

Борисова Ирина Александровна

студент

2 курс, факультет «Транспорт углеводородных ресурсов»

Тюменский индустриальный университет

Научный руководитель: Чижевская Елена Леонидовна

Тюменский индустриальный университет

Россия, г. Тюмень

ВЫБОР СПОСОБА ПРОКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДОВ В РАЙОНАХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Аннотация: Статья посвящена выбору способа прокладки трубопровода в районах вечной мерзлоты. В данной статье наглядно показано, что естественные процессы подчинены нулевому годовому теплообороту, благодаря которому мерзлые массивы и реликтовые образования сохраняются в неизменном состоянии. Строительство и эксплуатация трубопроводов нарушают это состояние.

Ключевые слова: трубопровод, вечномерзлые грунты, подземная прокладка, наземная прокладка, всплытие, температурный режим.

Borisova Irina Aleksandrovna

student

2 years, faculty «Transport of hydrocarbon resources»

Tyumen Industrial University

Scientific adviser: Chizhevskaya Elena Leonidovna

Tyumen Industrial University

Russia, Tyumen

CHOICE OF THE METHOD OF LAYING PIPELINES IN THE PERMANENT FROZEN AREAS

Annotation: The article is devoted to the choice of the method of laying the pipeline in permafrost areas. This article clearly shows that natural processes are subordinate to zero annual heat circulation, due to which frozen massifs and relict formations are preserved in an unchanged state. The construction and operation of pipelines violate this condition.

Key words: pipeline, permafrost, underground laying, open laying, ascent, temperature.

В районах вечной мерзлоты находится около 63% территории России (10,7 млн км²).

При всем при этом северные регионы играют важную роль в экономике страны, так как именно здесь 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. В процессе строительства и эксплуатации трубопроводных систем происходит вживление их техногенных элементов в естественную природную среду, которое самым непосредственным образом сказывается на динамике изменения мерзлотного слоя. При освоении регионов с вечномерзлыми грунтами все чаще отдается предпочтение надземному способу прокладки трубопроводов. Но нередко практика показывает неоправданность такого решения.

Подземная прокладка. Опыт строительства на вечномерзлых грунтах показывает, что классические технические решения абсолютно непригодны и даже расточительны в финансовом отношении. Поэтому очевидна необходимость разработки и применения новых технических решений с учетом долгосрочных прогнозов и управлением температурным режимом грунтов оснований, способных компенсировать или предупредить отрицательное

воздействие тепла для существующих, строящихся и проектируемых площадочных и линейных сооружений.

В [1] приведено аналитическое решение и экспериментально доказана возможность осуществления перекачки нефти по подземному трубопроводу в мерзлых грунтах при условии 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.

Следует отметить, что это выгодный и экономичный вариант решения проблемы, так как не требует дополнительных затрат. Но 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 [2]. Поэтому при проектировании и строительстве необходимо максимально сохранять естественное природное состояние многолетнемерзлых грунтов.

В настоящее время существуют различные способы, предотвращающие прогрессирующее таяние под сооружениями за счёт использования естественного холода. К ним относятся горизонтальные трубчатые системы замораживания и температурной стабилизации грунтов (системы «ГЕТ») и вертикальные трубчатые системы замораживания (системы «ВЕТ»).

При строительстве линейной части трубопроводов также можно использовать трубчатые сезонно-охлаждающие устройства (СОУ) для поддержания несущей способности грунта в мерзлом состоянии. Надземная прокладка. Этот способ находит все большее применение несмотря на то, что практика эксплуатации надземных трубопроводов в северных регионах, в частности Транс-Аляскинского нефтепровода, показала, что даже высокотехнологические 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 [3] искусственное промораживание грунтов может явиться причиной другого опасного явления — пучения грунтов. Возникают искусственно наведенные бугры пучения.

