



СОПРЯЖЕННАЯ ЗАДАЧА ТЕПЛОБМЕНА С ИНЖЕКЦИЕЙ ХОЛОДА С ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Н.А.Гаррис, Э.А.Акчурина, Р.Н.Бахтизин

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Conjugate Heat Transfer Problem with Cold Injection from the Ground Surface

N.A.Garris, E.A.Akchurina, R.N.Bakhtizin

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Abstract

At present, in order to protect the pipeline from the permafrost effects, the option of above-ground pipeline laying is increasingly used. Though, despite preventive measures, such as the freezing of soils with the help of seasonally acting cooling devices (SACDs), the way of pipelining in the heaving soils has not proved to be a reliable method. It is shown that the rate of freezing with the generation of an ice-soil cylinder around a thermostabilization device can be determined by solving the conjugate heat transfer problem of the "atmosphere – SACD – soil" system by the method of stationary state transition. Because the rate of soil freezing depends on the temperature regime of the SCD, and, consequently, the moisture migration flow entering to the freezing zone also depends, then it seems possible to control the process of the soil heaving generation. This can be achieved by adopting special constructive solutions or by regulating the operation of the SCDs, avoiding the rates of freezing that are close to extreme, at which the generation of a pingo is possible.

Keywords:

Permafrost; Pingos;
Seasonally acting cooling devices;
Conjugate heat transfer problem;
Buckling of above-ground
pipeline supports.

© 2018 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

Введение

С открытием и освоением новых нефтяных и газовых месторождений на территориях Крайнего Севера и Сибири, сложенных многолетнемерзлыми и вечномерзлыми грунтами, возникли большие проблемы как при эксплуатации нефтегазосборных систем на мерзлых основаниях, так и в магистральном транспорте нефти [1,2].

Экологическое равновесие в районах вечной мерзлоты нарушается с момента прохода тяжелой техники и расчистки полосы отчуждения, вырубки леса, растительности и других вариантов техногенного воздействия на грунты и экологию осваиваемых территорий [3].

Строительные работы, связанные с рытьем траншей и укладкой трубопроводов, не смотря на последующую рекультивацию, являются грубым вмешательством в естественное течение природных процессов, особенно теплообменных на поверхности Земли и тепломассообменных процессов в массиве грунта. Нередко, при прокладке трубопроводов в осложненных условиях, рекуль-

тивация грунтов практически невозможна.

Ситуация сильно осложняется тем, что трубопроводы, по которым перекачивается нефть при положительных температурах, являются постоянно действующими мощными источниками тепла и потому могут рассматриваться в качестве основной причины прогрессирующего таяния подстилающих мерзлых грунтов.

В результате техногенного воздействия неизбежно нарушается термодинамическое равновесие системы «труба - мерзлый грунт», вследствие чего годовой теплооборот на поверхности массива при дополнительном тепловыделении становится положительным. Это приводит к растеплению мерзлых грунтов и проявлению таких эффектов, как просадка грунтов, если они слабонесущие, к выпучиванию трубопроводов, проложенных в пучинистых грунтах, к солифлюкции, которая проявляется в виде течения или сползания грунтов на склонах, термокарстовых и других деструктивных процессов.

Таким образом, вдоль трассы трубопровода, при развитии прогрессирующего таяния вмещающих мерзлых грунтов, любые неравновесные процессы могут привести к потере устойчивости

*E-mail: z.elvina90@mail.ru

<http://dx.doi.org/10.5510/OGP20180200347>

сооружений трубопровода. В практике эксплуатации таких трубопроводов нередко случаи, когда балластировка газопроводов и конденсаторов выталкивалась на поверхность Земли силами пучения, не смотря на то, что утяжелители были рассчитаны в соответствии с нормами на проектирование (рис. 1) [4].

Опыт эксплуатации подземных газопроводов [5], проложенных в сложных геокриологических условиях и эксплуатирующихся при отрицательной температуре, также не представляется удачным, хотя закачка газа в подземный трубопровод с отрицательной температурой и транспортировка его при минимальном теплообмене позволяет исключить протаивание грунта под трубопроводом.

Скорость промерзания, особенно в условиях чередования грунтов с низкотемпературной, вялой мерзлотой, может сильно отличаться по трассе трубопровода. Это приводит к крайне неравномерным деформациям и, нередко, к порыву трубопровода.

Наибольшую опасность представляют собой высокопучинистые грунты. Эксперимент, проведенный на конденсатороводе Ямбург - Новый Уренгой под руководством автора [5], показал, что с переходом от положительных температур перекачки до минус 5 °С тензодатчики зафиксировали «скачок» напряжений в трубе. Наблюдения на данном конденсатороводе показали, что при эксплуатации в диапазоне отрицательных температур в теле трубы развиваются напряжения, близкие к критическим, а на контрольных участках были зафиксированы упругопластические деформации.

К сожалению, в работе [5] не приводится цифровой материал, но на основании проведенных комплексных исследований был сделан вывод: «...распространенное мнение о нормальных условиях эксплуатации холодного трубопровода в мерзлом грунте неверно», так как полученные величины деформаций и напряжений «превзошли все ожидания».

