

Теплосиловое взаимодействие горячих подземных трубопроводов с многолетнемерзлыми грунтами

С.С. Примаков, к.т.н.

(ОАО Институт «Нефтегазпроект»),

В.Е. Вершинин

(ООО НПП «Арктика»),

И.А. Жолобов

(ОАО «Гипротюменнефтегаз», Группа ГМС)

Адрес для связи: ZholobovIgor@yandex.ru,

PrimakovSS@yandex.ru,

Arctica@utmn.ru

Ключевые слова: тепловое взаимодействие с трубопроводами, тепловой расчет, прочностной расчет, ореол оттаивания, неравномерная осадка, многолетнемерзлые грунты.

При сооружении и эксплуатации трубопроводов в сложных геокриологических условиях возникает необходимость оценки устойчивости грунтов основания при их взаимодействии с горячими подземными трубопроводами. Как правило, надежность проектируемого подземного трубопровода определяется с помощью прочностного расчета на его устойчивость с учетом рельефа и свойств подстилающего и насыпного грунтов. Такой расчет выполняется один раз и определяет профиль трубопровода с учетом его естественного изгиба в процессе строительства. При эксплуатации перемещение грунтов отсутствует, и положение трубопровода не изменяется, поэтому прогнозные прочностные расчеты остаются актуальными.

Когда трубопровод с теплым или горячим продуктом проходит по многолетнемерзлым грунтам (ММГ), ситуация принципиально отличается. При тепловом взаимодействии трубопровода с ММГ происходят оттаивание и осадка, т.е. перемещение грунтов. Скорость и степень таких перемещений определяются теплотехническим расчетом, однако их последствия нигде не оцениваются. Например, из СП 25.13330.2012 не ясно, какие размеры ореолов или какие величины осадок опасны для трубопроводов, работающих в тех или иных условиях. Степень этой опасности однозначно связана с прочностными характеристиками трубы. Чем она прочнее, тем менее опасны для трубопровода перемещения грунта. Кроме того, очевидно, что напряжения в трубе вызывает не сама осадка, а ее неравномерность, которая определяет дополнительные вертикальные изгибы трубопровода. Поэтому в качестве рекомендаций из теплотехнических расчетов не может использоваться какая-то одна величина максимально допустимой осадки, обеспечивающая надежность трубопровода с заданными прочностными характеристиками.

Thermal power interaction hot buried pipeline with permafrost soils

S.S. Primakov (Institute Neftgazproject, RF, Tyumen),

V.E. Vershinin (Research and Production Enterprise Arctica LLC, RF, Tyumen),

I.A. Zholobov (Giprotyumenneftgaz OAO, HMS Group, RF, Tyumen)

E-mail: ZholobovIgor@yandex.ru,

PrimakovSS@yandex.ru,

Arctica@utmn.ru

Key words: thermal power interaction with pipeline, thermal design, strength calculation, halo thawing, irregular settling, numerical work, permafrost soils.

Pipeline integrity and the preservation of its design position, one of the key tasks in pipeline transport. To assess the reliability of the hot buried pipelines on permafrost, strength calculation should be performed together with thermal design. The research paper suggests a method of calculating the irregularity of subsidence of soil thawing and its impact on the stresses in the pipe wall. Software package is created for development of technical solutions to ensure reliable operation of the pipeline.

Оценка надежности трубопровода может определяться только при решении задачи, включающей две части. Первая часть – прочностная – решается в квазистационарной постановке и определяет предельные значения неоднородности осадки грунта, не вызывающие критических напряжений в стенке трубопровода. Вторая часть – тепловая – решается численно (согласно п. 13.7 СП 25.13330.2012) в нестационарной постановке и определяет ореолы, осадку грунта и степень ее неоднородности по всей длине трубы в период эксплуатации. От результатов решения первой части задачи зависят параметры решения второй. В свою очередь, анализируя решение второй части задачи с учетом критерия, полученного в первой, можно определить не только участки, на которых труба будет испытывать предельные деформации, но и время возникновения деформации. Последнее связано с тем, что сильнольдистые просадочные грунты могут залежать на разной глубине и оттаивать в различные моменты времени, т.е. тогда, когда будут вовлечены в ореолы растепления, продвигающиеся в разных грунтах с разными скоростями.