Величина выпучивания свай, в силу неоднородности и различия структуры грунтов может быть неравномерна по трассе, и годовой прирост может достигать нескольких десятков сантиметров: 0,27 м по данным [3] и 0,40 м по данным [4]. Это приводит к изменению положения оси трубопровода, потере устойчивости и авариям. Практика эксплуатации Транс-Аляскинского нефтепровода показала, что, несмотря на тщательную проработку всех аспектов, связанных с проектированием и сооружением термостабилизирующих опор на участках с надземной прокладкой, трубопровод часто оказывается в аварийном состоянии.

Наземный способ прокладки. Сравнивая наземную прокладку с другими способами можно отметить следующее:

- силовое взаимодействие подземных магистральных трубопроводов с грунтами при их эксплуатации в условиях Крайнего Севера, в силу морозного пучения и оттаивания, может приводить к существенным немонотонным деформациям металла труб и, в конечном счете — к аварийным ситуациям (рисунок 1);

- при надземной прокладке нередки случаи выпучивания свай, что приводит к потере проектного положения и, как следствие, обрушению конструкции.

Учитывая, что далеко не во всех случаях обычный подземный и широко применяемый в северных регионах надземный способы могут быть надёжными, рассмотрим вариант наземной прокладки. Наземный способ прокладки предельно соответствует принципу наименьшего вторжения в грунтовый массив. В качестве обоснования возможности и целесообразности наземного (в

насыпи) способа прокладки трубопроводов в условиях вечномёрзлых грунтов рассмотрим основные его положительные стороны:

1. Нет необходимости в разработке траншеи, что в условиях мерзлых грунтов весьма затруднительно, а нередко и недопустимо. Соответственно это упрощает технологию работ, что немаловажно для строительства на Севере в зимних условиях, и снижает затраты.

2. По сравнению с подземной прокладкой не нарушается растительный покров, на восстановление которого потом уходят десятилетия. Мерзлое основание остается нетронутым. Отсыпанная поверх мохорастительного слоя насыпь не нарушает его и как следствие не ухудшает природное мерзлотное состояние основания [4 с.1188-1193].



Рисунок 1 – Всплытие трубопровода

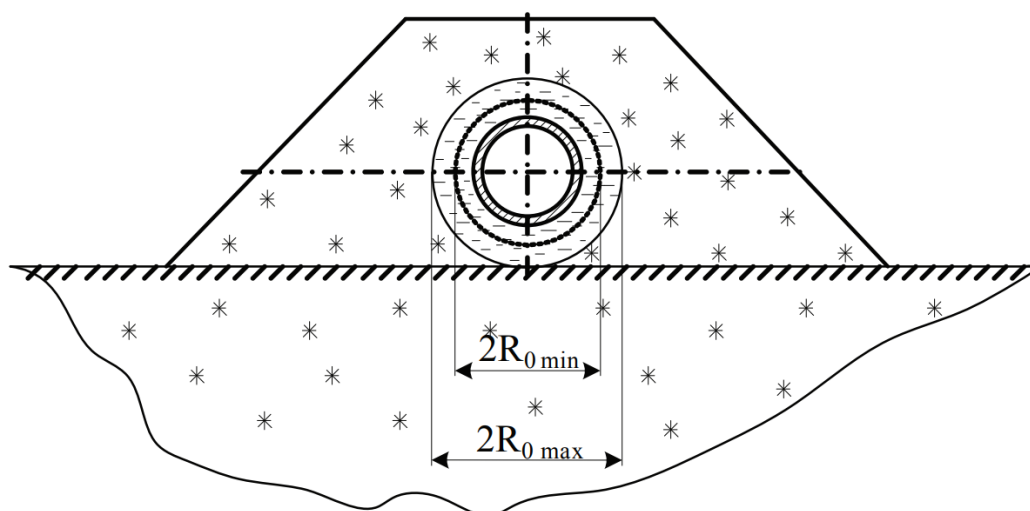


Рисунок 2 - Схема наземного трубопровода с регулируемым ореолом протаивания

3. При прокладке змейкой и в насыпи трубопровод самопроизвольно компенсирует возможные температурные напряжения в теле трубы и деформации.

