

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОБМЕНА ТРУБОПРОВОДА С МЕРЗЛЫМ ГРУНТОМ
В РАЙОНАХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА**

Е.С. Терентьев

Научный руководитель - профессор П.В. Бурков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

В районах вечной мерзлоты находится порядка 63 % территории России. При этом северные районы играют огромную роль в экономике страны, так как в них сосредоточено более 80 % разведанных запасов нефти и около 70 % природного газа. В связи с этим остро встает вопрос о транспортировке углеводородов в условиях Крайнего Севера.

При освоении регионов с вечномерзлыми грунтами все чаще отдается предпочтение наземному способу прокладки трубопроводов. Но нередко практика показывает неоправданность такого решения.

Строительство и эксплуатация трубопроводов приводят к оттаиванию и промерзанию мерзлых грунтов, что может сопровождаться такими процессами, как пучение, осадка, термокарст, солифлюкция и др. Это сильно осложняет обеспечение проектного положения трубопроводов и самым негативным образом сказываются на техническом состоянии трассы.

Согласно СНиП 2.05.06-85* для магистральных трубопроводов в условиях вечномерзлых грунтов предусматривается не только подземная прокладка трубопроводов, но и при соответствующем обосновании допускаются наземный и надземный способы прокладки. Рассмотрим каждый способ в отдельности.

Подземная прокладка. Опыт строительства на вечномерзлых грунтах показывает, что классические технические решения абсолютно непригодны и даже расточительны в финансовом отношении. В [3] приведено аналитическое решение и экспериментально доказана возможность осуществления перекачки нефти по подземному трубопроводу в мерзлых грунтах при сохранности окружающей среды. Разработан и предложен регламент эксплуатации, ограничивающий тепловое воздействие на мерзлоту и предупреждающий прогрессирующее таяние грунтов под трубопроводом за счёт регулирования режимов перекачки.

При данном способе прокладки трубопроводов возникает необходимость в разработке многолетнемерзлых грунтов. А это очень существенный недостаток, так как надёжность и долговечность сооружений тем выше, чем меньше нарушено природное мерзлотно-грунтовое состояние основания сооружения.

Наземная прокладка. Этот способ находит все большее применение несмотря на то, что практика эксплуатации наземных трубопроводов в северных регионах, в частности Транс-Аляскинского нефтепровода, показала, что даже высокотехнологичные опоры, снабженные трубчатыми системами промораживания грунтов и рассчитанные с учетом сейсмической активности районов прохождения трассы, не обеспечивают безаварийной эксплуатации трубопровода. Как показывает практика, эксплуатации таких систем и экспериментальные исследования [1], искусственное промораживание грунтов может явиться причиной другого опасного явления – пучения грунтов. Возникают искусственно образованные бугры пучения. Это приводит к изменению положения оси трубопровода, потере устойчивости и авариям.

Наземный способ прокладки. Наземный способ прокладки предельно соответствует принципу наименьшего вторжения в грунтовый массив. Анализ эксплуатации газопровода Соленинское-Месояха-Норильск показал, что вероятность отказов при наземной прокладке значительно ниже, чем при других способах прокладки. К отрицательным моментам наземной прокладки можно отнести:

- необходимость обеспечения безопасности людей и экологии в случае аварии трубопровода, но это в равной степени относится к любому способу прокладки.
- как и в случае надземного способа прокладки необходимо предусматривать места миграции животных и проезда транспорта. Однако вдоль насыпи есть возможность построить вдольтрассовую дорогу [2].

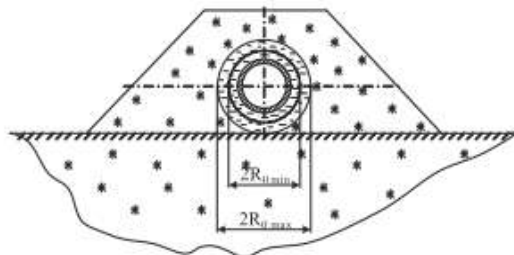


Рис. Схема наземного трубопровода с регулируемым ареолом протаивания

С целью определения предельно безопасных параметров была получена расчетная формула, позволяющая рассчитать температурный режим и регламент эксплуатации нефтепровода, проложенного в насыпи, предупреждающий прогрессирующее протаивание грунта под трубопроводом. На рисунке представлена упрощенная схема прокладки трубопровода без теплоизолирующего экрана, действие которого в решении учтено эквивалентной заменой слоев грунта.

В связи с тем, что температура мерзлого грунта всегда отрицательная, то при перекачке нефти с положительной температурой вокруг трубы образуется «талики». Размеры талой зоны зависят от теплового потока $q_{тр}$, идущего от трубы в грунт. Отсюда следует, что возможно можно подобрать такие температурные режимы перекачки, чтобы величина ореола протаивания R_0 не выходила за допустимые пределы:

$$R_{0min} \leq R_0 \leq R_{0max} \quad (1)$$

Размеры области протаивания зависят не только от геометрических размеров насыпи и положения трубы в ней, но и определяются теплосодержанием самого потока нефти, теплом трения и параметрами теплообмена системы. Из сказанного следует, что теплообменом трубопровода с грунтом можно управлять,

регулируя производительность и температуру перекачки нефти по трубопроводу, которая должна быть положительной.