Авторами предлагается методика оценки влияния возникающих в результате оттаивания осадок на напряженно-деформированное состояние (НДС) трубопровода и, как следствие, на надежность его эксплуатации. Прочностной расчет выполняется для определения условий возникновения критических напряжений в подземном трубопроводе при моделировании осадки грунта на некотором просадочном участке трассы. При определенных условиях и небольшой протяженности просадочного участка труба будет провисать над просевшим грунтом на боковых непросадочных участках при любой величине осадки грунта. Однако, начиная с некоторой длины участка просадочного грунта, величина осадки может вызывать критические напряжения в трубопроводе.

Исследование было выполнено для участка трассы подземного трубопровода с определенными прочностными свойствами трубы, физико-механическими и теплофизическими свойствами грунтов и взаимным расположением трубопровода относительно поверхности и слоев грунта. Для разных по длине просадочных участков критические осадки принимают различные значения, поэтому проведено исследование, позволяющее определить зависимость напряжений в трубопроводе от величины осадки и длины просадочного участка (рис. 1).

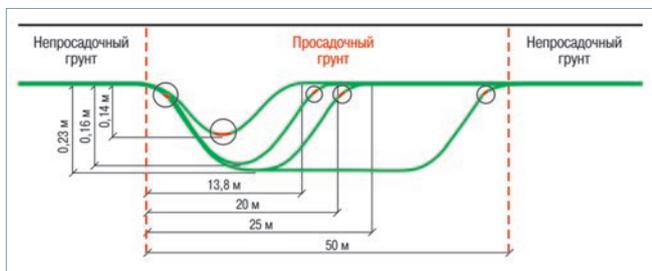


Рис. 1. Схематическое изображение модели участка трубопровода (красным цветом выделено место возникновения недопустимых напряжений в трубе)

При моделировании осадки грунта трасса делится на три участка. Боковые непросадочные участки имеют достаточно большую длину для уменьшения краевого эффекта, длина центрального просадочного участка варьируется с некоторым шагом для построения зависимости допустимой осадки от длины просадочного участка. Для расчета были приняты следующие характеристики трубы: наружный диаметр – 530 мм; толщина стенки трубы – 10 мм; материал трубы – сталь 09Г2С; рабочее давление – 4 МПа; температура перекачиваемого продукта – 35 °С; глубина заложения до верхней образующей трубы – 0,8 м; перекачиваемая жидкость – нефтепродукты. Для каждой длины просадочного участка с некоторым шагом варьируется величина осадки грунта и определяется напряжение в трубопроводе. Когда напряжения превышают критическое, осадка считается недопустимой.

Прочность может оцениваться, например, по методике, описанной в работе [1], в которой условия прочности проверяются исходя из следующих соотношений.

1. Кольцевые напряжения на нейтральной оси

$$\frac{|\sigma_{2,0}|}{\psi_1} < R_1. \quad (1)$$

2. Продольные напряжения на нейтральной оси

$$\max \left\{ \frac{|\sigma_{1,0}|}{\psi_2}; \sigma_{\text{экр}}^{\text{ос}} \right\} < R_1. \quad (2)$$

3. Напряжения в растянутой зоне

$$\max \left\{ \frac{|\sigma_{2,\text{раст}}|}{\psi_3}; \sigma_{\text{экр}}^{\text{раст}} \right\} < R_2^{\text{рп}}. \quad (3)$$

4. Напряжения в сжатой зоне

$$\max \left\{ \frac{|\sigma_{2,\text{ск}}|}{\psi_4}; \sigma_{\text{экр}}^{\text{ск}} \right\} < R_2^{\text{рп}}. \quad (4)$$

Здесь $\sigma_{2,0}$ – кольцевое напряжение от внутреннего давления, 10^{-1} МПа; $\sigma_{1,0}$ – продольное напряжение, вызванное продольной

