

Кількісна оцінка факторів впливу на напружено-деформований стан у системі геологічне середовище-трубопровід у кріолітозоні (за даними комп'ютерного моделювання)

© Іванік О.М., Лавренюк М.В., 2007

Quantitative assessment of stress-strain state factors influence in the system geological environment-pipeline in cryolithozone (on the base of computer modelling)

Ivanik O.M., Lavrenyuk M.V., 2007

Вступ. Багатофакторний аналіз існуючих природно-техногенних трубопровідно-транспортних систем у межах різних ландшафтно-кліматичних зон демонструє негативний вплив геологічного середовища на їх безпечне функціонування. Можливості моделювання екстремальних ситуацій, пов'язаних із дією різноманітних геологічних факторів, виникають лише на основі оперативних розрахунків напружено-деформованого стану у системі геологічне середовище-трубопровід у широкому діапазоні початкових та граничних мов, а також природних та техногенних параметрів. Особливо важливого значення такі розрахунки набувають у межах територій з активним проявом небезпечних геологічних процесів, які мають широке розповсюдження і у кріолітозоні.

Напружено-деформований стан (НДС) системи геологічне середовище-трубопровід залежить від багатьох факторів, які визначаються як геологічними умовами території прокладання трубопроводів, геоморфологічними параметрами та ландшафтно-кліматичною зональністю, так і техногенними чинниками, що зумовлені технологічними характеристиками самих трубопровідно-транспортних систем. Аналіз впливу негативних природних процесів на ці системи вводить у численних публікаціях [1-5], однак проблемним залишається питання щодо кількісної характеристики цього впливу та можливість об'єктивного прогнозу екстремальних ситуацій у функціонуванні цих природно-техногенних систем. Для оцінки факторів впливу на напружено-деформований стан у системі геологічне середовище-трубопровід розроблено розрахунково-аналітичний модуль із відповідним геолого-фізичним та математичним моделюванням стану природно-техногенної системи. На основі комп'ютерного моделювання впливу різного роду кріогенних процесів на трубопровідні системи було проведено кількісну оцінку факторів цього впливу на напружено-деформований стан у системі геологічне середовище-трубопровід.

Кількісна оцінка факторів впливу на НДС системи геологічне середовище – трубопровід. НДС системи геологічне середовище – трубопровід визначається низкою геологічних і техногенних чинників. Певний вплив здійснює рельєф місцевості, склад та структура гірських порід, вологість, ступінь водононасичення та пов'язана з ним льодовистість, теплофізичні особливості порід,

температура повітря, кількість опадів, характер снігонакопичення та сніготанення тощо. Всі вище перераховані фактори належать до суто геологічних та природних умов впливу. Крім того, значення мають техногенні чинники, до яких слід віднести певні характеристики трубопроводу (діаметр, товщина стінки, характер матеріалу) та його експлуатаційні параметри, зокрема тепловий режим, глибину залягання та інші.

Моделювання впливу криогенних процесів на трубопровідні системи і відповідно визначення напружено-деформованого стану системи геологічне середовище – трубопровід спрямоване на оцінку впливу гравітаційних сил, а також процесів сезонного й багаторічного випучування ґрунтів, наледутворення, теплового осідання ґрунту з врахуванням різних кліматичних, літологічних і механічних параметрів.

Для оцінки впливу криогенних процесів на трубопроводи побудовано фізичні моделі навантажень окремої ділянки трубопроводу, а також визначено механічні (математичні моделі) фізичної задачі. У межах теорії пружності кусково-однорідних тіл розглядалась плоска деформація матриці (середовище) із включенням (трубою). Поставлена задача зводилась до вирішення системи диференціальних рівнянь Нав'є у часткових похідних. Ця система завдяки використанню енергетичних принципів теорії пружності зводиться до системи граничних інтегральних рівнянь. На основі розробленої математичної моделі разом із модифікованим методом граничних елементів (МГЕ) запропоновано численний алгоритм вирішення поставленої задачі. За рахунок застосування модифікованого МГЕ розв'язання вихідної системи граничних інтегральних рівнянь зводилось до розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь, що визначають коефіцієнти апроксимації невідомих щільностей пружних потенціалів простого та подвійного шарів на межах [6,7].

