

УДК 550.89:518.2 +539.3

**Напряженно-деформированное состояние системы геологическая среда –
трубопровод в условиях криолитозоны**

Шевчук В.В., Иваник Е.М., Лавренюк В.И., Лавренюк Н.В.

Введение. Поведение системы геологическая среда – трубопровод определяется развитием в ней механических напряжений и выражается в виде взаимообусловленных и последовательно действующих процессов и явлений, таких как упругое и пластическое деформирование, а также разрушение (хрупкое при нарушении сплошности, либо пластическое с потерей устойчивости пород). При очевидности негативного воздействия геологической среды на трубопроводно-транспортные комплексы возможности моделирования экстремальных ситуаций с получением количественных характеристик силового воздействия на трубопровод возникают только на основе оперативных расчетов полей напряжений и деформаций в системе геологическая среда – трубопровод в широком диапазоне начальных и граничных условий, а также геологических и механических параметров геологических сред. Значение таких расчетов особенно велико в районах с развитием опасных геологических процессов, таких как криогенные явления, эпизодически возникающие водные, водно-грязевые и водно-каменные потоки, водно-гравитационные процессы и другие.

Анализируя влияние геологической среды на трубопровод, следует отметить, что ее разрушительное воздействие на нить трубопровода в значительной степени нейтрализуется на стадии его проектирования (оптимальный выбор трассы трубопровода) и строительства (изоляция, опоры, категорийность труб, инженерное укрепление склонов и т.д.). Однако на этих стадиях невозможно полностью учесть и тем более исключить возможные опасные воздействия неблагоприятных природных факторов. Степень и направленность влияния некоторых из них могут проявляться лишь в процессе эксплуатации трубопроводов, когда стационарные режимы с минимальным воздействием геологической среды могут нарушаться аномальным развитием природных процессов. При этом резко возрастают риски неконтролируемого поведения системы геологическая среда-трубопровод с реальными угрозами повреждения и разрушения последнего. Для исследования этих процессов в пределах трасс магистральных трубопроводов проводятся различные

дополнительные работы по диагностированию их линейной части, выявлению негативных явлений, а также по обследованию комплексом методов и средств технического состояния, характеризующих на разных этапах исправность и работоспособность трубопроводов, их элементов, оборудования и сопутствующих сооружений [1]. В большинстве случаев это помогает выявить причины деформаций трубопровода, однако моделирование экстремальных ситуаций, своевременное получение прогнозной качественной и количественной оценки силового воздействия геологической среды на трубопровод и разработка упреждающих мер безопасности возможны лишь с помощью математических средств расчета напряженно-деформированного состояния реологически различных геологических сред.

При оценке влияния геологической среды на трубопровод в первую очередь анализируются те геологические факторы и процессы, которые способны нарушить динамическое равновесие в рассматриваемой природно-техногенной системе.

Среди них в первую очередь выделяются следующие факторы: 1. Наличие многолетне- и сезонномерзлых пород и связанные с ними различные криогенные процессы и явления; 2. Проявление водно-эрозионных процессов в пределах трасс трубопроводов, связанных как с постоянными, так и с временными водными, водно-грязевыми потоками и селями. 3. Проявление водно-гравитационных и гравитационных процессов, связанных с расчлененностью рельефа.

Корректная количественная прогнозная оценка воздействия названных негативных геологических факторов на инженерные сооружения возможна на основе расчетов напряженно-деформированного состояния в соответствующих природно-техногенных системах. В этой связи авторами решалась задача создания расчетных средств на основе геологического и математического моделирования. В частности, осуществлены постановка и решение задач термоупругопластичности, разработана компьютерная программа, позволяющая оценивать напряженно-деформированное состояние системы геологическая среда-трубопровод в условиях криолитозоны для решения задач обеспечения безопасного функционирования магистральных трубопроводов. Опасное влияние криогенных процессов и явлений термоупругости может проявляться в широком диапазоне климатических условий (практически повсеместно), хотя, естественно, наиболее значительным оно бывает в зоне распространения сезонной и многолетней мерзлоты. Поэтому детальный анализ геологических факторов и процессов, влияние которых наиболее значительно, проведен на примере территории прохождения магистральных трубопроводов Западной Сибири [2].

Силовые факторы системы геологическая среда – трубопровод.