силой и внутренним давлением, 10^{-1} МПа; $\sigma_{\text{экр}}^{\text{ос}} = \sqrt{\sigma_{1,0}^2 - \sigma_{1,0} \sigma_{2,0} + \sigma_{2,0}^2}$ – эквивалентное напряжение на нейтральной оси, 10^{-1} МПа; $\sigma_{2,\text{раст}}$ – главное напряжение в растянутой зоне, 10^{-1} МПа; $\sigma_{\text{экр}}^{\text{раст}}$ – эквивалентное напряжение в растянутой зоне от всех воздействий в рабочем состоянии, 10^{-1} МПа; $\sigma_{2,\text{ск}}$ – главное напряжение в сжатой зоне, 10^{-1} МПа; $\sigma_{\text{экр}}^{\text{ск}}$ – эквивалентное напряжение в сжатой зоне от всех воздействий в рабочем состоянии, 10^{-1} МПа; $R_1, R_2^{\text{рп}}$ – расчетные сопротивления материала, 10^{-1} МПа; $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ – коэффициенты, учитывающие двухосное напряженное состояние.

Данная методика отвечает требованиям СНиП 2.05.06-85 и реализована в программе «Старт» ООО «НТП Трубопровод» [1]. С помощью предложенного алгоритма определяется зависимость допустимой просадки от длины просадочного участка (рис. 2). Из рис. 2 видно, что для длины просадочного участка 13,7 м и менее критические напряжения в трубе будут отсутствовать при любой осадке грунта, что показывает серия прочностных расчетов. Это объясняется тем, что собственная жесткость трубы позволяет выдерживать все заданные нагрузки: собственный вес трубы, продукта, вышележащего грунта без поддержки грунта снизу. При этом изгиб трубопровода не превышает критических значений, при которых возникают недопустимые напряжения в трубе.

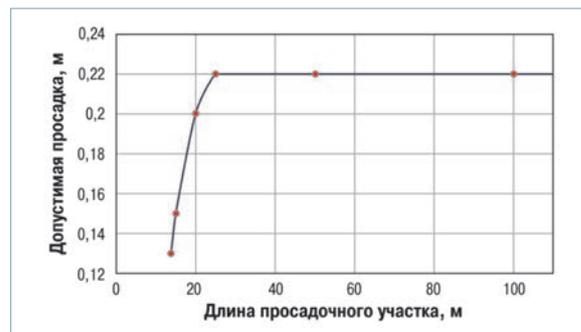


Рис. 2. Зависимость максимально допустимых просадок моделируемого трубопровода от длины просадочного участка

Для инженерного расчета был выбран наихудший вариант, т.е. для определения расчетного шага по длине рассмотрен просадочный участок с минимальной длиной, на котором достигается критическое значение осадки грунта. Поскольку в процессе таяния грунта при эксплуатации трубопровода осадки на разных участках могут быть неодинаковыми не только в пространстве, но и во времени, оценку их неравномерности необходимо проверять на каждом временном шаге. С точки зрения расчета шаг по времени должен быть таким, чтобы точность расчета была выше определяемого значения. В связи с этим шаг по времени принимался таким, чтобы увеличение осадки на каждом отдельном участке не превышало максимально допустимую осадку, равную 0,13 м. Проведенные расчеты показали, что шаг по времени, удовлетворяющий данному условию, равен 1,5 мес.

В тепловом расчете определялся ореол оттаивания вокруг теплового заглубленного трубопровода в поперечном сечении в двумерной постановке, поскольку переносом тепла в грунте вдоль оси трубопровода можно пренебречь вследствие малого изменения температуры продукта на расчетном участке выбранной характерной длины. Темпе-