Слід зазначити, що адекватність математичних моделей залежить від заданих початкових та граничних умов системи. Визначення певного впливу кожного з факторів здійснювалося при умові обмеження активного впливу інших факторів. Штучне спрощення природної моделі криогенезу виявилось необхідним для отримання об'єктивних результатів та аналізу можливих чинників зміни НДС у природно-техногенній системі.

Створена геолого-фізична модель функціонування системи геологічне середовище – трубопровід є комбінованою, що враховує стан геологічного середовища із включенням техногенного об'єкту - трубопроводу (рис.1). Головна увага при проведенні розрахунків зосереджувалась на оцінці впливу геологічного середовища на трубопровід, що і слугувало визначальною метою досліджень. Спеціальні розрахунки щодо міцнісних властивостей трубопроводу не проводились. Всі наведені дані стосуються поперечного перерізу труби.

У результаті тестування розробленого модуля та виконаних розрахунків визначено характер впливу на НДС природних та техногенних факторів у системі геологічне середовище – трубопровід. Головними вихідними параметрами слугували інтенсивність напружень з боку середовища (МПа), інтенсивність напружень на зовнішньому контурі труби (МПа), інтенсивність напружень на внутрішньому контурі труби (МПа).

До **геологічних** факторів впливу було віднесено наступні:

1. Літологічні різновиди гірських порід. Напруження й деформації у мерзлих породах, разом із величиною недопущення деформації поверхні ґрунту, істотно залежать від складу й будови відкладів. Зі збільшенням дисперсності й пилюватості ґрунтів при повному їх водонасиченні напруження пучіння в цілому зростають у зв'язку зі збільшенням початкової вологості, міграційних потоків води, деформації пучіння й ролі фактора розклинюючого тиску. У зв'язку із цим літологічний фактор і характер водонасичення є визначальними характеристиками при проведенні аналізу впливу кріогенних явищ на техногенні системи.

Оскільки у зоні поширення кріогенних явищ поширені переважно пухкі породи, то було проаналізовано наступні головні літологічні різновиди порід: **піски, супіски, суглинки та глини**. Вологість піщаних та глинистих порід в умовах природного залягання може змінюватись у широких межах. Так, природна вологість пісків у зоні аерації нерідко сягає 4-5%, у зоні капілярного зволоження та насичення – 27-30 %, а вологість дрібнозернистих та тонкозернистих пісків у цій зоні може сягати 35-40 %. Природна вологість глин змінюється у широких межах: у сучасних глинистих осадках озер та морів вона сягає 80-90% та більше, у глинистих породах малого та середнього ступеня літифікації (глини, ущільнені глини) – 12-15 – 50-60%, у аргілітах – 3-5%.

Оскільки вплив мерзлих порід визначається значеннями механічних напружень, то головними їх характеристиками слугували такі механічні параметри як модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона. Враховувались також значення густини порід.

Так, зміна значень модуля Юнга або модуля загальної деформації, що зумовлено неоднозначністю визначення цих параметрів та наведення різних кількісних показників у відповідних довідникових джерелах [8,9], призводить до зміни інтенсивності напружень на зовнішньому контурі труби, а також інтенсивності напружень на зовнішньому контурі труби та з боку середовища. Так, наприклад, для супісків у мерзломому стані ця величина змінюється практично у 6-7 разів. Інтенсивність напружень по внутрішньому контуру труби збільшується більше, ніж у 8 разів.

Слід зазначити, що модуль загальної деформації є характеристикою, аналогічною модулю пружності твердих тіл. Однак піщані та глинисті породи, на відміну від твердих тіл, мають значні залишкові деформації, що зазвичай набагато перевищують пружні. Тому модуль загальної деформації цих порід, на відміну від модуля пружності, характеризує загальні їх деформації на стиснення, як пружні, так і залишкові. Прямо пропорційна залежність між напруженнями та відносними деформаціями у піщаних та глинистих порід встановлюється у межах відносно обмеженого інтервалу тиску.

Таким чином, для піщаних та глинистих порід у певних межах напружень характерною є лінійна залежність між загальною деформацією та напруженням, що її викликає. Ця залежність є другою основною закономірністю їх механічних властивостей (закон деформування): відносна загальна деформація піщаних та глинистих порід є прямо пропорційною діючим напруженням.