4. В [5 с. 168-170] показано, что температурный режим трубопровода возможно выбрать таким, что даже при нарастании бугра пучения заземления трубопровода не произойдет. Согласно установленному регламенту труба проплавит промерзающий грунт, так как скорость продвижения талика в зимние месяцы будет превышать «встречную» скорость нарастания бугра пучения.

5. При наземной прокладке (на сваях) трубопровод подвержен колебаниям от ветровой нагрузки, перемещениям от температурных перепадов и т.д. Эти чрезмерные нагрузки исключаются при прокладке трубопроводов в насыпи.

К отрицательным моментам наземной прокладки можно отнести:

1. Необходимость обеспечения безопасности людей и экологии в случае аварии трубопровода, но это в равной степени относится к любому способу прокладки.

2. Как и в случае наземного способа прокладки необходимо предусматривать места миграции животных и проезда транспорта. Однако вдоль насыпи есть возможность построить вдольтрассовую дорогу [6 с. 180].

Что же касается устойчивости насыпи, то при её качественном выполнении и использовании современных материалов для укрепления откосов её целостность можно считать обеспеченной.

Несмотря на недостатки технологий и стандартов, регламентирующих эксплуатацию наземных трубопроводов, и отсутствие опыта их эксплуатации, все чаще принимаются проектные решения о прокладке трубопроводов в насыпи.

С целью определения предельно безопасных параметров авторами получена расчетная формула, позволяющая рассчитать температурный режим и

регламент эксплуатации нефтепровода, проложенного в насыпи, предупреждающий прогрессирующее протаивание грунта под трубопроводом.

На рисунке 2 представлена упрощенная схема прокладки трубопровода без теплоизолирующего экрана, действие которого в решение учтено эквивалентной заменой слоем грунта.

В связи с тем, что температура мерзлого грунта всегда отрицательная, то при перекачке нефти с положительной температурой вокруг трубы образуется «талик». Размеры талой зоны зависят от теплового потока $q_{тр}$, идущего от трубы в грунт. Соответственно, можно подобрать такие температурные режимы перекачки, чтобы величина ореола протаивания R_0 находилась в допустимых пределах:

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

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 краевых условиях и общепринятых допущениях баланс тепла на границе «протаивания– промерзания» записывается в виде:

$$\left(\lambda_m \frac{\partial t_m}{\partial r} - \lambda_m \frac{\partial t_m}{\partial r} \right) r = R_0 = q_{ф.п.} = \sigma_{\rho 0} \frac{W_c - W_H}{W_c + 1} \frac{dR_0}{d\tau} \quad (2)$$

где λ_m, λ_m — соответственно коэффициенты теплопроводности мерзлого и талого грунта; $\partial t_m / \partial r$ и $\partial t_m / \partial r$ — 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 $dR_0/d\tau$ задаётся из условия «невыпучивания». Если $dR_0/d\tau = 0$, то граница протаивания «остановится». Тогда радиус протаивания будет величиной постоянной: $R_0 = const$.

