{1}{2\pi\lambda_{гр}}}\right), \quad (20)$$

$$\left(\frac{D_H + 2\delta_{из}}{D_H}\right)^{\frac{1}{2\pi\lambda_{из}}} \left(\frac{2h}{D_H + 2\delta_{из}} + \sqrt{\left(\frac{2h}{D_H + 2\delta_{из}}\right)^2 - 1}\right)^{\frac{1}{2\pi\lambda_{гр}}} = e^R. \quad (21)$$

при заданном уровне тепловых потерь (температурном перепаде).

Пусть при известной длине трубопровода L задан конечный перепад температур Δt_0 , или допустимое падение температуры теплоносителя, или, как возможный вариант, температура в конечном пункте потребления t'' .

Связь с перепадом температур Δt_0 и t'' устанавливается из следующих соотношений. Так как

$$t''_{ж}(x) = t_{гр} + (t' - t_{гр}) \exp\left(-\frac{x}{1_{хар}}\right), \quad (14)$$

$$\text{то } \Delta t_0 = |t' - t''_{ж}(x)| = (t' - t_{гр}) \left(1 - \exp\left(-\frac{L}{1_{хар}}\right)\right),$$

где t' – температура на входе, а t'' – температура теплоносителя в пункте потребления. Отсюда найдем

$$\exp\left(-\frac{L}{1_{хар}}\right) = 1 - \frac{\Delta t_0}{t' - t_{гр}}, \text{ или}$$

$$\left(\frac{L}{1_{хар}}\right) = -\ln\left(1 - \frac{\Delta t_0}{t' - t_{гр}}\right), \text{ или}$$

$$L_{хар} = \frac{-L}{\ln\left(1 - \frac{\Delta t_0}{t' - t_{гр}}\right)}. \quad (15)$$

$$Gc_{ж}R = \frac{-L}{\ln\left(1 - \frac{\Delta t_0}{t' - t_{гр}}\right)}. \quad (16)$$

Зная общее сопротивление теплопередаче R , а именно

$$R = \frac{-L}{Gc_{ж} \ln\left(1 - \frac{\Delta t_0}{t' - t_{гр}}\right)},$$

найдем из нелинейного уравнения (17)

$$R = \frac{\ln\left(\frac{D_H + 2\delta_{из}}{D_H}\right) + \ln\left(\frac{2h}{D_H + 2\delta_{из}} + \sqrt{\left(\frac{2h}{D_H + 2\delta_{из}}\right)^2 - 1}\right)}{2\pi\lambda_{из}} + \frac{\ln\left(\frac{2h}{D_H + 2\delta_{из}} + \sqrt{\left(\frac{2h}{D_H + 2\delta_{из}}\right)^2 - 1}\right)}{2\pi\lambda_{гр}} \quad (18)$$

величину $\delta_{из}$ с учетом того, что все остальные величины считаются фиксированными (19–21).

Корень данного уравнения $\delta_{из}$ был найден методом половинного деления. В результате получена следующая зависимость для начального (рис. 7) и произвольного сечения (рис. 8).

Последний пункт обсуждения данной задачи связан с расчетом зависимости верхней и нижней зон оттаивания

в зависимости от глубины заложения трубопровода.
Зная расчетные величины температур грунта и температуры на поверхности трубы, из

$$\frac{y+\sqrt{h^2-r^2}}{y-\sqrt{h^2-r^2}} = \pm \exp\left(-\frac{t_{rp} \ln\left(\frac{2h}{r}\right)}{\frac{\lambda_M}{\lambda_T} t_T - t_{rp}}\right) \quad (22)$$

определим при разных знаках правой части соответственно глубины верхней и нижней зон фронта оттаивания при разной глубине заложения. Из расчетов, проведенных выше, были определены равновесные температуры грунта и на поверхности трубы.

$$\frac{y+\sqrt{h^2-r^2}}{y-\sqrt{h^2-r^2}} = \pm D; \quad (23)$$

$$y+\sqrt{h^2-r^2} = \pm D(y-\sqrt{h^2-r^2}). \quad (24)$$

Для варианта с плюсом

$$y+\sqrt{h^2-r^2} = D(y-\sqrt{h^2-r^2});$$

$$y(1-D) = (-1-D)\sqrt{h^2-r^2}$$

размер зоны определится частным следующим типа

$$y = \frac{(-1-D)\sqrt{h^2-r^2}}{1-D}. \quad (25)$$

Для варианта с минусом

$$y+\sqrt{h^2-r^2} = -D(y-\sqrt{h^2-r^2}); \quad (26)$$

$$y(1+D) = (-1+D)\sqrt{h^2-r^2}; \quad (27)$$

$$y = \frac{(-1+D)\sqrt{h^2-r^2}}{1+D}, \quad (28)$$

$$\text{где } D = \pm \exp\left(-\frac{t_{rp} \ln\left(\frac{2h}{r}\right)}{\frac{\lambda_M}{\lambda_T} t_T - t_{rp}}\right). \quad (29)$$

Вариант расчета показан на графике (рис. 9).