Різні літологічні типи осадкових мерзлих гірських порід характеризуються диференційованими значеннями модуля Юнга (або модуля загальної деформації). Цей параметр для сезонно- та багаторічномерзлих порід істотним чином залежить від температури порід та їх вологості. Для глин у

мерзлого стані за даними Єршова Є.Д. [8] модуль Юнга при температурі $-1,2^{\circ}\text{C}$ становить 680 МПа, а при $-8,4^{\circ}\text{C}$ 2780 МПа, за даними Кондакової, 1984 для цього ж типу порід при температурі $-1,2^{\circ}\text{C}$ встановлено значення модуля Юнга у 18,1 МПа при сумарній вологості 28%, 3 МПа при сумарній вологості 46 %, та 10,1 МПа при сумарній вологості 42 %.

Враховуючи ці змінні значення, у результаті розрахунків, що передбачали відсутність процесів випучування та вимерзання та при заляганні трубопроводу на глибині в 1 м отримуємо відповідно різні значення напружень. Так, для глинистих відкладів при значеннях модуля Юнга 2780 МПа значення інтенсивності напружень по зовнішньому контуру труби становлять 3,7 МПа, при 680 МПа - 3,5 МПа, при 18,1 МПа – 5,7 МПа, при 3 МПа – 3,5 МПа. Інтенсивність напружень на внутрішньому контурі труби становить при значеннях модуля Юнга 680 МПа - 5,7 МПа, а при 2780 МПа – 5,9 МПа, при 18,1 – 16,2 МПа, при 3 МПа – 5,7 МПа. Інтенсивність максимальних напружень з боку середовища становить 0,02 МПа при значеннях модуля Юнга 680 МПа та 0,06 МПа при значення модуля Юнга 2780 МПа, при значеннях модуля Юнга у 18,1 та 3 МПа – 0,01 МПа.

Для мерзлих піщаних порід, модуль Юнга яких становить 22500 МПа, інтенсивність напружень з боку середовища складає 0,9 МПа, на зовнішньому контурі труби – 7,2 МПа, на внутрішньому контурі труби – 9,1 МПа. Для супісків із модулем Юнга 20000 МПа ці значення складають відповідно 1 МПа, 8,4 МПа та 10,3 МПа, із модулем Юнга 2250 МПа – 0,1 МПа, 3,6 МПа та 5,8 МПа (табл.1).

Таблиця 1. Залежність інтенсивності напружень від типу гірських порід та модуля Юнга

Тип порід	Модуль Юнга, МПа	Інтенсивність напружень з боку середовища, МПа	Інтенсивність напружень на зовнішньому контурі труби, МПа	Інтенсивність напружень на внутрішньому контурі труби, МПа
Піски мерзлі	22500	0.9	7.2	9.1
Супіски мерзлі	20000	1	8.4	10.3
Супіски мерзлі	2250	0.1	3.6	5.8
Суглинки мерзлі	48	0.02	3.4	5.5
Глини мерзлі	2780	0.06	3.7	5.9
Глини мерзлі	680	0.02	3.5	5.7
Глини мерзлі	18,1	0.01	5.7	16.2

Глини мерзлі	3	0.01	3.5	5.7
--------------	---	------	-----	-----

Таким чином, зміна модуля Юнга для мерзлих порід, який істотним чином залежить від літологічного типу порід, температури та ступеню льодовистості порід, призводить до зміни кількісних значень показників напружень як з боку середовища, так і на зовнішньому та внутрішньому контурах труби. Так, при інших рівних значеннях параметрів середовища (при знятті інших силових чинників) та трубопроводу максимальні напруження виникають при впливі на трубопровідні системи мерзлих пісків (модуль Юнга 22500 МПа) та супісків (20000 МПа), що створюються при температурах нижче 8° С та високому ступені льодовистості порід.

2. Вимерзання. Цей показник характеризує зміну об'єму мерзлих порід у залежності від водонасичення та вологості гірських порід. Дослідження впливу вологості й пористості ґрунту на величину пучіння показує, що в породах, що промерзають, зменшення пористості й зниження вологості приводять до зменшення величини деформацій пучіння за рахунок зменшення сумарного льодонакопичення. Умови повного вологонасичення призводять до зменшення величини усадки ґрунту.