Проанализировав результаты уникальных натуральных экспериментов по изучению выпучивания холодного (до минус 5 °С) трубопровода диаметром 900 мм и длиной 105 м, специалисты Японии и США пришли к такому же выводу: «... При таких величинах пучения на Ямальском трубопроводе диаметром 1420 мм и при давлении 12 МПа неизбежно разрушение» [5].

Как видно, в районах распространения мерзлых грунтов способ транспортировки углеводородов по подземным трубопроводам при отрицательных температурах не является удачным решением проблемы, так как не обеспечивает работоспособность трубопровода.

Во-первых, обмерзание трубопровода, с заземлением его в обледеневшем грунте, не исключает, а скорее провоцирует другое крайне опасное явление для трубопровода: морозное пучение, которое, при заземлении трубопрово-

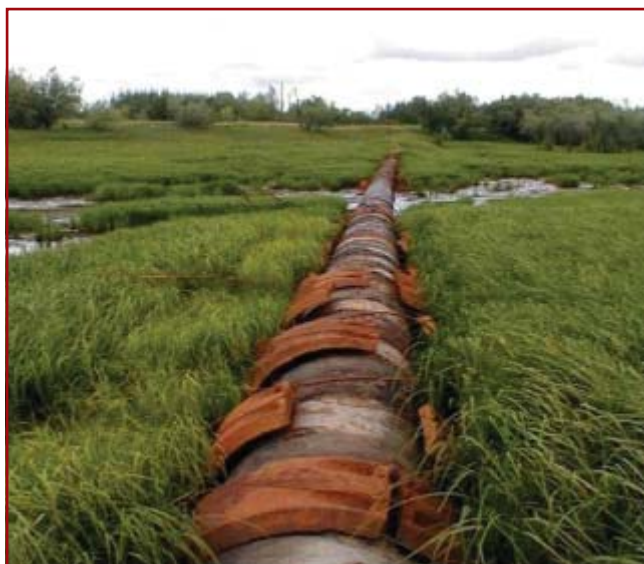


Рис.1. Всплывший участок магистрального газопровода

да в массиве грунта, приводит к его порыву.

Во-вторых, следует особо отметить чрезвычайную сложность ремонтных работ трубопроводов, обросших льдом и «закованных» в мерзлоте. Особенно сложны вскрышные работы, технологии удаления ледяного нароста с поверхности трубопровода и т.д.

И наконец, в-третьих, по оценкам «Гринпис», деградация и таяние вечной мерзлоты являются причиной повреждений инженерной инфраструктуры, которую невозможно игнорировать.

О выборе способа прокладки трубопровода

Рассмотренные примеры показывают, что основным критерием при выборе способа прокладки служит работоспособность трубопроводов в период эксплуатации, обеспеченная устойчивостью грунтового основания по трассе трубопровода.

В результате роста температуры воздуха и растепления грунтов ослабляется несущая способность свайного основания. Так, на нефтяных месторождениях Ханты-Мансийского автономного округа из-за деформаций грунта и таяния вечной мерзлоты происходит в среднем 1900 аварий в год [6].

По опубликованным данным «...в Западной Сибири ежегодно происходит около 35 тыс. отказов и аварий на нефте- и газопроводах. Причем около 21% зафиксированных аварий вызваны механическими воздействиями, в том числе связанными с потерей устойчивости фундаментов и деформаций опор» [7].

Особого внимания заслуживает опыт, накопленный в процессе эксплуатации северного газопровода Соленинское-Мессояха-Норильск, диаметром 720 мм [8]. В результате было выявлено, что интенсивность отказов на различных участках неодинакова и зависит от способа про-

кладки трубопроводов. Так, для периода в 24 года установлено, что частота отказов на 1 км трассы газопровода при подземной прокладке составила около 3, надземной - 0.42, а при наземной - 0.13.

Как видно, подземная прокладка – не самый лучший вариант исполнения линейной части трубопроводной системы в условиях мерзлоты. В настоящее время, с целью оградить трубопровод от воздействия мерзлоты, все чаще принимают вариант надземной прокладки трубопровода.

Тем не менее, не смотря на предупредительные меры, такие, как промораживание грунтов с помощью сезонно-охлаждающих естественно-действующих устройств (СОУ), способ прокладки в пучинистых грунтах не показал себя как надежный способ.

Прокладка с искусственным промораживанием грунтов

Под воздействием сил выпучивания термоопора надземного трубопровода изменяет свое положение (рис. 2 и 3), что приводит трубопровод к аварийному состоянию [9]. В результате нередки случаи, когда СОУ не выполняют своего назначения. Неверно выбранный режим промораживания грунта вокруг СОУ может привести к интенсивному подтягиванию влаги в зону промерзания и к образованию искусственно наведенного бугра пучения.