Выводы

Исследования и выполненные расчеты по подземной прокладке трубопроводов позволили авторам дать рекомендации, направленные на снижение энергопотребления и увеличение надежности трубопроводов.

Исследования выполнялись на основании целевой и комплексной программы «Нефть и газ Западной Сибири».

Литература:

1. Моисеев Б.В., Земенков Ю.Д., Торопов С.Ю. Промышленная теплоэнергетика: учебник. Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. 236 с.
2. Илюхин К.Н., Налобин Н.В. Повышение энергоэффективности и снижение теплотерь в системах теплоснабжения нефтегазовых объектов на севере Западной Сибири. СПб.: ООО «Недра», 2007. 114 с.: илл.
3. Земенков Ю.Д., Моисеев Б.В., Илюхин К.Н., Налобин Н.В. Математическая модель температурного режима трубопроводов в вечномерзлых грунтах // Известия вузов. Нефть и газ. 2012. № 4. С. 96–99.
4. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. М.: Госстрой, 2004. 29 с.
5. Исследование тепловых процессов на объектах трубопроводного транспорта: Учебное пособие / Под общей редакцией Ю.Д. Земенкова. Тюмень: Издательство «Вектор Бук», 2008. 224 с.

References:

1. Moiseyev B.V., Zemenkov Yu.D., Toropov S.Yu. *Promyshlennaja teplojenergetika* [Industrial Thermal Power Engineering]. Text book. Tyumen State Oil and Gas University, 2014. 236 pp.
2. Ilyukhin K.N., Nalobin N.V. *Povyshenie jenergojefektivnosti i snizhenie teplopoter' v sistemah teplosnabzhenija neftegazovyh ob'ektov na severe Zapadnoj Sibiri* [Energy efficiency increase and heat loss decrease in heat supply systems of oil and gas facilities in the north of the Western Siberia]. Saint-Petersburg, Nedra Publ. LLC, 2007. 114 pp. with ill.
3. Zemenkov Yu.D., Moiseyev B.V., Ilyukhin K.N., Nalobin N.V. *Matematicheskaja model' temperaturnogo rezhima truboprovodov v vechnomerzlyh gruntah* [Permanently frozen soil pipeline temperature conditions mathematical model]. *Izvestija vuzov. Neft' i gaz = Universities news. Oil and gas*, 2012, No. 4. P. 96–99.
4. SNiP 41-03-2003. *Teplovaja izoljacija oborudovanija i truboprovodov* [Heat insulation of equipment and pipelines]. Moscow, Gosstroy, 2004. 29 pp.
5. *Issledovanie teplovyh processov na ob'ektah truboprovodnogo transporta: Uchebnoe posobie* [Pipeline transport facility thermal process study]. Textbook. Ed. by Yu.D. Zemenkov. Tyumen, Vector Book Publishing House, 2008. 224 pp.



**НАДЕЖНЫЕ
СТРАТЕГИИ
ЗАЩИТЫ**

РОССИЙСКИЙ
РАЗРАБОТЧИК
И ПРОИЗВОДИТЕЛЬ
противокоррозионных
и огнезащитных
лакокрасочных
материалов
марки Акрус®,
специального
и промышленного
назначения.



Мы производим только защитные покрытия. Это позволяет нам концентрироваться на особенностях их изготовления и потребления.

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ:

- ▶ Нефтехимическая индустрия
- ▶ Нефтегазодобывающая промышленность
- ▶ Судостроение
- ▶ Машиностроение
- ▶ Мостостроение
- ▶ Гражданское строительство
- ▶ Огнезащитные покрытия



на правах рекламы



www.akrus.pф
www.akrus-akz.ru
info@akrus-akz.ru
117420, г. Москва,
ул. Намёткина, д. 10Б
тел./факс: +7(495) 363 5669