Загальна величина пучіння залежить від величини пучіння породи за рахунок збільшення на 9 % об'єму води при переході в лід, від величини пучіння за рахунок води, яка надходить у мерзлу частину породи в результаті міграції або ін'єкції, а також від величини деформацій усадки відталі зони породи, яка обезводнюється. Найбільшу роль у формуванні сумарної величини пучіння порід, що промерзають, відіграє льодонакопичення в них за рахунок вологи, що мігрувала в мерзлу зону (90-95 %). Деформація усадки, що залежить від складу й будови породи та умов її промерзання, може досягати значної величини, внаслідок чого буде спостерігатися не підняття, а опускання поверхні ґрунту. Так, наприклад, незважаючи на значні величини міграційного льодонакопичення в глині, величина пучіння в ній може бути меншою, ніж у суглинку, за рахунок розвитку більших деформацій усадки. Тому одним із головних питань, що потребують кількісного розв'язку, це визначення величини зони усадки порід. За даними багатьох дослідників [1, 4, 5], мерзлі породи, що залягають нижче 10-15 м від поверхні, особливо на півночі Західного Сибіру, утворились у результаті епігенетичного промерзання, тобто їх промерзання відбувалось після формування осадочного шару. Для промерзання такого типу формування надлишкової льодовистості пов'язано, як правило, із сегрегаційним льодовиділенням, для якого (окрім впливу літологічного фактору) характерним є істотний вплив ваги вищележачої товщі на розміри шлірів льоду, які і визначають надлишкову льодовистість порід.

Експериментально встановлено [9], що замерзання води в замкнутому середовищі, яким можуть бути пори ґрунту, може призвести до виникнення в умовах недопущення деформації значних напружень. Приблизно вони оцінюються з рівняння Клапейрона-Клаузиуса: вони становлять близько 13,4 Мпа на 1° зниження від'ємної температури. Однак оскільки природні ґрунти не можуть розглядатися як замкнута й недеформована система, то частка напружень випучування в загальній величині напружень і деформацій пучіння порід, що промерзають, не є домінуючою, а проявляється

як доповнення до напружень набухання, що розвивається за рахунок розклинюючої дії тонких плівок мігруючої води.

Оскільки вологість порід є змінною, то параметр вимерзання у відсотках від загального об'єму масиву може також змінюватись у межах від 0 до 8 %. Саме зміна загального об'єму системи є тією чутливою характеристикою, що реагує на кількість вологи у породі. Виходячи із граничних умов системи, слід зазначити що обов'язково слід враховувати значення допущеної деформації при збільшенні об'єму масиву та релаксацію певної частини напружень. Окремим випадком є процес підтоку вологи (наприклад, плівкової води), що також забезпечує збільшення вологості порід і може бути врахований у представленому варіанті розв'язку тільки як зміна об'єму системи у залежності від процесів вимерзання. За проведеними розрахунками підтверджено, що збільшення водонасиченості порід, а отже і об'єму замерзаючих порід, призводить до зростання інтенсивності напружень з боку середовища для усіх типів порід (рис.2, 3).

Так, для піщаних відкладів, модуль Юнга котрих складає 22500 МПа, густина – 1750 кг/м³ при збільшенні об'єму від 0 до 8 % внаслідок вимерзання інтенсивність напружень з боку середовища змінюється від 1,3 до 1110,9 МПа, інтенсивність напружень на внутрішньому контурі труби – від 11,9 до 3241,6 Мпа (табл.2) Критичним для стану трубопроводу є 3-х-відсоткова зміна об'єму мерзлих пісків, що викликає напруження з боку середовища у 423,2 Мпа, на зовнішньому контурі труби - 399 МПа. Закономірним є розподіл напружень внаслідок вимерзання по контуру трубопроводу із незначними варіаціями від 141,9 до 139,6 МПа (для 1 % збільшення об'єму).

Таблиця 2. Залежності інтенсивності напружень від зміни об'єму піщаних порід внаслідок вимерзання

Модуль Юнга породи, МПа (модуль загальної деформації)	Коефіцієнт Пуасона породи	Густина породи, кг/м ³	Силові параметри випучування, см	Вимірзання, %	Товщина труби, м	Глибина залягання труби, м	Радіус труби, м	Відстань до внутрішнього контуру середовища, м	Інтенсивність напружень на внутрішньому контурі труби, МПа	Інтенсивність напружень на зовнішньому контурі труби, МПа	
22500	0,41	1750	0	0	0,018	1	0,7	1	1,3	11,9	10,1