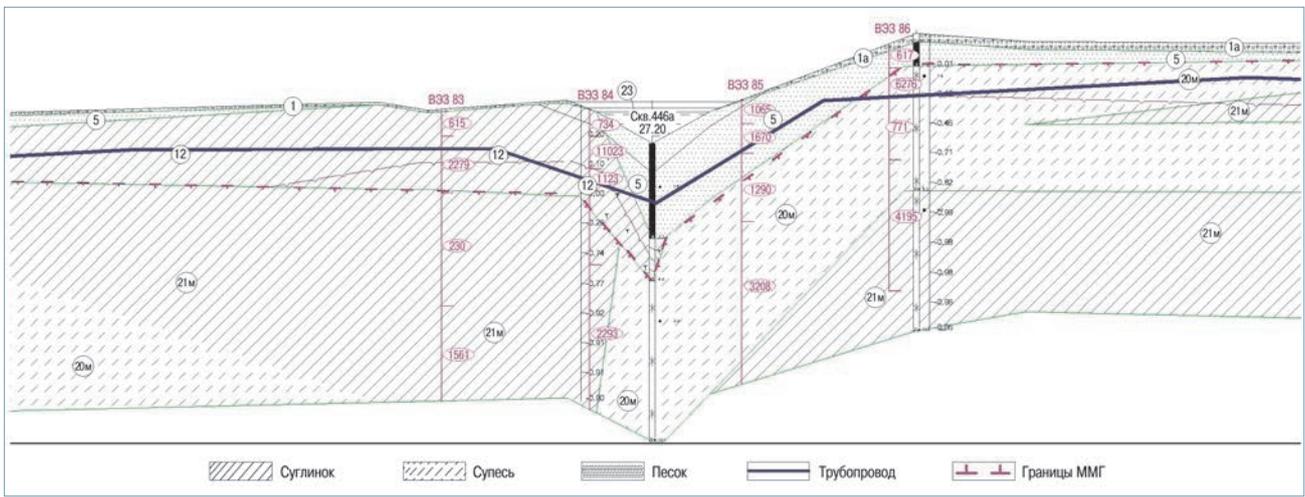


Рис. 3. Геологический профиль моделируемого участка трубопровода

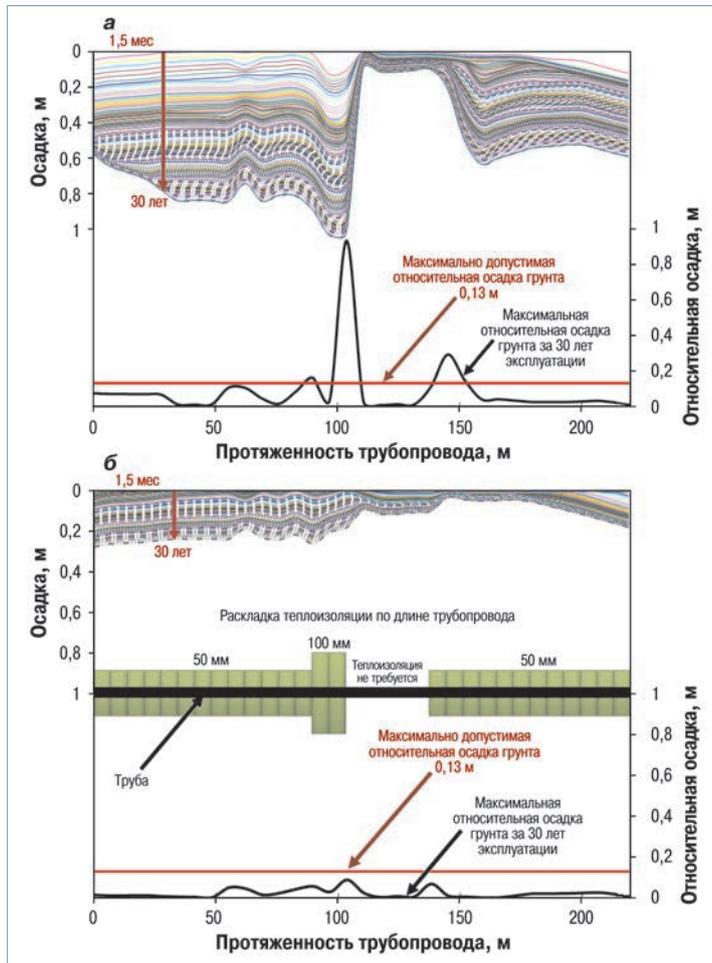


Рис. 4. Зависимость абсолютного и максимальных значений относительной осадки от протяженности трубопровода за 30 лет эксплуатации без проведения мероприятий (а) и с использованием теплоизоляции (б)

ратурное поле грунта при нестационарных условиях теплообмена в предположении, что процессы таяния и кристаллизации влаги происходят равномерно в заданном интервале температур, приведено, например, в работе [2] и описывается уравнением теплопроводности

$$C(x, y, T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda(x, y, T) \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda(x, y, T) \frac{\partial T}{\partial y}). \quad (5)$$

где $C(x, y, T)$ – объемная теплоемкость; x, y – соответственно горизонтальная и вертикальная координата; T – искомая функция распределения абсолютной температуры; t – время; $\lambda(x, y, T)$ – коэффициент теплопроводности.