Надземная прокладка нефтепровода позво-



Рис.2. Разрушение термоопор в результате многолетнего пучения грунтов

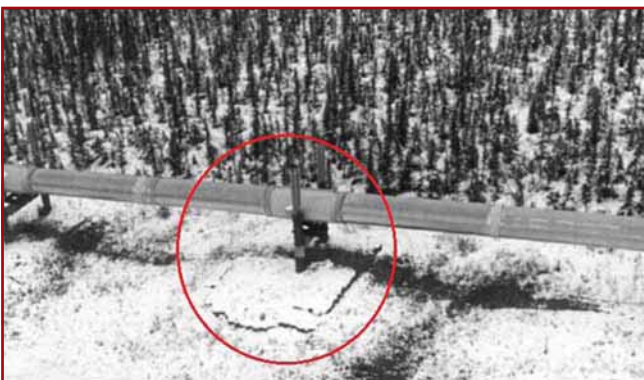


Рис.3. Сезонное выпучивание термостабилизирующих опор

ляет избежать многих аварийных ситуаций, возникающих при подземной прокладке. При этом необходимо учитывать, что промораживание грунтов вокруг опор в условиях большой обводненности массивов может сопровождаться пучением мерзлых пород, что приводит к выпучиванию оснований (рис. 3).

Режимы промораживания грунтов с помощью СОУ должны быть безопасными. Наши исследования показали [10-12], что экстремальное нарастание бугров пучения совпадает с экстремальным миграционным потоком $i_{м.экстр.}$ (рис. 4). Поэтому скорость промораживания грунта $dR_0/d\tau$ вокруг СОУ должна быть за пределами экстремального значения, при котором, с точки зрения пучинообразования, происходит активное льдонакопление и рост бугров пучения:

$$\frac{dR_0}{d\tau} \ll v_{пр.экстр.} \quad (1)$$

Влажность грунта увеличивается за счет подтягивания влаги к фронту промерзания. В результате сегрегационного накопления льда растет бугор пучения, выпирающий трубку испарителя СОУ. На перераспределение влажностно-температурного поля влияют не только изменения климатических условий, но и тепловая инерционность грунта.

Скорость продвижения границы промерзания $dR_0/d\tau$ сильно меняется в течение всего холодного периода (осень-зима-весна). Летом СОУ не работает, так как температура воздуха превышает температуру грунта, и тепло не поднимается по трубке испарителя: теплоперенос прекращается. Процесс промораживания сменяется процессом растепления замороженного цилиндра. R_0 - уменьшается до некоторого значения (минимального). С наступлением холодов начинается повторное промораживание грунта. Так как стартовое состояние определяется наличием остаточного мерзлого цилиндра грунта, то скорость нарастания ледяного формирования вокруг испарителя СОУ будет относительно меньше, чем в предыдущем году. Но это только в том случае, если влажность грунта не меняется.

Миграционные процессы в периодически-промерзающем грунте очень сложны. Объяснить их

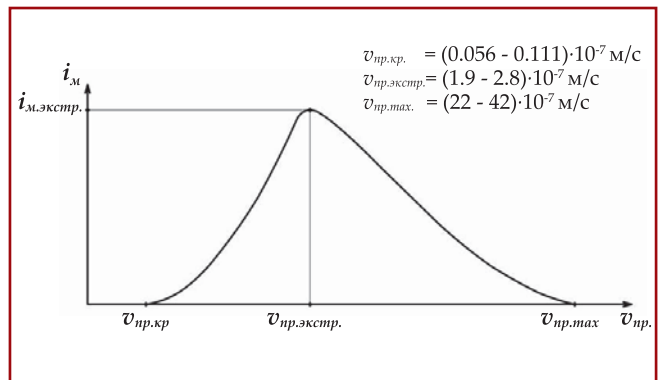


Рис.4. Зависимость миграционного потока от скорости промораживания грунта

можно, например, с позиции вакуумно-фильтрационного механизма подтягивания влаги в зону промерзания [13]. Но количественная оценка этого эффекта весьма затруднена, так как каждый раз, из года в год, и влажность, и льдистость в зоне теплового влияния будут различаться.

Прогнозирование состояния системы осложняется и тем, что в результате техногенного воздействия, неизбежного при строительстве трубопровода, величина пучения грунтов возрастает, по данным [8], в 1.1...1.4 раза по сравнению с грунтами ненарушенной структуры.

Определение безопасной скорости промораживания грунта

Задача теплового взаимодействия СОУ с мерзлым грунтом принадлежит к числу задач теории теплопроводности, где процесс передачи тепла связан с фазовыми превращениями влаги в грунте. Точные решения подобных вопросов получены в весьма ограниченном числе случаев. К числу таких решений следует отнести в первую очередь так называемую «задачу Стефана» о промерзании грунта в естественных условиях [14].

В общем случае задача промораживания грунта представляется очень сложной и решается численно, что не гарантирует качественных результатов по причине неопределенности исходной информации и невозможности построения адекватной модели.

Для получения технически пригодного решения пользуются приближенными методами, дающими достаточно точные результаты при практическом их использовании. При исследовании ряда задач, связанных с неустановившимися процессами, часто хорошие результаты даёт один из наиболее простых по идее приближенных методов - метод смены стационарных состояний, развитый И.А.Чарным и широко применяемый в практических расчетах. Впервые этот метод был предложен Г.Ламе и Б.П.Клапейроном. Этот приближенный метод основан на следующем: распределение температуры в замерзшей зоне и зоне теплового влияния предполагается таким, каким оно было при стационарном тепловом процессе.