					6		1				
22500	0,41	1750	0	1	0,016	1	0,7	1	141,9	405,3	133,9
22500	0,41	1750	0	2	0,016	1	0,7	1	283	818.4	266,9
22500	0,41	1750	0	3	0,016	1	0,7	1	423.2	1228.8	399.1
22500	0,41	1750	0	4	0,016	1	0,7	1	562,5	1636,6	532,3
22500	0,41	1750	0	5	0,016	1	0,7	1	700,9	2041.7	660,7
22500	0,41	1750	0	6	0,016	1	0,7	1	838.4	2444.3	790.3
22500	0,41	1750	0	7	0,016	1	0,7	1	975	2844.4	919
22500	0,41	1750	0	8	0,016	1	0,7	1	1110.8	3241,6	1047

Для глинистих мерзлих порід, модуль Юнга яких складає 680 МПа, густина – 1350 кг/м³ спостерігається аналогічна тенденція зростання напружень унаслідок зміни об'єму. При зростанні об'єму від 0 до 8 % інтенсивність напружень з боку середовища змінюється від 0,02 до 59,1 МПа (рис.3), інтенсивність напружень на зовнішньому контурі труби – від 3,3 до 59 МПа, на внутрішньому контурі труби – від 5,5 до 83,1 МПа.

Аналогічні лінійні залежності між об'ємом та напруженнями спостерігаються і для інших типів порід.

3. Силові параметри випучування.

У результаті взаємодії трубопроводів із багаторічномерзлими породами активізуються або виникають нові несприятливі явища, що призводять до його деформацій. Наземні обстеження несприятливих ділянок, дешифрування матеріалів аерофотозйомки різних років, геодезичні виміри вигинів газопроводу демонструють, що найпоширенішим і інтенсивно протікаючим є процес випучування газопроводів. За короткий термін експлуатації (5 - 7 років) деформації за рахунок випучування досягають 1 м і більше. Внаслідок названих факторів першочергово у модулі по розрахунку впливу кріогенних процесів на лінійні споруди аналізувались та розраховувались процеси кріогенного пучіння. Ці процеси в межах розглянутої модельної території розвиваються як при сезонному, так і при багаторічному промерзанні порід. Кріогенне пучіння обумовлене збільшенням обсягу замерзаючої вологи й льодонакопиченням (внаслідок міграції води) при промерзанні. За

						би, м		ви пу чу ва нн я, м	у сере дов ища , МП а	контур і труби, Мпа	конт урі труб и, МПа
22500	0,41	1750	0	0	0,018 6	1	0,7 1	0, 1	2,4	21,2	19,3
22500	0,41	1750	0	0	0,016	1	0,7 1	0, 4	1,9	17	15,1
22500	0,41	1750	0	0	0,016	1	0,7 1	0, 6	1,6	15	13,1
22500	0,41	1750	0	0	0,016	1	0,7 1	0, 8	1,4	13,3	11,4
22500	0,41	1750	0	0	0,016	1	0,7 1	1	1,3	12	10,1
22500	0,41	1750	0	0	0,016	1	0,7 1	1, 2	1,1	10,7	8,8
22500	0,41	1750	0	0	0,016	1	0,7 1	1, 4	1	9,6	7,7
22500	0,41	1750	0	0	0,016	1	0,7 1	1, 6	0,8	8,6	6,7
22500	0,41	1750	0	0	0,016	1	0,7 1	1, 8	0,7	7,7	5,7
22500	0,41	1750	0	0	0,016	1	0,7 1	2	0,6	6,9	4,9

Серед **техногенних факторів** були виділені наступні:

1. Внутрішній тиск газу у трубі (у якості розрахункового значення - 7,5 Мпа).
2. Товщина стінки трубопроводу, яка може характеризуватись наступними значеннями: 0,0186; 0,0197; 0,0215; 0,023; 0,026; 0,015 м.
3. Глибина залягання труби, що змінюється у широких межах – від залягання на поверхні – до 11 м у межах річкових переходів.
4. Радіус труби враховувався у якості наступних розрахункових значень – 0,71 м; 0,36 м.

Значний ефект має фактор глибини залягання трубопроводу, що суттєво впливає на інтенсивність напружень. Визначено загальну залежність між глибиною залягання трубопроводу та інтенсивністю напружень з боку середовища та на зовнішньому і внутрішньому контурах труби: із збільшенням глибини інтенсивність напружень зростає. Для мезлих піщаних порід ці показники

змінюються від 2,9 до 14,2 МПа при визначенні інтенсивності напружень з боку середовища (рис.6) Аналогічні залежності визначено при розрахунках інтенсивності напружень і для інших породних комплексів.