Напряженно-деформированное состояние системы геологическая среда – подземный трубопровод в условиях распространения криогенных процессов формируется под влиянием множества факторов. Определенное влияние оказывает рельеф местности, состав и структура пород, влажность, степень водонасыщения и связанная с ней льдистость, теплофизические особенности пород, температура воздуха, осадки, характер снегонакопления и снеготаяния, обводнение территории и др. Кроме того, имеют значение некоторые эксплуатационные характеристики трубопровода, в частности, тепловой режим. Моделирование криогенных процессов направлено на оценку влияния гравитационных сил, а также процессов сезонного и многолетнего выпучивания грунтов, наледеобразования, теплового проседания грунта с учетом различных климатических, литологических и механических параметров. С точки зрения теплофизики процессов промерзания-протаивания тепловой режим приповерхностных горизонтов обусловлен теплообменом атмосферы и горных пород, распространением тепла в мерзлой и талой зонах, а также характером перемещения раздела между этими зонами. Результирующими характеристиками температурного режима верхних горизонтов пород служат среднегодовая температура на подошве сезонноталого и сезонномерзлого слоев и температура на глубине нулевых годовых колебаний. Первая отражает современный теплообмен верхних горизонтов пород с атмосферой, а другая связана с особенностями формирования мерзлых толщ на заключительной стадии и зависит от размеров однородных породных комплексов [3].

В результате взаимодействия газопровода с многолетнемерзлыми породами активизируются или возникают новые негативные процессы, приводящие к его деформациям. Наиболее распространенный и интенсивно протекающий процесс - выпучивание газопроводов. За короткий срок эксплуатации (5 - 7 лет) деформации за счет выпучивания могут достигать 1 м и более. Эти процессы развиваются как при сезонном, так и при многолетнем промерзании пород. Криогенное пучение обусловлено увеличением объема замерзающей влаги и льдонакоплением (вследствие миграции воды) при промерзании. Наибольшие деформации пучения наблюдаются при промерзании в открытой системе хорошо влагопроводных, чаще всего пылеватых и водонасыщенных супесчаных и суглинистых пород при малых скоростях промерзания и близком расположении водоносного горизонта, чем определяется миграционный механизм пучения (рис. 1,2) [4].

Процессы сезонного пучения неравномерны, чем обусловлено образование пятен-медальонов, мелкохолмистого рельефа и сезонных миграционных бугров

пучения, наиболее опасных с точки зрения влияния на трубопровод. Их формирование происходит в холодное время года в связи с неравномерным промерзанием пород сезонноталого слоя, в результате чего возникает гидростатический напор в движущихся надмерзлотных водах. Криогенное сезонное пучение распространено на всех геоморфологических уровнях. В пределах высоких гипсометрических уровней эти процессы характеризуются высокой интенсивностью, поскольку слой сезонного оттаивания сложен здесь обычно пылеватыми суглинками, супесями и пылеватыми песками. Процесс пучения начинается уже при промерзании верхних горизонтов и продолжается на протяжении всего периода промерзания. Суммарная величина пучения в каждой точке не остается постоянной, а изменяется ежегодно, что объясняется изменением мощности сезонномерзлого или сезонноталого слоя. Криогенное пучение проявляется по площади неравномерно. Размер отдельных бугров в плане изменяется от 8 до 15 метров.

Механизм развития деформаций пучения определяется несколькими физико-химическими процессами, доля которых в формировании суммарной величины пучения зависит от условий промерзания дисперсных пород. Общая величина пучения формируется за счет увеличения на 9 % объема воды при переходе в лед, пучения за счет воды, поступающей в мерзлую часть породы в ходе миграции или инъекции, а также деформации усадки оттаявшей обезвоженной зоны. Наиболее значительный вклад в суммарную величину пучения промерзающих пород вносит льдонакопление за счет мигрировавшей в мерзлую зону влаги (90-95 %). Зависящая от особенностей пород и условий их промерзания деформация усадки также может достигать значительной величины. Так, например, несмотря на значительные величины миграционного льдонакопления в глине, масштабы пучения в ней могут быть меньшими, чем в суглинках за счет больших деформаций усадки. Исследования влияния влагоемкости и пористости среды на величину пучения показывают, что в промерзающих породах уменьшение пористости и снижение влажности приводят к уменьшению суммарного льдонакопления, а условия полного водонасыщения - к уменьшению величины просадки грунта.

Экспериментально установлено [4], что замерзание воды в замкнутой среде, которой могут служить поры грунта, способно привести к возникновению в условиях недопустимой деформации значительных напряжений. По приблизительной оценке с использованием уравнения Клапейрона-Клаузиуса они составляют 13,4 Мпа на 1° снижения отрицательной температуры. Однако в связи с тем, что природные грунты не могут рассматриваться в качестве закрытых и недеформированных систем, доля

напряжений выпучивания в общей величине напряжений и деформаций пучения промерзающих пород проявляется как дополнение к напряжениям набухания, развивающихся за счет расклинивающего действия тонких пленок мигрирующей воды.

