

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
 В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫЕ ГРУНТЫ  
 ПОДЗЕМНЫХ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ**

**А.Н. Чехлов**

*Научный руководитель доцент Н.В. Чухарева*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Постепенное истощение месторождений Западной Сибири, Татарстана и Башкирии требует освоения новых районов добычи, запасов которых было бы достаточно для поддержания объемов добываемых углеводородов на текущем уровне и для их дальнейшего роста. К перспективным районам добычи относятся регионы Дальнего Востока и Восточной Сибири, которые характеризуются широким распространением многолетнемерзлых грунтов. При строительстве и эксплуатации подземных нефтегазопроводов на этих территориях возникает необходимость в инженерной защите от воздействия опасных геокриологических процессов, в том числе термокарста.

Согласно определению Ю. Л. Шура [6], термокарст – это совокупность физико-геологических процессов и явлений, состоящих из таяния внутриземного льда, вытаивания ледяных включений и залежей (прожилков, прослоек, слоев, линз и жил), возникновения в толщах мерзлых пород полостей (макропустот) после вытеснения или вытекания из них талой воды и просадок протаившего грунта.

Согласно данным [1], для защиты трубопровода от оттаивания и просадки грунтов основания применяются различные способы инженерной защиты (тепловая изоляция, замена льдистого грунта в основании траншеи). Чтобы обосновать выбор того или иного способа инженерной защиты необходимо иметь результаты решения задачи о динамике термокарстового процесса в основании трубопровода.

Цель работы: модель динамики термокарстовых процессов в многолетнемерзлых грунтах под воздействием подземных нефтегазопроводов.

Задачи исследования:

- получить выражение для определения закона движения фронта протаивания грунта;
- получить выражение для определения закона движения фронта консолидации грунта;
- получить алгоритм численного решения задачи о движении фронтов протаивания и консолидации грунта.

В соответствии с постановкой задачи о растеплении грунтового основания подземного трубопровода, согласно данным [4], температурное поле грунта описывается системой уравнений теплопроводности:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \cdot \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, & 0 < x < \xi, \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \cdot \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, & \xi < x < \infty, \end{cases} \quad (1)$$

где  $a_1$  – температуропроводность талого грунта, м<sup>2</sup>/с;

$a_2$  – температуропроводность мерзлого грунта, м<sup>2</sup>/с.

Система решается при следующих начальных и граничных условиях [2, 4]:

$$T_2(x, 0) = T_{sp}, \quad (3)$$

$$T_1(0, t) = T_n, \quad (4)$$

$$T_1(\xi, t) = T_2(\xi, t) = T_\phi, \quad (5)$$

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1(\xi)}{\partial x} - \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2(\xi)}{\partial x} = \rho_n \cdot G \cdot L \cdot \frac{d\xi}{dt}, \quad (6)$$

где  $T_{sp}$  – температура мерзлого грунта, °Ñ;

$T_n$  – температура на поверхности трубы, °Ñ;

$T_\phi$  – температура фазового перехода, °Ñ;

$\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности талого грунта,  $\hat{A}$  ( $i \cdot \text{°Ñ}$ );

$\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта,  $\hat{A}$  ( $i \cdot \text{°Ñ}$ );

$\rho_n$  – плотность льда, кг/м<sup>3</sup>;

$L$  – удельная теплота плавления льда, Дж/кг;

$G$  – льдистость грунта.