Так как от температурного режима СОУ зависит скорость промораживания грунта $dR_0/d\tau$, а следовательно, зависит и миграционный поток влаги, поступающий в зону промерзания (рис.4), то представляется возможным управлять процессом пучинообразования, выполняя условие (1). Этого можно достигнуть, путем принятия специальных конструктивных решений или регулированием работы СОУ, избегая скоростей промораживания $dR_0/d\tau$, близких к экстремальной скорости:

$$v_{пр.экстр.} = (1.9-2.8) \cdot 10^{-7} \text{ м/с.}$$

Скорость промораживания с формированием льдогрунтового цилиндра вокруг термостабилизатора можно определить, решая сопряженную задачу теплообмена промораживаемого грунта с

морозными воздушными потоками через СОУ.

Формулировка внешней задачи теплообмена

При промораживании грунта инъекцией «холода» с поверхности Земли (за счет морозных воздушных потоков) можно пренебречь тепловыми потоками в грунте вдоль оси СОУ ввиду их малости.

С учетом только радиального стока тепла, в рамках модели эквивалентной теплопроводности математическая модель внешнего (по отношению к активно действующему СОУ) теплообмена имеет вид системы дифференциальных уравнений теплопроводности (2) с условием (3) на границе промерзания при общепринятых допущениях:

$$\begin{cases} \frac{\partial t_M}{\partial \tau} = a_M \left(\frac{\partial^2 t_M}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t_M}{\partial r} \right), & r_{II} < r < R_0; \\ \frac{\partial t_T}{\partial \tau} = a_T \left(\frac{\partial^2 t_T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t_T}{\partial r} \right), & R_0 < r < R_{Bl}; \end{cases} \quad (2)$$

на границе промерзания грунта при $r = R_0$:

$$\left(-\lambda_M \frac{\partial t_M}{\partial r} + \lambda_T \frac{\partial t_T}{\partial r} \right)_{r=R_0} = \sigma \cdot \rho \cdot \frac{W_c - W_w}{W_c + 1} \cdot \frac{\partial R_0}{\partial \tau}; \quad (3)$$

где λ_M, λ_T - коэффициенты теплопроводности мерзлого и талого грунтов;

a_M, a_T - коэффициенты температуропроводности мерзлого и талого грунтов;

t_M, t_T - температура мерзлого и талого грунтов;

ρ - плотность воды;

σ - теплота плавления (кристаллизации) воды;

W_w, W_c - влажность мерзлого грунта за счет незамерзшей воды и суммарная влажность мерзлого грунта;

τ - время;

r - текущая координата (радиус);

r_{II} - внешний радиус испарителя СОУ;

R_0 - радиус промораживания грунта вокруг СОУ;

$\partial R_0 / \partial \tau$ - скорость промораживания грунта;

R_{Bl} - радиус теплового влияния при промораживании грунта вокруг СОУ, вне которого, в пределах точности измерения (± 0.2 °C) наблюдается естественная температура грунта; практически $R_{Bl}/R_0 = 4.5...5.5$ [15].

При установившемся движении тепла в зоне теплового влияния СОУ решение уравнений теплопроводности (2) выражается логарифмическим законом распределения температуры, что позволяет записать условие (3) на границе промерзания в виде (4-5):

$$q_M - q_T = q_{ФП} \quad (4)$$

$$-\frac{\lambda_M (t_0 - t_{II})}{R_0 \ln \frac{R_0}{r_{II}}} + \frac{\lambda_T (t_e - t_0)}{R_0 \ln \frac{R_{Bl}}{R_0}} = \sigma \cdot \rho \cdot \frac{W_c - W_w}{W_c + 1} \cdot \frac{dR_0}{d\tau} \quad (5)$$

Уравнение теплопередачи СОУ

При установившемся теплообмене СОУ происходит отбор тепла $q_{и}$ из массива грунта в испарительную часть СОУ и перенос его в конденсаторную часть, где происходит отдача тепла в воздушную среду $q_{к}$.

Теплопередача по внутреннему каналу СОУ происходит за счет естественной конвекции в сбалансированном режиме:

$$q_{и} = q_{к} \quad (6)$$

$$q_{и} = \alpha_{эф.} F_{к} (t_{к} - t_{в}) \quad (7)$$

Полное количество тепла, передаваемое конденсатором в атмосферу в единицу времени $q_{к}$ определяется эффективным коэффициентом теплоотдачи $\alpha_{эф.}$ площадью внешней оребренной поверхности конденсатора $F_{к}$ и перепадом температур $\Delta t = t_{к} - t_{в}$ между стенкой его корпуса и набегающим потоком воздуха ($t_{к}$, $t_{в}$ – температуры конденсатора и воздуха).

Таким образом, съем тепла в испарителе $q_{и}$ зависит от климатических условий, температуры воздушной среды и т.д., и определяется уравнением теплопередачи СОУ (7).

При решении уравнения теплопередачи СОУ (7) принимаются следующие допущения:

1. На основании [15] принимаем температуру мерзлого грунта, прилегающего к трубке испарителя СОУ, выше температуры хладагента на 2°C , то есть $t_{м} = t_{хл} + 2^{\circ}\text{C}$.

Температура хладагента СОУ изменяется при понижении температуры атмосферного воздуха $t_{в}$ и описывается следующей функцией: $t_{хл} = \varphi \cdot t_{в} - t_{e}$ (температурный коэффициент СОУ $\varphi = 0.28$; средняя температура грунта по глубине погружения термостабилизатора в естественных условиях $t_{e} = 4.5^{\circ}\text{C}$) [16].