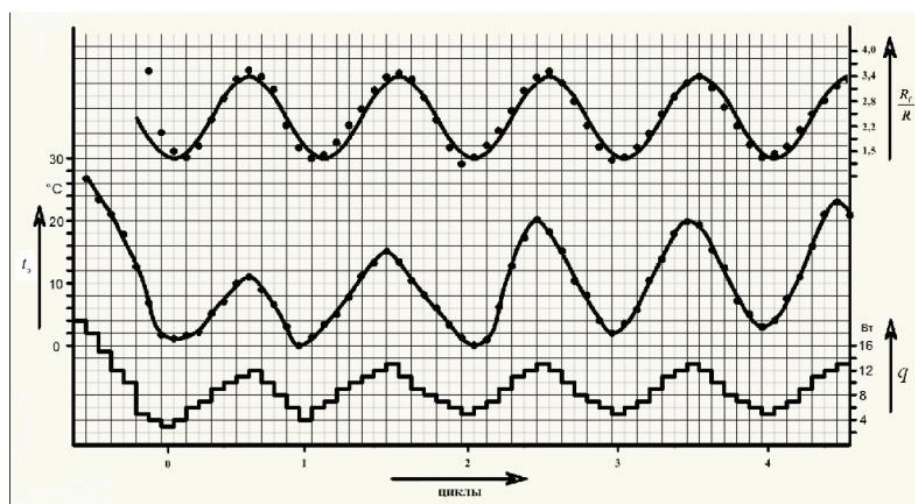


Рисунок 3- Обработка экспериментальных данных по регулированию процессом «протаивания–промерзания» грунта вокруг наземного трубопровода

Подобная задача уже решалась для случая подземного нефтепровода, проложенного в многолетнемёрзлых грунтах. В [6 с. 180] показано, что при сбалансированном теплообмене температура нефти по длине трубопровода остается постоянной и поддерживается, за счёт тепла трения, на уровне $t_{\text{бал}} > t_0 > t_m$.

Таким образом, задавая величины границы протаивания, в допустимом диапазоне $R_0 \min - R_0 \max$, 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 (условной границы протаивания), получена формула для допустимой температуры грунта, примыкающего к поверхности трубы:

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

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

Объективная оценка эффективности наземного способа прокладки может быть получена по результатам эксперимента [3 с. 278-282]. Результаты одного из опытов по регулированию процессом «протаивания– промерзания» грунта вокруг наземного трубопровода, приведены на рисунке 3. Под действием источника тепла мощностью q_3 (трубы с температурой t_3) формируется ореол протаивания с относительным радиусом R_0/R , который в течение пяти циклов не выходит за допустимые пределы, принятые в данном опыте: $R_{0 \text{ min}}/R = 1,5$, и $R_{0 \text{ max}}/R = 3,4$. 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, достаточна для того, чтобы утверждать, что подобное регулирование осуществимо.

Проведенные исследования показали, что прогрессирующее протаивание мерзлого грунта под трубопроводом в варианте наземной прокладки в насыпи можно предотвратить.

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.

Использованные источники

1. Димов Л.А. Строительство нефтепроводов на многолетнемерзлых грунтах в южной части криолитзоны Центральной и Восточной Сибири// Трубопроводный транспорт нефти. — 2015. — № 2. — С. 104-106.
2. Гречищев С.Е., Москаленко Н.Г., Шур Ю.Л. и др. Геокриологический прогноз для Западно- Сибирской газоносной провинции. — Новосибирск: Наука, 2016. — 180 с.
3. Ellwood J. R., Nicon J.F. Observations of soil and ground ice in pipeline trench excavations in the South Yukon // Permafrost: 4-th int. conf. proc., jul. 17-22, 1983. — Washington, 2016. — P. 278-282.
4. Stenley I.M., Gronin J.E. Investigations and implications of subsurface conditions beneath the Transalaska pipe in Atigun pass // Permafrost: 4-th int. conf. proc., jul. 17-22, 2016. — Washington, 2016. — P. 1188-1193.
5. Гаррис Н.А. О возможности предотвращения порывов трубопровода вследствие морозного пучения грунтов (в порядке обсуждения). «Нефть и газ» Межвуз. сб. научн. трудов. УГНТУ.— Уфа, 2017. — Вып. 1. — С. 168-170.
6. Харионовский В.В. Повышение прочности газопроводов в сложных условиях. — Л.: Недра, 2017. — 180 с. 1
7. СНиП 2.05.06-85*. Магистральные трубопроводы — М.: Изд-во стандартов, 1996. — 97 с.