Решая систему уравнений 1-2 с учетом условий 3-6, получили выражение закона движения фронта оттаивания:

$$\xi = \alpha \cdot \sqrt{t}, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – константа, определяемая из трансцендентного уравнения 8.

$$\frac{\lambda_1 \cdot (T_n - T_\phi)}{\sqrt{\pi \cdot a_1}} \cdot \frac{e^{-\frac{\alpha^2}{4a_1}}}{\operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{a_1}}\right)} - \frac{\lambda_2 \cdot (T_\phi - T_{сп})}{\sqrt{\pi \cdot a_2}} \cdot \frac{e^{-\frac{\alpha^2}{4a_2}}}{\left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{a_2}}\right)\right)} = \frac{\alpha}{2} \cdot \rho_s \cdot G \cdot L. \quad (8)$$

Согласно исследованию [5], осадка грунта определяется из соотношения:

$$l(t) = a_0 \cdot \int_{l(t)}^{\xi(t)} [q + \rho' g \xi - \rho_w g H] dx + A_0 \cdot \xi(t), \quad (9)$$

где  $q$  – внешняя нагрузка, Па;

$\rho'$  – плотность частиц грунта, кг/м<sup>3</sup>;

$a_0$  – коэффициент сжимаемости, 1/Па;

$\rho_w$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$H$  – фильтрационный напор, м;

$A_0$  – коэффициент оттаивания.

Если пренебрегать вторым членом выражения 9, отвечающим за осадку под действием собственного веса грунта, согласно результатам исследования [4] закон движения фронта консолидации грунта описывается выражением:

$$l = \beta \cdot \sqrt{t}, \quad (10)$$

где  $\beta$  – константа, определяемая из трансцендентного уравнения.

В инженерной практике часто нет необходимости точного расчета величины осадки грунта в конкретный момент времени. Обычно необходимо знать лишь максимальное значение осадки, соответствующее глубине растепления грунта основания трубопровода. Поэтому для инженерных расчетов в уравнении 9 пренебрегают третьим членом, отвечающим за фильтрационный отток воды. Эти допущения используются в методике расчета осадки при растеплении многолетнемерзлого грунта, представленной в СНиП 2.02.04-88 [3]. Нормативный документ предписывает рассчитывать осадку многолетнемерзлого грунта по формуле:

$$S = (A_0 + q \cdot a_0) \cdot \xi. \quad (11)$$

Исходные данные задачи о развитии термокарстового процесса представлены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные задачи

Наименование параметра	Буквенное обозначение	Значение	Размерность
Теплопроводность талого грунта	$\lambda_1$	1,74	Вт/(мК)
Температуропроводность талого грунта	$a_1$	$0,56 \cdot 10^{-6}$	м <sup>2</sup> /с
Теплопроводность мерзлого грунта	$\lambda_2$	2,32	Вт/(мК)
Температуропроводность мерзлого грунта	$a_2$	$0,84 \cdot 10^{-6}$	м <sup>2</sup> /с
Плотность льда	$\rho_l$	900	кг/м <sup>3</sup>
Плотность воды	$\rho_w$	1000	кг/м <sup>3</sup>
Удельная теплота плавления льда	$L$	$3,3 \cdot 10^5$	Дж/кг
Льдистость	$G$	0,5	
Коэффициент сжимаемости	$a_0$	$10^{-5}$	1/Па
Коэффициент оттаивания	$A_0$	0,025	
Коэффициент фильтрации	$k$	$10^{-7}$	м/с
Давление от веса трубы и грунта засыпки	$q$	20000	Па
Температура на поверхности трубы	$T_n$	30	°С
Температура мерзлого грунта	$T_{гр}$	-4	°С
Температура фазового перехода	$T_\phi$	0	°С

Для получения решения поставленной задачи необходимо решить одно (для упрощенного решения) или два трансцендентных уравнения. В данной работе для получения численного решения используется метод хорд. Расчет глубины оттаивания и осадки грунта в основании трубопровода производился на период 1 года.

По результатам решения задачи можно сделать вывод о том, что за 1 год эксплуатации подземного трубопровода в указанных условиях глубина растепления грунта в его основании составит  $\zeta = 4,06$  м. Величина годовой осадки грунта в основании трубопровода составит от 0,907 м (модель консолидации грунта) до 1,016 м (упрощенная формула). Как и предполагалось, упрощенная формула, не учитывающая время фильтрационного оттока воды, показывает большие значения осадки.