2. Определяющей характеристикой в парожидкостных СОУ является эффективный коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности

конденсатора в атмосферу $\alpha_{эф.}$, расчет которого проводится согласно методике, описанной в [17].

3. Считаем, что при функционировании термостабилизатора в проектном режиме температура оребрения конденсаторной части выше температуры атмосферного воздуха не менее, чем на 4°C . То есть, считаем, что $t_{к} \geq t_{в} + 4^{\circ}\text{C}$. Отметим, что этот эффект используется при контроле работоспособности установленных термостабилизаторов с помощью тепловизора [18].

4. Эффективность работы термостабилизатора во многом зависит от отношения площади конденсатора к площади испарителя. Чем больше это отношение, тем эффективность выше, однако не беспредельно. Исследования показывают, что начиная с единицы дальнейшее увеличение этого отношения мало сказывается на росте эффективности. В расчетах принимаем $F_{к}/F_{и} = 1$ [19].

Условие сопряжения

Условия сопряжения формулируются в соответствии с физическими представлениями о передаче тепла и принятыми допущениями.

Отбор тепла из грунта происходит равномерно по всей поверхности испарителя $F_{и}$. Пренебрегая переходным термическим сопротивлением, считаем равными температуры: $t_{м} = t_{и}$.

На контуре испарителя ($r = r_{и}$) условие сопряжения принимаем в виде равенства тепловых потоков:

$$q_{и} = q_{м} \quad (8)$$

$$q_{и} = F_{и} \cdot \frac{\lambda_{м}(t_{0} - t_{и})}{R_{0} \ln \frac{R_{0}}{r_{и}}} \quad (9)$$

Расчетная формула

При монотонном изменении температур грунта и воздуха (среднемесячных, декадных), на основании метода смены стационарных состояний, уравнений (6) и (8), для рассматриваемого периода времени получаем равенство тепловых потоков (10):

$$q_{к} = q_{м} \quad (10)$$

На основании (10), с учетом уравнений (7) и (9), расчетная формула приобретает вид (11):

$$\alpha_{эф.} \cdot F_{к} \cdot (t_{к} - t_{в}) = F_{и} \cdot \frac{\lambda_{м}(t_{0} - t_{и})}{R_{0} \ln \frac{R_{0}}{r_{и}}} \quad (11)$$

Уравнение (11) является трансцендентным относительно радиуса промораживания R_{0} грунта вокруг СОУ, удобно решается графоаналитическим методом.

Определяя величину радиуса промерзания R_{0i} на каждый месяц (декаду) осенне-зимнего периода, когда промерзание наиболее интенсивно, получаем возможность рассчитать скорость промораживания, как приращение радиуса намораживаемого цилиндра за учетный отрезок времени $\Delta R_{0}/\Delta \tau$.

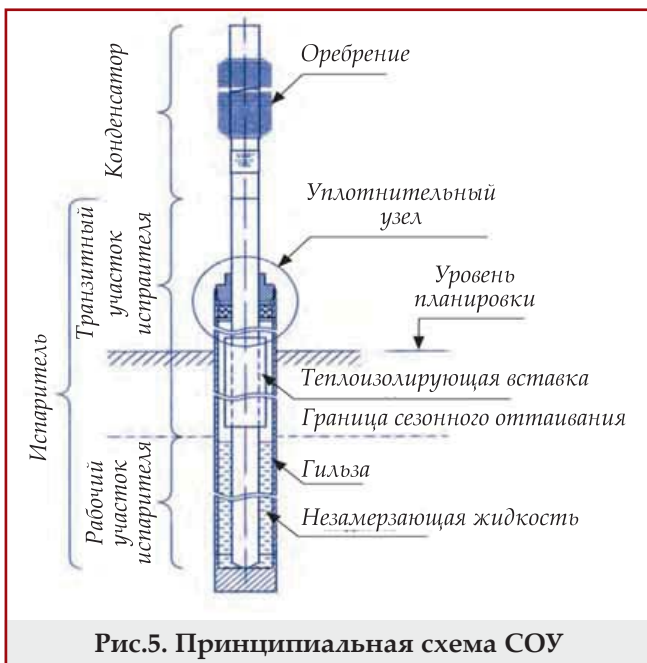


Рис.5. Принципиальная схема СОУ

Определение скорости промораживания грунта

Рассмотрим пример расчета скоростей промораживания грунта в первые 3 холодных месяца работы СОУ, когда скорости промораживания достигают наибольших значений. Принципиальная схема СОУ с горизонтальным оребрением (диаметр корпуса 33.7 мм, отношение площадей конденсатора к испарителю СОУ $F_k/F_{ii} = 1$) представлена на рисунке 5 [18].

Исходные данные к расчету радиуса промораживания R_0 вокруг СОУ по формуле (11) приведены для климатических условий Олѣкминского района [20] (табл. 1). Грунты в месте установки СОУ суглинистые, с теплопроводностью в мерзлом состоянии $\lambda_m = 2$ Вт/(м·°С) и температурой начала замерзания грунта $t_0 = -0.1$ °С.