Теплопроводность и теплоемкость принимаются в зависимости от температуры грунта (мерзлого или талого), в точке фазового перехода определяются из соотношения долей талого и мерзлого грунтов в расчетном объеме. Дискретный аналог получается путем интегрирования уравнения (5) по объему и времени, определенным прочностным расчетом. Сетка модели равномерная, прямоугольная. Расчетная схема явная. Проведенные расчеты позволяют проследить прогноз динамики формирования ореола оттаивания и осадку с заданным шагом по длине и времени, а также относительные перемещения грунта, обуславливающие возникновение напряжений трубопровода в каждый момент времени в течение всего периода эксплуатации.

В задаче учитываются фазовый переход, сложные условия теплообмена на поверхности (переменная высота снежного покрова, солнечная радиация и др.), неоднородность грунта по вертикали, латерали, а также его теплофизические и физико-механические свойства. Расчеты могут быть выполнены, например, по методике, описанной в работе [3] с учетом указанных сложных условий теплообмена на поверхности. Геологический профиль моделируемого участка трубопровода представлен на рис. 3.

Для иллюстрации были выполнены два расчета. Первый расчет показывает ситуацию, которая сложится вокруг трубопровода при отсутствии каких-либо мероприятий. Осадка грунта может определяться из работы [4]. Полученные зависимости абсолютной и максимальных значений относительной осадки за 30 лет представлены на рис. 4, а. Верхняя часть графика показывает динамику формирования осадки с шагом 1,5 мес, нижняя – степень неоднородности осадки (максимальную относительную осадку грунта на соседних участках трубопровода за весь период эксплуатации), а также ее предельно допустимое значение, при котором отсутствуют критические напряжения в трубе. Проведенный расчет позволяет выявить участки, потенциально опасные для трубопровода с точки зрения неоднородности осадок оттаявшего в процессе эксплуатации грунта.

Второй расчет определяет мероприятия по обеспечению надежной работы трубопровода и направлен на выравнивание скоростей осадки на соседних участках. Для защиты трубопровода от разрушения при возникновении неравномерной осадки грунта могут применяться различные методы, в том числе замена грунта, термостабилизация, теплоизоляция, использование затеняющих экранов и др. В качестве иллюстрации было принято одно из самых распространенных решений по обеспечению проектного положения трубопроводов – теплоизоляция, которая за счет снижения теплового влияния трубы на окружающий грунт уменьшает оттаивание мерзлого грунта, а следовательно, абсолютную осадку и ее неравномерность. Результаты расчета, значения абсолютной осадки грунта и максимальных значений относительной осадки за 30 лет, а также схема раскладки теплоизоляции по длине трубы представлены на рис. 4, б.

Результаты расчета показывают, что на участках с непросадочными грунтами теплоизоляция не требуется. Напротив, на участке, где непросадочные грунты граничат с сильно просадочными, вследствие чего возникает сильная неравномерная осадка грунта, необходима дополнительная теплоизоляция. При этом методика теплосилового и теплотехнического расчетов трубопровода заключается в следующем:

1) на нулевой итерации проводится прочностной расчет, определяющий шаг по времени и координате для теплового расчета, а также максимально допустимое значение относительной осадки;

2) затем выполняется тепловой расчет и выявляются участки, где относительная осадка превышает значения, определенные прочностным расчетом;

3) после этого на выявленных участках принимаются решения по снижению неравномерности осадки и проверяется значение относительной осадки с учетом принятых решений;

4) расчет повторяется до тех пор, пока на всех участках трубопровода на каждом временном шаге не будут отсутствовать участки с относительной осадкой, превышающей максимальную допустимую.

При анализе результатов расчетов, представленных на рис. 4, необходимо отметить несколько принципиальных моментов, в частности, для расчета без теплоизоляции.