При возникновении напряжений пучения решающее значение имеют условия недопустимой деформации: чем большей оказывается недопустимая деформация, тем значительнее величина фиксируемых в промерзающей породе напряжений. Параметры допустимой деформации определяются прежде всего механическим сжатием оттаявшей и мерзлой зон, просадкой протаявшей части грунта, прочностными свойствами трубопровода. Кроме того, напряжения и деформации в промерзающих дисперсных породах, повсеместно распространенных в местах прохождения подземных трубопроводов, существенно зависят от состава и структуры пород. С увеличением дисперсности и пылеватости грунтов при полном их водонасыщении напряжения пучения в общем случае возрастают в связи с увеличением начальной влажности, миграционных потоков влаги деформации пучения и роли расклинивающего давления.

Дополнительным фактором, усиливающим влияние криогенных процессов, выступает изменение годового цикла температуры транспортируемого газа. Выпучивание газопровода, проложенного в многолетнемерзлых грунтах, происходит тогда, когда летняя температура транспортируемого газа является положительной при отрицательной среднегодовой. В результате, под газопроводом формируется промерзающий зимой ореол сезонного оттаивания. В этих случаях выпучивание газопровода может составлять 5-7 см в год. В общем случае, вертикальные перемещения газопроводов является следствием выпучивания и всплывания и проявляются даже при наличии пригрузов.

Постановка задачи. Математическое моделирование и расчеты напряженно-деформированного состояния осуществлялись с учетом ранее применяемых авторами подходов и методик [5-13].

Рассматривается задача определения напряженно-деформированного состояния трубы, расположенной в тяжелой среде (рис. 3). Считается, что температура среды, трубы и газа в ней разнятся между собой. Кроме того, предусматривается возможность объемного расширения среды за счет сезонного замерзания воды в порах. Возможен также ситуативный подъем нижней границы массива за счет криогенного пучения. Исследуется поведение системы геологическая среда – трубопровод в поперечном сечении.

Следует отметить, что для полноты информации о напряженном состоянии трубы необходимо также решать задачу изгиба трубы, однако в данном сообщении она

не рассматривается. Наша задача сводится к определению напряженно-деформированного состояния матрицы с расположенным внутри включением с прослойкой.

Основные упрощающие гипотезы:

1) Рассматривается разрез определенного участка трубопровода, что снижает размерность задачи на 1, т.е. дает возможность рассматривать не объемную, а плоскую задачу.

2) Размеры сечения выбираем такими, которые позволили бы пренебречь влиянием боковых сторон сечения (системы).

3) Считаем, что реологический закон для среды будет упругим, т.е. между напряжениями и деформациями выполняется зависимость $\sigma_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}$ (здесь λ, μ - материальные константы упругого материала, $\theta = \varepsilon_{ii}$, а δ_{ij} - символ Кронеккера).

4) Деформации принимаем малыми и линейными, т.е. справедливыми являются соотношения Коши $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$

5) Считаем, что можно провести осреднение свойств среды, в которой расположена труба, в частности, ее термомеханических характеристик (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент линейного расширения).

6) При рассмотрении упругой задачи принимаем, что распределение температуры в данном сечении известно и является определенной функцией, зависящей от координат сечения.

Рассматриваемая задача решается с помощью модифицированного [11] численно-аналитического метода граничных элементов [13], который обеспечивает высокую эффективность и точность расчетов. Вкратце рассмотрим определяющие соотношения этого метода для рассматриваемой задачи.

Определяющие соотношения модифицированного метода граничных элементов:

Для получения граничных интегральных уравнений используется теорема взаимности работ Бетти, из которой выводятся соотношения Сомильяно. В рассматриваемой задаче будем использовать соотношения Сомильяно для матрицы:

$$\chi(S)u_i(\xi) = \int_{\Gamma} \sigma_{ij} n_j U_i^k d\Gamma - \int_{\Gamma} g_i^k u_i d\Gamma + \int_S X_i U_i^k dS \quad \begin{cases} \chi = 1, \xi \in S \\ \chi = 0, \xi \notin S \end{cases} \quad (1)$$

где U_i^k создают матрицу фундаментальных решений, а g_j^k определяются соотношениями $g_i^k = \left(\lambda U_{i,l}^k \delta_{ij} + \mu (U_{i,j}^k + U_{j,i}^k) \right) n_j$,

причем U_i^k удовлетворяют систему уравнений

$$(\lambda + \mu) U_{i,l}^k + \mu U_{i,j}^k + \delta_{ik} \delta(x - \xi) = 0 \quad (3)$$

и имеют вид

$$U_i^k(x, \xi) = \frac{1}{8\pi(1-\nu)\mu} \left[(3-4\nu) \ln r \delta_{ik} - \frac{(x_i - \xi_i)(x_k - \xi_k)}{r^2} \right] \quad (4)$$

где $r^2 = (x_l - \xi_l)(x_l - \xi_l)$.