В таблице 2 представлен расчет скорости промораживания $dR_0/d\tau$ льдогрунтового цилиндра вокруг термостабилизатора.

Сопоставление результатов расчета (табл.2) с графиком миграционных процессов (рис.6) [21] позволяет сделать вывод, что максимальная скорость промораживания $v_{пр} = 1.07 \cdot 10^{-7}$ м/с наблюдается с наступлением холодов, в октябре, и сопровождается активным льдонакоплением, так как $v_{пр}$ близка к экстремальной скорости

$v_{пр.экстр.} = 1.56 \cdot 10^{-7}$ м/с. Процесс активного сегрегационного накопления льда продолжается и в последующие зимние месяцы, что приводит в результате к пучинообразованию. Искусственно наведенный бугор пучения выпирает теплоопору вместе с промораживаемым грунтом, что доказывает правильность принятого выше заключения о причине выпучивания опоры.

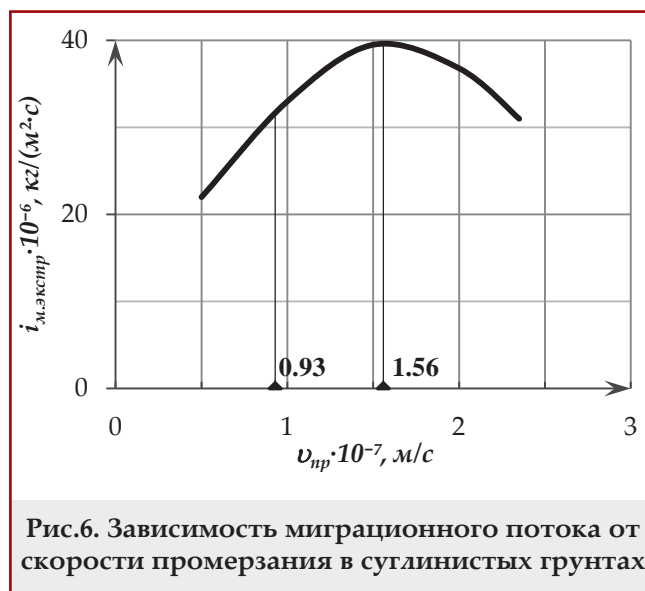


Рис.6. Зависимость миграционного потока от скорости промерзания в суглинистых грунтах

Параметр	Месяц		
	X	XI	XII
Температура атмосферного воздуха, t_B , °С	-5.9	-22.6	-32.2
Средняя скорость ветра, v_B , м/с	0.5	1.5	2
Эффективный коэффициент теплоотдачи в атмосферу от конденсатора СОУ, $\alpha_{эф.}$, Вт/(м ² ·°С)	3.15	6.82	8.29
Температура конденсатора, t_K , °С	-1.9	-18.6	-28.2
Температура мерзлого грунта, прилегающего к трубке испарителя СОУ, t_M , °С	-4.2	-8.8	-11.5

Параметр	Месяц		
	X	XI	XII
Радиус промораживания грунта вокруг СОУ, R_0 , м	0.2415	0.4822	0.7361
Скорость промораживания грунта, $v_{пр} \cdot 10^{-7}$, м/с	0.93	0.46	0.33

Выводы

Решение сопряженной задачи теплообмена промораживаемого грунта с морозными воздушными потоками через СОУ позволило сделать следующие выводы.

1. Искусственное промораживание грунтов с помощью СОУ нарушает естественное термодинамическое равновесие и провоцирует развитие процессов льдонакопления по месту стока тепла, что может рассматриваться как причина выпучивания опор в пучинистых грунтах.

2. Скорости промораживания и льдонакопления в местах стока тепла интенсифицируются в начальный период активной работы СОУ, который в северных регионах России приходится на октябрь.

3. Избежать выпучивания теплоопор можно, выбирая скорости промораживания грунта за пределами опасного диапазона максимальных скоростей, при которых возможно формирование бугра пучения.