Зміна товщини стінки незначним чином впливає на результати розрахунків. Набагато більший вплив спричиняє зміна радіусу трубопроводу. Так, при значеннях радіусу у 0,36 м інтенсивності напружень мають тенденцію до зростання (наприклад, при врахуванні параметрів вимерзання у 1 відсоток інтенсивності напружень з боку середовища складають 190 МПа порівняно із 141 МПа при значеннях радіусу 0,71 МПа).

Одним із важливих компонентів розрахунків напружено-деформованого стану системи геологічне середовище – трубопровід є **розмір обраної системи** та задані **граничні умови** на її межах.

При **стандартних** розмірах системи, розмір якої складає 2,7x2,7 м та при збереженні граничних умов на бічних границях системи як **нульових переміщень**, інтенсивності напружень як з боку середовища, так і на зовнішньому контурі труби знаходяться у межах некритичних значень і становлять відповідно 0,9 та 7,2 МПа. Такі незначні величини напружень зберігаються і при збільшенні латеральних розмірів системи до 5,4 м; 10,8 м, 21,6 м; 43,2 м і т.д. при умові, що інші силові чинники системи, такі як випучування та вимерзання дорівнюють нулю.

За умови відсутності зусиль на бічних границях системи (**нульові зусилля**) при відсутності усіх інших силових чинників, інтенсивність напружень з боку середовища та на внутрішньому і зовнішньому контурах труби є також незначними і становлять відповідно 0,8; 4,3 та 6,1 МПа (при співвідношенні вертикальних та горизонтальних розмірів системи 1:16). Зменшення латеральних розмірів системи не призводить до зростання інтенсивності напружень. Вибір розмірів системи диктується різними умовами закладання трубопроводів у гірських породах із різними фізико-механічними властивостями та різним пристосуванням до інженерних об'єктів (баластуванням ґрунтом, привантаженням, зовнішнім бетонуванням труби, тощо). Це певною обумовлює зростання недопущеної деформації у межах середовища, що відбувається при умовах защемлення на бічних границях системи, до чого призводить значне збільшення напружень як з боку середовища, так і на зовнішньому контурі труби.

Напружено-деформований стан системи різко змінюється при врахуванні фактора вимерзання, що характеризує зміну об'єму мерзлих порід у залежності від водонасичення та вологоємності гірських порід. Зміна цього показника лише на 1% спричиняє різке зростання інтенсивності напружень, причому при збільшенні латеральних розмірів системи при умові **нульових переміщень** на бічних границях інтенсивність напружень також зростає, що можна інтерпретувати як зростання впливу середовища із зростаючим об'ємом. Так, при розмірах системи у 1,9x1,9 м інтенсивність напружень з боку середовища становить 147, 5 МПа, 1,9x7,6 м – 692,2 МПа, 1,9x15,2 м – 704,4 МПа, 1,9x30,4 м – 689 МПа. При подальших розрахунках збільшення латеральних розмірів системи не створює відчутного впливу на НДС у її межах.

Якщо ж на бічних границях системи фіксуються умови, що відповідають **нульовим зусиллям**, то інтенсивність напружень різко знижується, що обумовлюється зменшенням величин недопущеної деформації, та їх значення становлять близько 140 МПа (при умовах вимерзання в 1%) при різних латеральних розмірах системи, тобто у даному випадку цей параметр не відіграє значної ролі впливу на НДС. При знятті фактору вимерзання інтенсивність напружень як на зовнішньому і внутрішньому контурах труби, так і з боку середовища зменшується і становить відповідно 6,1 МПа, 4,3 МПа та 0,8 МПа (при ширині системи 51,2 м). Всі наведені розрахунки стосуються впливу піщаних порід на трубопровідну систему, однак подібні залежності спостерігаються і для інших літологічних типів відкладів.

Таким чином, наявний істотний вплив граничних умов системи на інтенсивність напружень як з боку середовища, так і на зовнішньому та внутрішньому контурах труби тільки за умови впливу інших силових чинників, зокрема процесів вимерзання та випучування. У таких випадках інтенсивність напружень збільшується практично у 5 разів при умовах защемлення на бічних границях системи, що спричиняється об'ємними зусиллями, створюваними силовими факторами вимерзання та випучування, дія яких розглядатиметься детально далі.