На основании соотношений Сомильяно путем предельного перехода, получим систему гранично-контактных уравнений для матрицы (рис.4):

$$\frac{1}{2} \delta_{kj} u_j^0(x) = \int_{S_0 \setminus S_1} X_i U_i^k(x, \xi) dS + \int_{\Gamma_0} U_i^k(x, \xi) \sigma_{ij} n_j d\Gamma - \int_{\Gamma} g_j^k(x, \xi) u_j(\xi) d\Gamma,$$

$$\sigma_{ij} n_j |_{\Gamma} = p_i, \begin{cases} \chi = 1, \xi \in S_0 \setminus S_1 \\ \chi = 0, \xi \notin S_0 \setminus S_1 \end{cases} \quad (5)$$

для каждого слоя

$$\chi(S) u_k^{(p)}(\xi) = \int_{\Gamma_p} \sigma_{ij}^{(p)} n_j^{(p)} U_i^{k(p)} d\Gamma + \int_{\Gamma_{p+1}} \sigma_{ij}^{(p)} n_j^{(p+1)} U_i^{k(p)} d\Gamma_{p+1} -$$

$$- \int_{\Gamma_p} g_i^{k(p)} u_i d\Gamma_p - \int_{\Gamma_{p+1}} g_i^{k(p)} u_i d\Gamma_{p+1} + \int_{S_p \setminus S_{p+1}} X_i U_i^{k(p)} dS_p$$

$$\sigma_{ij}^{(p)} n_j |_{\Gamma_p} = \sigma_{ij}^{(p+1)} n_j |_{\Gamma_p}, \begin{cases} \chi = \frac{1}{2}, \xi \in S_p \setminus S_{p+1} \\ \chi = 0, \xi \notin S_p \setminus S_{p+1} \end{cases} \quad (6)$$

для внутреннего включения:

$$\chi(S) u_k^{(N)}(\xi) = \int_{\Gamma_N} s_{ij} n_j U_i^{k(N)} d\Gamma_N - \int_{\Gamma_N} g_i^{k(N)} u_i d\Gamma_N + \int_{S_N} X_i U_i^{k(N)}(x, \xi) dS_N,$$

$$\sigma_{ij}^{(N-1)} n_j |_{\Gamma_p} = \sigma_{ij}^{(N)} n_j |_{\Gamma_p}, \begin{cases} \chi = \frac{1}{2}, \xi \in S_N \\ \chi = 0, \xi \notin S_N \end{cases} \quad (7)$$

Выполним дискретизацию границы рассматриваемой области и введем на каждом элементе дискретизации аппроксимацию плотностей потенциалов простого и двойного слоя:

перемещений

$$u_1^{i(p)}(x') = a_{1i}^p x'_1 + a_{2i}^p x'_2 + a_{3i}^p,$$

$$u_2^{i(p)}(x') = a_{4i}^p x_1' + a_{5i}^p x_2' + a_{6i}^p, \quad (8)$$

и напряжений

$$\begin{aligned} \sigma_{11}^{i(p)}(x') &= (\lambda_p + 2\mu_p) a_{1i}^p + \lambda_p a_{5i}^p \\ \sigma_{22}^{i(p)}(x') &= (\lambda_p + 2\mu_p) a_{5i}^p + \lambda_p a_{1i}^p \\ \sigma_{12}^{i(p)}(x') &= \mu_p (a_{2i}^p + a_{4i}^p), \rho = 1, \dots, N, i = 1, \dots, M_\rho \end{aligned} \quad (9)$$

Чтобы обеспечить требуемую точность метода при низкой толщине h_i слоев покрытия, необходимо увеличить число дискретизированных элементов на контуре включения: чем меньше толщина слоя, тем большим должно быть это число. Другими словами, мы должны удовлетворить условие $d_{el} \leq \min\{h_i\}$. Это позволяет грубо оценить величину d_{el} — средний размер элемента, поскольку $R_{incl} = 1$, N_{incl} — число отрезков на контуре включения. Для круглого включения имеем $d_{el} = \frac{2\pi R_{incl}}{N_{incl}} \approx \frac{3R_{incl}}{N_{incl}}$.