Литература

1. Э.А.Бондарев, И.И.Рожин, К.К.Аргунова. Образование гидратов при разработке Отраднинского газоконденсатного месторождения //SOCAR Proceedings. - 2014. - №4. -С. 46-53.
2. Э.А.Бондарев, И.И.Рожин, В.В.Попов, К.К.Аргунова. Математическое моделирование создания подземного хранилища природного газа в гидратном состоянии // SOCAR Proceedings. - 2015. - №2. - С. 58-71.
3. Л.П.Калачева, И.И.Рожин, А.Ф.Федорова. Изучение влияния минерализации пластовой воды на процесс гидратообразования природных газов месторождений Востока Сибирской платформы //SOCAR Proceedings. - 2017. - №2. - С. 56-61.
4. Н.В.Рудаченко, А.В.Чухарева, А.В.Жилин. Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов. Томск: Изд-во ТПУ, 2008.
5. Н.Н.Хренов. Сооружение северных трубопроводов. Взаимодействие с многолетнемерзлыми грунтами в макетах и на трассе //Нефть.Газ. Промышленность. - 2008. - № 3. URL: <http://neftegaz.ru/science/view/610>
6. Изменение климата в России. URL: <http://climaterussia.ru/klimat/izmenenie-klimata-v-rossii>
7. К.Л.Унанян. Оценка и предупреждение опасных проявлений эрозионных процессов при хозяйственном освоении криолитозоны. Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. М.: Государственный университет по землеустройству, 2011.
8. В.В.Харионовский. Повышение прочности газопроводов в сложных условиях. Л.: Недра, 1990.
9. С.Я.Кушнир. Трубопроводный транспорт в условиях мерзлых грунтов //Материалы международной научно-практической конференции по инженерному мерзлотоведению, посвященной XX-летию ООО «Фундаментстройаркос». Тюмень: 2011. - С.18-23
10. Н.А.Гаррис. Эксплуатация нефтепродуктопроводов в различных температурных режимах и нагрузках при условии сохранности экологической среды. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Уфа: УГНТУ, 1998.
11. Э.А.Закирова, Н.А.Гаррис. Как избежать выпучивания опор надземных трубопроводов в районах пучинистых грунтов //Нефтегазовое дело. - 2016. - Т. 14. - № 2. - С. 85-92.
12. Н.А.Гаррис. О возможности предотвращения порывов трубопровода вследствие морозного пучения грунтов //Межвузовский сборник научных трудов УГНТУ «Нефть и газ». - 1997. - Т. 1. - С. 168 - 170.
13. Г.М.Фельдман. Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах. Новосибирск: Наука, 1988.
14. И.А.Чарный. Расчет скорости замораживания грунтов //Советский метрополитен. - 1940. - №4. - С. 29-34.
15. Х.Р.Хакимов. Замораживание грунтов в строительных целях. М.: Госстройиздат, 1962.
16. В.И.Макаров. Термосифоны в северном строительстве. Новосибирск: Наука, 1985.
17. Н.Н.Карнаухов, С.Я.Кушнир, А.С.Горелов, Г.М.Долгих. Механика мерзлых грунтов и принципы строительства нефтегазовых объектов в условиях Севера. М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2008.
18. А.Н.Сапсай, А.Е.Сощенко, Ю.Б.Михеев и др.

References

1. E.A.Bondarev, I.I.Rozhin, K.K.Argunova. Hydrate formation at development of the Otradninsky gas-condensate field //SOCAR Proceedings. - 2014. - No.4. -P. 46-53.
2. E.A.Bondarev, I.I.Rozhin, V.V.Popov, K.K.Argunova. Mathematical modeling of natural gas underground storage in hydrate state //SOCAR Proceedings. - 2015. - No.2. - P. 58-71.
3. L.P.Kalacheva, I.I.Rozhin, A.F.Fedorova. The study of the stratum water mineralization influence on the hydrate formation process of the natural gas from the East Siberian platform fields //SOCAR Proceedings. - 2017. - No.2. - P. 56-61.
4. N.V.Rudačenko, A.V.Čuhareva, A.V.Žilin. Proektirovanie i èkspluataciâ gazonefteprovodov. Tomsk: Izd-vo TPU, 2008.
5. N.N.Hrenov. Sooruzhenie severnyh truboprovodov. Vzaimodejstvie s mnogoletnemerzlymi gruntami v maketah i na trasse //Nefť'.Gaz. Promyšlennost'. - 2008. - № 3.
6. Izmenenie klimata v Rossii. URL: <http://climaterussia.ru/klimat/izmenenie-klimata-v-rossii>
7. K.L.Unanân. Ocenka i predupreždenie opasnyh proâvlenij èrozionnyh processov pri hozâjstvennom osvoenii kriolitozony. Dissertaciâ na soiskanie učenoy stepeni kandidata geografičeskikh nauk. M.: Gosudarstvennyj universitet po zemleustrojstvu, 2011.
8. V.V.Harionovskij. Povyšenie pročnosti gazoprovodov v složnyh usloviâh. L.: Nedra, 1990.
9. S.Â.Kušnir. Truboprovodnyj transport v usloviâh merzlyh gruntov //Materialy meždunarodnoj naučno-praktičeskoj konferencii po inženernomu merzlotovedeniju, posvâšennoj XX-letiju ООО «Fundamentstrojarkos». Tûmen': 2011. - S.18-23
10. N.A.Garris. Èkspluataciâ nefteproduktoprovodov v različnyh temperaturnyh režimah i zagruzkah pri uslovii sohrannosti èkologičeskoj sredy. Dissertaciâ na soiskanie učenoy stepeni doktora tehničeskikh nauk. Ufa: UGNTU, 1998.
11. E.A.Zakirova, N.A.Garris. How to avoid support bucklings of above ground pipelines in areas with heaving soils //Oil and Gas Business. - 2016. - Vol. 14. - No. 2. - P. 85-92.
12. N.A.Garris. O vozmožnosti predotvrašeniâ poryvov truboprovoda vsledstvie moroznogo pučeniâ gruntov // Mežvuzovskij sbornik naučnyh trudov UGNTU «Nefť i gaz». - 1997. - T. 1. - S. 168 - 170.
13. G.M.Feldman. Moisture movements in thawing and freezing soils. Novosibirsk: Nauka, Siberian branch, 1988.
14. I.A.Čarnyj. Rasčet skorosti zamoraživaniâ gruntov //Sovetskij metropoliten. - 1940. - №4. - S. 29-34.
15. Kh.R.Khakimov. Soil freezing for construction purposes. M.: Gosstroizdat, 1962.
16. V.I.Makarov. Thermosyphons inthe northern construction. Novosibirsk: Nauka, 1985.
17. N.N.Karnaukhov, S.Ya.Kushnir, A.S.Gorelov, G.M.Dolgikh. Frozen soil me-chanics and principles of construction of oil and gas facilities in the north conditions. M.: TsentrLitNefteGaz Publ., 2008.
18. A.N.Sapsay, A.E.Soschenko, Yu.B.Mixeev, et al.