Висновки. Виходячи з пріоритетності виділення небезпечних геологічних процесів, пропонуються розроблені розрахунково-аналітичні модулі, що аналізують вплив геологічного середовища на трубопровідний комплекс, а також реально відображають зміну геологічних умов та зміни напружено-деформованого стану у трубопровідно-транспортній природно-техногенній системі. Розробка математичних засобів, котрі забезпечують розрахунки полів напружень та деформацій створює передумови для виділення та прогнозування небезпечних ділянок у межах трубопроводу, а також передбачає можливість для прийняття попереджуючих заходів по безпечній експлуатації трубопроводів.

Проведення моделювання впливу кріогенних явищ на трубопровідні системи визначило пріоритетність аналізу стану геологічного середовища для з'ясування причин виникнення негативних ситуацій у межах магістральних газотранспортних систем. Саме створення, застосування та адаптування геолого-фізичних моделей вивчених явищ проілюструвало результати дії кожного з факторів та їх можливих комбінацій.

1. *Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов* (под ред. Е.С. Мельникова, С.Е. Гречищева). – М.: Геос, 2002. – 400 с.
2. *Геокриология СССР. Западная Сибирь* (под ред. Э.Д. Ершова). - М.: Недра, 1989. – 454 с.
3. *Іванік О.М., Михайленко А.Г., Шевчук В.В.* Передумови та основні аспекти створення підсистеми аналізу геологічного середовища для Географічних інформаційних систем магістральних трубопроводів // Вісник Київського університету. Серія Геологія. – 2005. – Вип. 33. – С.53-56.

4. *Дубиков Г.И.* Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. – М.: Геос, 2002. – 246 с.

5. *Горелик Я.Б.* Влияние текучести льда на протаивание мерзлых пород вокруг скважин // Газовая промышленность. – 2004. - № 11. – С.59-63.

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

7. *Лавренюк В.І.* Про визначення напружено-деформованого стану матриці з включенням методом граничних елементів // Вісник Київського університету. Серія: фіз.-мат. науки. - 1993. - №2.

8. *Ершов Э.Д.* Физико-химия и механика мерзлых пород. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. - 336 с.

9. *Цытович Н.А.* Механика мерзлых грунтов. – М.: Высшая школа, 1973. – 448 с.

Проведено моделювання впливу кріогенних явищ на трубопровідні системи для аналізу стану геологічного середовища з метою з'ясування причин виникнення негативних ситуацій у межах магістральних газотранспортних систем. На основі розробленої математичної моделі запропоновано чисельно-аналітичний алгоритм розв'язання поставленої задачі, що базується на використанні модифікованого методу граничних елементів. Розроблений чисельно-аналітичний алгоритм аналізу напружено-деформованого стану системи трубопровід-геологічне середовище створює передумови для виділення та прогнозування небезпечних ділянок у межах трубопроводу, а також передбачає можливість для прийняття попереджуючих заходів по безпечній експлуатації трубопроводів. Створений на основі розробленого алгоритму розрахунково-аналітичний модуль аналізує вплив геологічного середовища на трубопровідний комплекс та реально відображає зміну геологічних умов та зміну напружено-деформованого стану трубопровідно-транспортної природно-техногенної системи. Виходячи з виконаних розрахунків дано кількісну оцінку факторів впливу на напружено-деформований стан системи геологічне середовище-трубопровід в умовах кріолітозони.

Проведено моделирование влияния криогенных явлений на трубопроводные системы для анализа состояния геологической среды с целью установления причин возникновения негативных ситуаций в пределах магистральных газотранспортных систем. На основе разработанной математической модели предложен численно-аналитический алгоритм решения поставленной задачи, использующий модифицированный метод граничных элементов. Разработанный численно-аналитический алгоритм анализа напряженно-деформированного состояния системы трубопровод-геологическая среда создает предпосылки для выделения и прогнозирования опасных участков в пределах трубопровода, а также предусматривает возможность для принятия упреждающих мер для безопасной эксплуатации трубопроводов. Созданный на основе разработанного алгоритма расчетно-аналитический модуль анализирует влияние геологической среды на трубопроводный комплекс и реально отображает изменение геологических условий и изменение напряженно-деформированного состояния трубопроводно-транспортной природно-техногенной системы. Исходя из выполненных расчетов дана количественная оценка факторов влияния на напряженно-деформированное состояние системы геологическая среда-трубопровод в условиях криолитозоны.