Так, если мы хотим рассмотреть задачу с $h = 0.01$ и $R_{incl} = 1$, мы должны обеспечить выполнение условия $N_{incl} \geq 300$.

Построение математической модели участка трубопровода с учетом всех рассмотренных факторов, воздействующих на систему.

Напряжения и деформации связаны между собой соотношениями Дюганеля-Неймана:

$$\sigma_{ij} = s_{ij} - 3K\alpha T \delta_{ij}, i, j = 1, 2 \quad (10)$$

$$\text{где } K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, s_{ij} = \lambda\theta\delta_{ij} + 2\mu\varepsilon_{ij}, \psi_i = \frac{\partial p}{\partial x_i},$$

Уравнение упругого равновесия системы, при воздействии на нее сил гравитации, выпучивания, замерзания грунта, температурного поля запишутся в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} - 3\langle K_0 \rangle \langle \delta V_0 \rangle_{,i} - 3\langle K_0 \rangle \langle \alpha_0 \rangle T_{,i} &= 0 \\ \sigma_{ij,j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} - 3\langle K_p \rangle \langle \delta V_p \rangle_{,i} - 3\langle K_p \rangle \langle \alpha_p \rangle T_{,i} &= 0, p = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (11)$$

Граничные условия по напряжениям будут иметь вид:

$$s_{ij}^0 n_j^0 |_{\Gamma_0} = 3\langle K_0 \rangle (\delta V(\Gamma_0) + \langle \alpha_0 \rangle T(\Gamma_0)) n_i^0, i, j = 1, 2 \quad (12a)$$

а по перемещениям:

$$u_j^0 |_{\Gamma_0} = f_j, j = 1, 2 \quad (12b)$$

Условия контакта на границе труба-среда при действии всех вышеперечисленных факторов запишутся в виде:

$$\begin{aligned}
& s_{ij}^p n_j^p - \chi(p) 3 \langle K_p \rangle \delta V(\Gamma_p) n_i^p - 3 \langle K_p \rangle \langle \alpha_p \rangle T(\Gamma_p) n_i^p |_{\Gamma_p} = \\
& s_{ij}^{p+1} n_j^{p+1} - \chi(p) 3 \langle K_{p+1} \rangle \delta V(\Gamma_p) n_i^p - 3 \langle K_{p+1} \rangle \langle \alpha_{p+1} \rangle T_p(\Gamma_p) n_i^0 |_{\Gamma_p} \\
& u_i^p |_{\Gamma_p} = u_i^{p+1} |_{\Gamma_p}, i, j = 1, 2, p = 1, \dots, N, \begin{cases} \chi = 0, p = p^* \\ \chi = 1, p \neq p^* \end{cases} \quad (13)
\end{aligned}$$

где p^* -- номер граничащего с трубой слоя.

В случае воздействия выпучивания записываются условия по перемещениям на нижней границе сечения:

$$u_2 |_{\Gamma} = ax^2 + bx + c, u_1 |_{\Gamma} = 0 \quad (14)$$

Система гранично-контактных уравнений будет иметь вид для матрицы

$$\begin{aligned}
\chi(S) u_k^{(0)}(\xi) &= \int_{\Gamma_0} s_{ij}^{(0)} n_j^{(0)} U_i^{k(0)} d\Gamma + \int_{\Gamma_1} s_{ij}^{(0)} n_j^{(1)} U_i^{k(0)} d\Gamma_1 - \int_{\Gamma_0} g_i^{k(0)} u_i d\Gamma_0 - \\
& - \int_{\Gamma_1} g_i^{k(0)} u_i d\Gamma_1 - \int_{S_0 \setminus S_1} U_i^{k(0)} \psi_i^{(0)} dS_0 - \\
& - 3 \int_{\Gamma_0} \langle K_0 \rangle \langle \alpha_0 \rangle T n_i^0 U_i^{k(0)} d\Gamma_0 - 3 \int_{\Gamma_1} \langle K_0 \rangle \langle \alpha_0 \rangle T n_i^1 U_i^{k(0)} d\Gamma_1 + 3 \int_{S_0 \setminus S_1} \langle K_0 \rangle \langle \alpha_0 \rangle T U_{i,i}^{k(0)} dS_0, \\
& \begin{cases} \chi = \frac{1}{2}, \xi \in S_0 \setminus S_1 \\ \chi = 0, \xi \notin S_0 \setminus S_1 \end{cases} \quad (15)
\end{aligned}$$