#### Литература

1. Дерцакян А. К. Строительство трубопроводов на болотах и многолетнемерзлых грунтах. – М.: Недра, 1978. – 167 с.
2. Мейрманов А. М. Задача Стефана. – Новосибирск: Наука Сиб. отд-ние, 1986. – 239 с.
3. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. – М.: Изд-во Минрегион России, 2012. – 118с.
4. Хусаинова З. Р. Теоретическое исследование процессов термоэрозии и термокарста многолетнемерзлых пород : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 01.04.14. – Уфа., 2007. – 148 с.
5. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1973. – 448 с.
6. Шур Ю. Л. Термокарст (к теплофизическим основам учения о закономерностях развития процесса). – М.: Недра, 1977. – 80с.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕКАЧКИ ГАЗА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГАЗОПРОВОДОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ

А.Н. Чехлов

Научный руководитель доцент Н.В. Чухарева

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Согласно Энергетической стратегии России [5], изменение географии добычи углеводородов до 2030 года будет осуществляться за счет освоения месторождений Восточной Сибири, Дальнего Востока, полуострова Ямал, континентального шельфа арктических морей. Реализация стратегии требует развития сети магистральных и промысловых газопроводов в районах, характеризующихся распространением многолетнемерзлых грунтов.

Эксплуатация газопроводов в условиях криолитозоны осложняется воздействием опасных геокриологических процессов, которые активизируются при растеплении грунта в основании трубопровода. Согласно исследованию [3], подземный газопровод может испытывать нагрузки от осадки, всплытия или пучения, вызванных изменением температуры мерзлого грунта. Для обеспечения безопасной эксплуатации газопровода в криолитозоне необходимо на этапе проектирования учесть геокриологические особенности грунтов и предусмотреть меры инженерной защиты.

Защита газопровода от воздействия опасных геокриологических процессов может быть технического и технологического характера. К техническим решениям относится тепловая изоляция труб, активная термостабилизация грунтов, замена льдистого грунта в основании траншеи и другие меры инженерной защиты. Технологическим решением является понижение температуры перекачиваемого продукта до температуры грунта или близкого к ней значения. Данная исследовательская работа посвящена поиску оптимальных сочетаний технических и технологических решений, обеспечивающих безопасность эксплуатации газопроводов в криолитозоне.

Цель исследовательской работы – алгоритм выбора оптимальной температуры перекачки газа, при эксплуатации газопровода в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– получить алгоритм расчета эксплуатационных затрат, зависящих от температуры газа;

– получить алгоритм выбора оптимальных технических решений по прокладке газопроводов на многолетнемерзлых грунтах.

Исходными данными для расчетов должны служить следующие показатели: производительность газопровода, свойства перекачиваемого газа, а также параметры трассы (свойства грунтов и их расположение по длине трассы).

Согласно данным [4], к эксплуатационным затратам при транспорте газа, зависящим от температуры, относятся затраты на электроэнергию для компримирования и охлаждения газа и затраты на ингибиторы гидратообразования. Расчет данных затрат осуществляется по формулам 1-3.

$$C_{\text{ком}}(t) = N(t) \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot m \cdot \tau \cdot C_3, \quad (1)$$

где  $C_{\text{ком}}$  – затраты на компримирование, руб.;

$N$  – мощность, потребляемая компрессором, кВт;

$\eta_{\text{пер}}$  – КПД передачи;

$m$  – количество работающих компрессоров;

$\tau$  – время работы компрессоров, ч;

$C_3$  – стоимость электроэнергии, руб./кВтч.

Мощность, потребляемая компрессором, является функцией температуры транспортируемого газа. Её расчет осуществляется по методике, приведенной в нормативном документе [8].

$$C_{\text{охл}}(t) = N_{\text{АВО}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot m_{\text{АВО}}(t) \cdot \tau \cdot C_3, \quad (2)$$