Для сохранения сбалансированности теплообмена по всей длине трубопровода в условиях Крайнего Севера необходимо, чтобы тепло, теряемое жидкостью, аккумулировалось грунтом и шло на фазовые превращения $q_{ф.п.}$, т.е. необходимо, чтобы выполнялось условие ограничения ореола протаивания.

При соответствующих крайних условиях и общепринятых допущениях баланс тепла на границе «протаивания-промерзания» записывается в виде:

$$\left(\lambda_M \frac{\partial t_M}{\partial r} - \lambda_m \frac{\partial t_m}{\partial r} \right) r = R_0 = q_{ф.п.} = \sigma \rho_0 \frac{W_C - W_H}{W_C} \frac{dR_0}{dt}, \quad (2)$$

где λ_M, λ_m – соответственно коэффициенты теплопроводности мерзлого и талого грунта; $\partial t_M / \partial r, \partial t_m / \partial r$ – градиенты температуры в мерзлом и талом грунте соответственно; σ – удельная теплота плавления льда; ρ_0 – объёмная плотность мерзлого грунта; W_C, W_H – содержание незамерзшей воды и суммарная влажность соответственно.

Правая часть в уравнении (2) известна, так как закон изменения скорости перемещения границы протаивания dR_0/dt задаётся из условия «невыпучивания» [4]. Если $dR_0/dt = 0$, то граница протаивания «остановится». Тогда радиус протаивания будет величиной постоянной: $R_0 = \text{const}$.

Подобная задача уже решалась для случая подземного нефтепровода, проложенного в многолетнемёрзлых грунтах. В [2] показано, что при сбалансированном теплообмене температура нефти по длине трубопровода остается постоянной и поддерживается, за счёт тепла трения, на уровне $t_{бал} > t_0 > t_M$.

Таким образом, задавая величины границы проаивания, в допустимом диапазоне $R_{0min} - R_{0max}$, можно управлять условиями теплообмена.

Условие (2) на границе «протаивания-промерзания» учитывает, что интенсивность теплового потока, идущего от трубы в грунт, будет увеличиваться при увеличении разности температур стенки трубы и грунта. То есть, в ходе естественного изменения климата, смены сезонов будут меняться и условия теплообмена. В летнее время года тепловой поток, идущий от трубы в грунт, будет меньше, чем зимой.

Математическая модель теплового взаимодействия учитывает переменность теплофизических характеристик грунта в расчетном сечении и теплоту фазовых переходов. В результате решения краевой задачи определения температурного поля вокруг трубы и положения нулевой изотермы, получена формула для допустимой температуры грунта, примыкающего к поверхности трубы:

$$t_{уз} - t'_0 = \left[\sigma \rho_0 \frac{W_C - W_H}{W_C + 1} \frac{dR_0}{d\tau} + K_{cp} (t'_0 - t_{cp}) \right] \times \frac{R_0 \ln \frac{R_0}{R_{уз}}}{\lambda_m}, \quad (3)$$

где t'_0 – температура на границе протаивания (нулевой изотермы).

Объективная оценка эффективности наземного способа прокладки может быть получена по результатам эксперимента. Под действием источника тепла мощностью q_0 (трубы с температурой t_0) формируется ореол протаивания с относительным радиусом R_0/R , который в течение пяти циклов не выходит за допустимые пределы, принятые в данном опыте: $R_{0min}/R = 1,5$, и $R_{0max}/R = 3,4$. Как видно, температурный режим перестраивается в соответствии с заданным, а экспериментальные точки вполне соответствуют расчетному режиму.

Длительность данного опыта, состоящего из пяти циклов, соответствующих пяти годам эксплуатации реального нефтепровода, поэтому можно утверждать, что подобное регулирование осуществимо.

Сопоставляя преимущества и недостатки возможных вариантов прокладки трубопроводов по тепловому воздействию на мерзлый грунт, можно сделать следующие выводы:

- процесс теплообмена с мерзлым грунтом может и должен быть регулируемым, с минимальным воздействием на мерзлое основание.
- выбор способа прокладки необходимо делать на основании технико-экономических расчетов и безусловном выполнении требований экологической безопасности.

Литература

1. Гаррис Н.А. России Ограничение эффективности ореола случае протаивания Этот мерзлых Соленинское грунтов вокруг трубопровода [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studopedia.ru/10_204624_ogranichenie-oreola-protaivaniya-merzlih-gruntov-vokrug-truboprovoda.html свободный – (25.12.2018).
2. Гаррис Н.А., Максимова С.А. Регламент эксплуатации магистрального трубопровода при условии сохранности окружающей среды // Нефтяное хозяйство. – 1990. – № 1. – С. 63 – 64.
3. Кудрявцев В.А. Управление радиационно-тепловым балансом – основа охраны природы в области вечной мерзлоты // Сб. Мерзлотные исследования. – М.: Изд. МГУ, 1999. – Вып. XIX. – С. 3 – 6.