для каждого из слоев

$$\begin{aligned}
\chi(S) u_k^{(p)}(\xi) &= \int_{\Gamma_p} s_{ij}^{(p)} n_j^{(p)} U_i^{k(p)} d\Gamma + \int_{\Gamma_{p+1}} s_{ij}^{(p)} n_j^{(p+1)} U_i^{k(p)} d\Gamma_{p+1} - \int_{\Gamma_p} g_i^{k(p)} u_i d\Gamma_p - \\
& - \int_{\Gamma_{p+1}} g_i^{k(p)} u_i d\Gamma_{p+1} - \int_{S_p \setminus S_{p+1}} U_i^{k(p)} \psi_i^{(p)} dS_p - \\
& - 3 \int_{\Gamma_p} \langle K_p \rangle \langle \alpha_p \rangle T n_i^p U_i^{k(p)} d\Gamma_p - 3 \int_{\Gamma_{p+1}} \langle K_p \rangle \langle \alpha_p \rangle T n_i^{p+1} U_i^{k(p)} d\Gamma_{p+1} + 3 \int_{S_p \setminus S_{p+1}} \langle K_p \rangle \langle \alpha_p \rangle T U_{i,i}^{k(p)} dS_p, \\
& \begin{cases} \chi = \frac{1}{2}, \xi \in S_p \setminus S_{p+1} \\ \chi = 0, \xi \notin S_p \setminus S_{p+1} \end{cases} \quad (16)
\end{aligned}$$

для внутреннего включения

$$\begin{aligned}
\chi(S) u_k^{(N)}(\xi) &= \int_{\Gamma_N} s_{ij} n_j U_i^{k(N)} d\Gamma_N - \int_{\Gamma_N} g_i^{k(N)} u_i d\Gamma_N - \\
& - \int_{S_N} U_i^{k(N)} \psi_N^{(N)} dS_N - 3 \int_{\Gamma_N} \langle K_N \rangle \langle \alpha_N \rangle T n_i U_i^{k(N)} d\Gamma_N + 3 \int_{S_N} \langle K_N \rangle \langle \alpha_N \rangle T U_{i,i}^{k(N)} dS_N, \begin{cases} \chi = \frac{1}{2}, \xi \in S_N \\ \chi = 0, \xi \notin S_N \end{cases} \quad (17)
\end{aligned}$$

плюс граничные условия (12) и условия контакта (13).

На основании разработанного алгоритма создана программа для расчета нагрузок, передающихся на трубопровод от внешней среды. Учтены следующие факторы, приводящие к возникновению нагрузки на трубопровод:

- а) влияние сил гравитации на трубопровод;
- б) влияние сил, возникающих вследствие объемного расширения водонасыщенной среды при ее замерзании;
- в) влияние нагрузок от выпучивания участков среды под трубопроводом;
- г) влияние разности температур нагретой трубы и среды;
- д) влияние внутреннего давления газа в трубе.

К программе была написана удобная графическая оболочка для ввода основных расчетных параметров. Программа может работать в трех основных режимах: пользователя, эксперта и режиме отладки.

Выводы на основании предварительных расчетов. Анализ полученных результатов расчета напряженно-деформированного состояния системы геологическая среда - трубопровод подтверждает существенное влияние геологической среды на трубопровод. К наиболее проблемным факторам в плане безопасности эксплуатации трубопроводов следует отнести изменение объема вследствие замерзания грунта и локальное пучение грунтов вследствие льдонакопления. Предварительная количественная оценка этих и других факторов приводит к следующим выводам.

1. Наиболее критическим фактором с точки зрения работоспособности конструкции газопровода является сезонное вымерзание грунта в сочетании с прекращением подачи газа.
2. Следующим, не менее опасным фактором, влияющим на работоспособность трубопровода, является выпучивание грунта и как следствие возникающий изгиб и гофрирование отдельных участков трубопровода.
3. Влияние гравитационных нагрузок для характерных глубин залегания трубопровода не столь критично по сравнению с двумя предыдущими факторами (по абсолютной величине меньше в несколько раз).
4. Приблизительно сравнимым с гравитационным фактором является фактор внутреннего давления газа в трубе.
5. Влиянием температуры с учетом характерных изменений градиентов температуры в рабочем режиме трубопровода можно практически пренебречь.