Конструктивные решения термостабилизаторов грунтов и оценка их эффективности для обеспечения твердомерзлого состояния грунтов оснований фундаментов при наземной прокладке трубопровода //Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. - 2014. - № 1 (13). - С. 36-41.

19. С.С.Вялов, С.Э.Городецкий, Ю.А.Александров. Термосваи в строительстве на Севере. Л.: Стройиздат, 1984.

20. Ветра в Республике Саха (Якутия). URL:<http://energywind.ru/recomendacii/karta-rossii/dalnij-vostok/respublika-saxa>

21. С.Е.Гречищев, Л.В.Чистотинов, Ю.Л.Шур. Основы моделирования криогенных физико-геологических процессов. М.: Наука, 1984.

Design solutions for the soil thermo-stabilizers and evaluation of their efficiency for providing hard frozen soil condition of foundation basis in the case of above-ground routing //Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. - 2014. - No. 1 (13). - P. 36-41.

19. S.S.Vyalov, S.E.Gorodetsky, Yu.A.Alexandrov. Thermal piles in northern construction. L.: Stroyizdat, 1984.

20. Vetra v Respublike Saha (Âkutii). URL:<http://energywind.ru/recomendacii/karta-rossii/dalnij-vostok/respublika-saxa>

21. S.E.Grechishchev, L.V.Chistotinov, Yu.L.Shur. Cryogenic physical-geological processes. Fundamentals of Modeling. M.: Nauka, 1984.

Сопряженная задача теплообмена с инъекцией холода с поверхности земли

Н.А.Гаррис, Э.А.Акчурина, Р.Н.Бахтизин

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Реферат

В настоящее время, с целью оградить трубопровод от воздействия мерзлоты, все чаще принимают вариант его наземной прокладки. Тем не менее, не смотря на предупредительные меры, такие, как промораживание грунтов с помощью сезонно-охлаждающих устройств, способ прокладки в пучинистых грунтах не показал себя как надежный. Показано, что скорость промораживания с формированием льдогрунтового цилиндра вокруг термостабилизатора можно определить, решая сопряженную задачу теплообмена системы «атмосфера - СОУ - грунт» методом смены стационарных состояний. Так как от температурного режима СОУ зависит скорость промораживания грунта, а, следовательно, зависит и миграционный поток влаги, поступающий в зону промерзания, то представляется возможным управлять процессом пучинообразования. Этого можно достигнуть, путем принятия специальных конструктивных решений или регулированием работы СОУ, избегая скоростей промораживания, близких к экстремальным, при которых возможно формирование бугра пучения.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, бугры пучения, сезонно-охлаждающие устройства, выпучивание опор наземного трубопровода, сопряженная задача теплообмена.

İstilik mübadiləsinin yer səthindən ayrılan soyuğun injeksiyası ilə ümumiləşdirilmiş məsələsi

N.A.Garris, E.A.Akçurina, R.N.Baxtizin

Ufa Dövlət Neft Texniki Universiteti, Ufa, Rusiya

Xülasə

Hal-hazırda, boru kəmərinə donuşluğun təsirindən qorumaq məqsədi ilə, daha çox onun yeri üstü çəkilmə variantını qəbul edirlər. Bununla belə, mövsümi-soyuducu qurğuların (MSQ) köməyi ilə torpaqların həddindən artıq dondurulması kimi ehtiyat tədbirlərinə baxmayaraq, şişən torpaqlarda boruların çəkilməsi özünü doğrultmamışdır. Göstərilmişdir ki, termostabilizatorun ətrafında buzlu torpaq silindrinin formalaşması ilə müşayiət olunan donma sürətini stasionar vəziyyətlərin dəyişdirilməsi metodu ilə "atmosfer - MSQ - torpaq" sisteminin istilik mübadiləsinin ümumiləşdirilmiş məsələsini həll etməklə müəyyən etmək olar. Torpağın donma sürəti və eləcə də donma zonasına daxil olan rütubətin miqdarı axını MSQ-nin temperatur rejimindən asılı olduğu üçün şişmənin əmələgəlməsi prosesini idarə etmək olar. Buna xüsusi konstruktiv qərarların qəbul edilməsi və ya MSQ-nin işinin nizamlanması yolu ilə – şişmə təpəsinin formalaşmasının mümkün olduğu, ekstremala yaxın, həddindən artıq donma sürətlərindən yayınaraq nail olmaq olar.

Açar sözlər: daimi donuşluq torpaqları, şişmə təpələri, mövsümi-soyuducu qurğular, yerüstü boru kəmərinin dayaqlarının qabarması, istilik mübadiləsinin ümumi məsələsi.