1. На участке 100-150 м при больших значениях ореолов оттаивания осадка грунта резко изменяется от максимальной 1,03 м до минимальной 0,09 м, что вызвано существенными отличиями коэффициентов оттаивания и сжимаемости оттаявшего грунта. Таким образом, достоверность определения физико-механических и теплофизических свойств грунтов является приоритетной задачей при разработке решений по прокладке горячих подземных трубопроводов на ММГ, что отмечено также в работе [5].

2. Участки 30-50 и 160-220 м имеют достаточно большую осадку, но она достаточно равномерная, поэтому значения относительной осадки на этих участках не превышают критического значения.

3. Участки с большими значениями неравномерности осадки относятся к зонам неоднородности грунта, например к границам непросадочных участков.

По результатам второго расчета (см. рис. 4, б) наиболее опасные с точки зрения осадки грунта участки были изолированы слоем теплоизоляции толщиной 0,1 м, менее опасные – слоем 0,05 м, неопасные участки не изолированы.

При расчете с теплоизоляцией установлено следующее: поскольку представленная методика реализована в программном комплексе, автоматизированная часть которого должна снизить неравномерную осадку до заданной величины, решения фактически направлены на уравнивание скорости формирования осадки на разных участках трубопровода. В связи с отмеченным применение теплоизоляции только на опасных участках, выявленных по первому расчету, недостаточно, так как это вызовет неоднородность уже на границе теплоизолированного участка и далее. Следствием является дифференцированное применение теплоизоляции переменной толщины для исключения возникновения неравномерных осадок.

Выводы

1. Определено тепловое взаимодействие горячего подземного трубопровода с ММГ путем решения прочностной задачи по оценке напряжений в трубопроводе совместно с тепловой задачей по определению ореолов оттаивания и осадок ММГ.

2. Разработанная методика позволяет определить участки с неравномерностью осадки грунта, вызывающей критические напряжения в трубе.

3. Созданный программный комплекс дает возможность рассчитать мероприятия по обеспечению безопасной работы трубопровода в течение всего времени эксплуатации.

4. Необходимо дифференцированное распределение теплоизоляции переменной толщины для уравнивания скорости формирования осадки.

5. Корректное определение теплофизических и физико-механических свойств грунтов имеет большое значение для теплотехнических расчетов и, как следствие, для разработки методов надежной эксплуатации трубопровода.

Список литературы

1. Программная система СТАРТ. Расчет прочности и жесткости трубопроводов. Руководство пользователя. Версия 4.66. – М., 2011.
2. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
3. Мероприятия по изменению режима теплообмена на поверхности земли и их влияние на распределение температуры в грунте/ В.Г. Кондратьев, А.Г. Перекупка, С.С. Примаков, А.С. Петрова // Нефтяное хозяйство. – 2012. – №10. – С. 122-125.
4. Поркхаев Г.В. Тепловое взаимодействие зданий и сооружений с вечномерзлыми грунтами. – М.: Наука, 1970. – 208 с.
5. Примаков С.С., Жолобов И.А. О необходимости лабораторных измерений теплофизических свойств многолетнемерзлых грунтов//Нефтяное хозяйство. – 2013. – №2. – С. 82-84.

References

1. Programmnaya sistema START. Raschet prochnosti i zhestkosti truboprovodov. Rukovodstvo pol'zovatelya (The software system START. Calculation of strength and stiffness pipelines. User's Guide), V. 4.66. – M., 2011.
2. Kutateladze S.S., *Osnovy teorii teploobmena* (Fundamentals of the theory of heat transfer), Moscow: Atomizdat Publ., 1979, 416 p.
3. Kondrat'ev V.G., Perekupka A.G., Primakov S.S., *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, 2012, no. 10, pp. 122-125.
4. Porkhaev G.V., *Teplovoe vzaimodeystvie zdaniy i sooruzheniy s vechnomerzlyimi gruntami* (Thermal interaction between constructions and permafrost soils), Moscow: Nauka Publ., 1970, 208 p.
5. Primakov S.S., Zholobov I.A., *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, 2013, no. 2, pp. 82-84.