Список литературы

1. Положение по организации и проведению комплексного диагностирования линейной части магистральных газопроводов ЕСГ. – М.: ИРЦ Газпром, 1998. – 53 с.
2. Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1989. - 454 с.
3. Горелик Я.Б. Влияние текучести льда на протаивание мерзлых пород вокруг скважин // Газовая промышленность. – 2004. - № 11. – С.59-63.
4. Ершов Э.Д. Физико-химия и механика мерзлых пород. – М.:Изд-во Моск. ун-та, 1986. – 336 с.
5. Лавренюк М.В. Дослідження впливу умов контакту на напружено-деформований стан нескінченної пружної платівки з двома круговими включеннями // Вісник Київського університету. – 1997. – №4. – С.62-70.
6. Лавренюк М.В. Дослідження впливу умов контакту на напружено-деформований стан нескінченної пружної платівки з двома еліптичними включеннями // Вісник Київського університету. – 1998. – №2. – С.63-69.
7. Лавренюк М.В. Дослідження напружено-деформованого стану нескінченної пружної платівки з прямокутними включеннями за умов ідеального та неідеального контактів // Вісник Київського університету. – 1998. №4. – С.17-26.
8. Лавренюк М.В. Дослідження напружено-деформованого стану скінченної платівки з двома включеннями за умов ідеального та неідеального контактів // Вісник Київського університету. – 1999. – №2. – С.40-49.
9. Шевчук В.В., Коровайчук И.М. Математическая модель структуры центрального типа с жестким ядром // Геология и геофизика. – 1992. - №2. – С. 31-36.
10. Шевчук В.В., Лихачев В.В. Математическая модель поля напряжений, вызванного тепловой аномалией в упругой среде // Геофиз. журн. – 1996. – Т.18. - №6. – С. 74-80.
11. Лавренюк В.І. Про визначення напружено-деформованого стану матриці з включенням методом граничних елементів // Вісник Київського університету. Серія: фіз.-мат. науки. - 1993. - №2.
12. Іванік О.М., Михайленко А.Г., Шевчук В.В. Передумови та основні аспекти створення підсистеми аналізу геологічного середовища для Географічних інформаційних систем магистральних трубопроводов // Вісник Київського університету. Серія Геологія. – 2005. – Вип. 33. – С.53-56.

13. Бреббиа К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. – М.: Мир, 1987. – 524 с.

Проведено математическое моделирование и расчеты напряженно-деформированного состояния системы геологическая среда – трубопровод в условиях криолитозоны, подтверждающие существенное влияние геологической среды на трубопроводные комплексы. Проанализированы геологические факторы и процессы, нарушающие динамическое равновесие в исследованной природно-техногенной системе. В рамках теории упругости кусочно-однородных тел рассмотрено плоскую деформацию матрицы с включением (труба), выполненным из другого материала. На основании математической модели с использованием модифицированного метода граничных элементов построен численный алгоритм решения рассматриваемой задачи. Осуществлена предварительная количественная оценка геологических факторов, среди которых наиболее опасными являются процессы вымерзания и выпучивания грунта.

Проведено математичне моделювання та розрахунки напружено-деформованого стану системи геологічне середовище – трубопровід в умовах криолітозони, що підтверджують істотний вплив геологічного середовища на трубопровідні комплекси. Проаналізовано геологічні фактори та процеси, що порушують динамічну рівновагу у дослідженій природно-техногенній системі. У межах теорії пружності кусково-однорідних тіл розглянуто плоску деформацію матриці із включенням (труба), виконаним з іншого матеріалу. На основі математичної моделі із застосуванням модифікованого методу граничних елемент побудовано числений алгоритм розв'язку задачі. Здійснено попередню кількісну оцінку геологічних факторів, серед яких найнебезпечнішими є процеси вимерзання та випучування ґрунту.

Mathematical modelling and calculations of the stress-deformation state of the system geological environment – pipeline in the cryolithozone are carried out. They are proving an essential influence of geological environment on the trans pipeline systems. Geological factors and processes which violate the dynamic balance of the nature-technical systems are analyzed. Within the framework of the theory of elasticity of piecewise-homogeneous bodies the flat deformation of a matrix (environment) with the inclusion (pipe) executed from other material was considered. On the basis of this mathematical model, incorporating a modified method of boundary elements, the numerical algorithm has been developed to solve this problem. The prealignment assessment of geological factors is carried out. The most dangerous processes are frost injury and bulging.

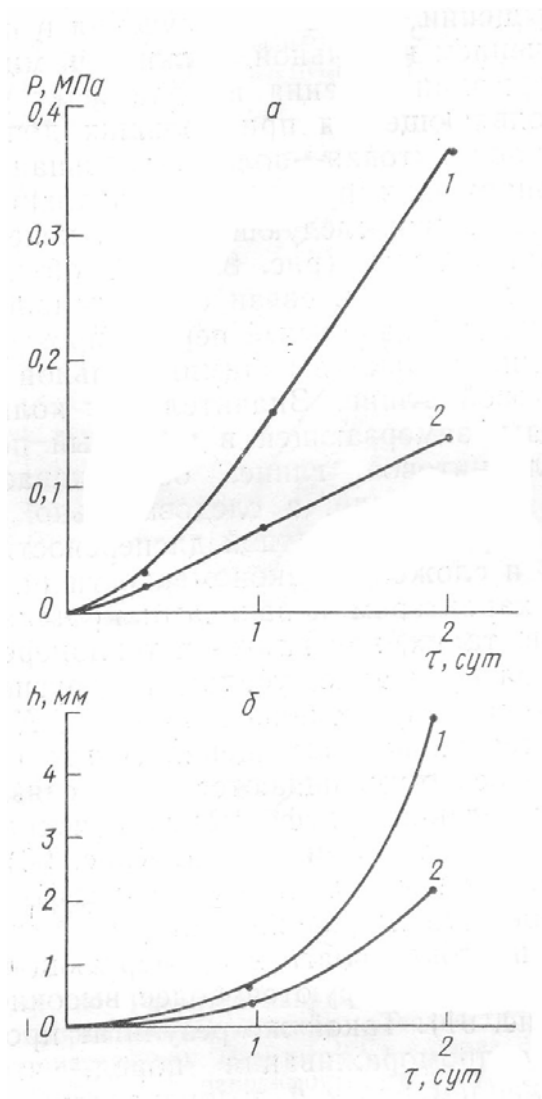


Рис. 1. Развитие напряжений (а) и деформаций (б) пучения поверхности промерзающего ($t_{\text{пов}} = -2^\circ\text{C}$) суглинка во времени (τ) при наличии (1) и отсутствии (2) подтока влаги [4].

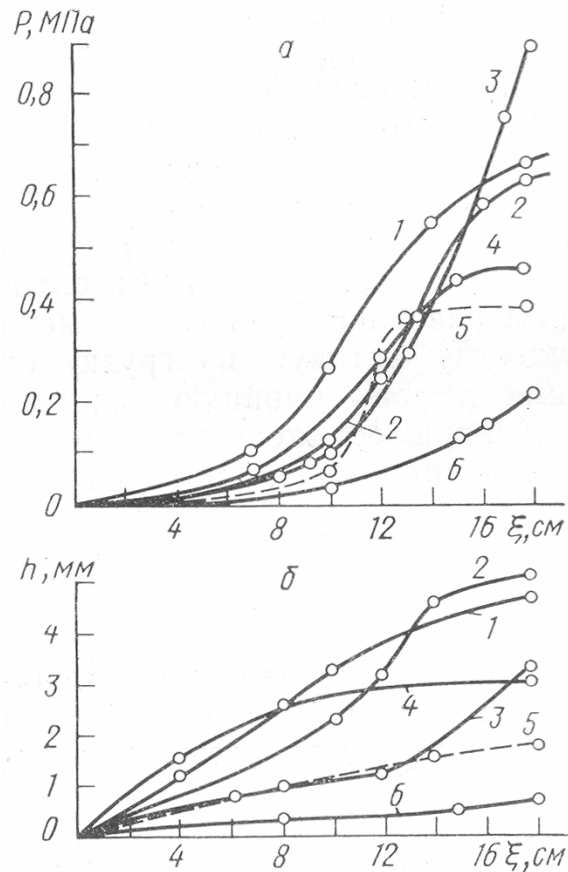


Рис. 2. Развитие напряжений (а) и деформаций (б) пучения поверхности промерзающих пород ($t_{\text{пов}} = -2^{\circ}\text{C}$) в зависимости от заглубления фронта промерзания (ξ): 1 - каолиновая глина; 2 - полиминеральная глина; 3 - монтмориллонитовая глина; 4 - торф; 5 - супесь; 6 - песок [4].

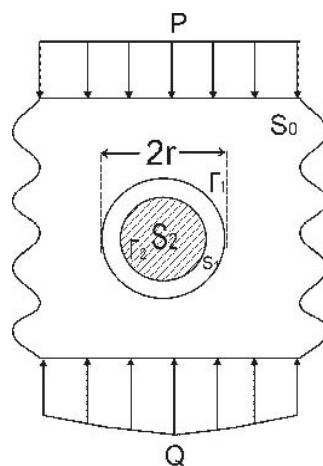


Рис. 3. Модель сечения системы геологическая среда – трубопровод.

Рис.4. Схема дискретизации границ включений при расчете методом граничных элементов.