Modelling of influence of cryogenic effects on pipeline systems for analysis of geological environment state with the purpose of ascertainment of the causes of rise of negative situations within the trans pipelines was carried out. On the base of worked out mathematical model it was proposed the numero-analytical algorithm of solving the posed problem, utilizing modified boundary element method. The developed numero-analytical algorithm of analysis of stress-strain state of pipeline-geological environment system creates prerequisites for isolation and forecasting the dangerous zones within the pipeline, and also provides for the ability of taking the preceding actions for fail-safe pipelines operation. Created on the base of worked out algorithm the calculative-analytical modulus analyses the influence of geological environment

on the pipeline complex and realistically represents the change of geological conditions and stress-strain state of pipeline-transport nature-technogeneous system. On the base of carried out calculations the quantitative evaluation of factors that influence on the stress-strain state of the geological environment-pipeline system in the cryolithozone was given.

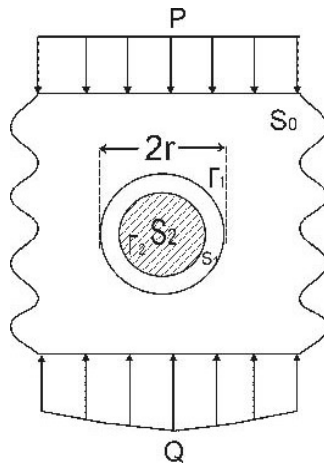


Рис. 1. Модель перерізу системи геологічне середовище - трубопровід

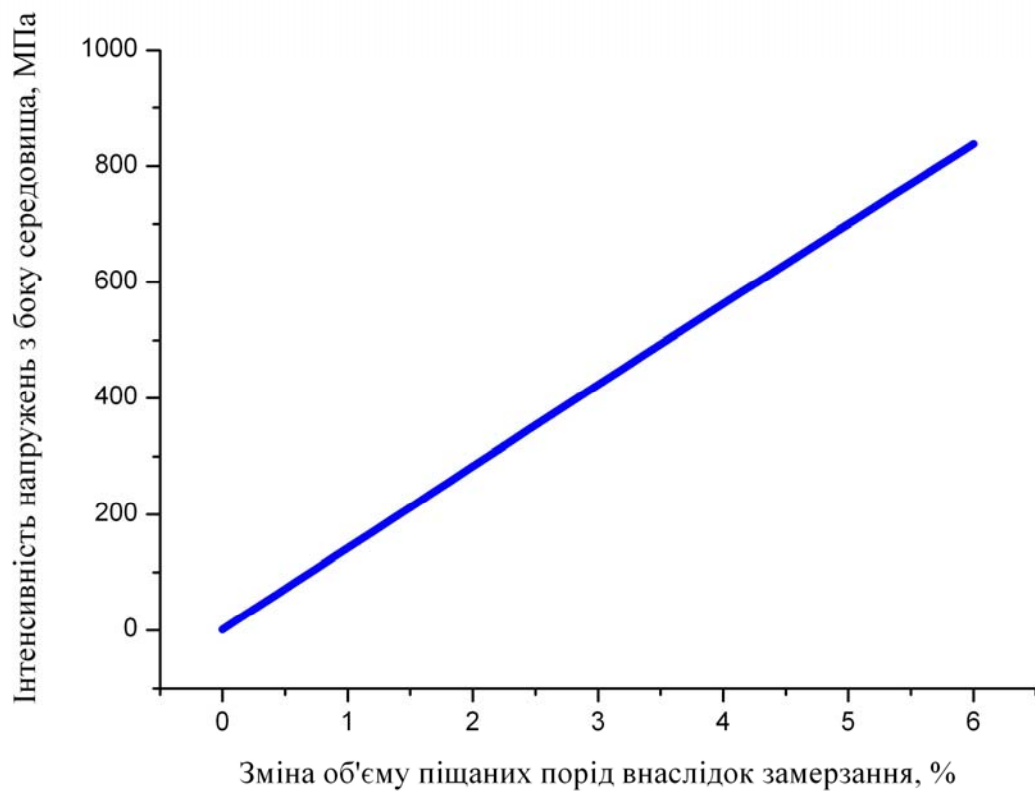


Рис. 2. Вплив зміни об'єму мерзлих пісків за рахунок вимерзання на інтенсивність напружень з боку середовища

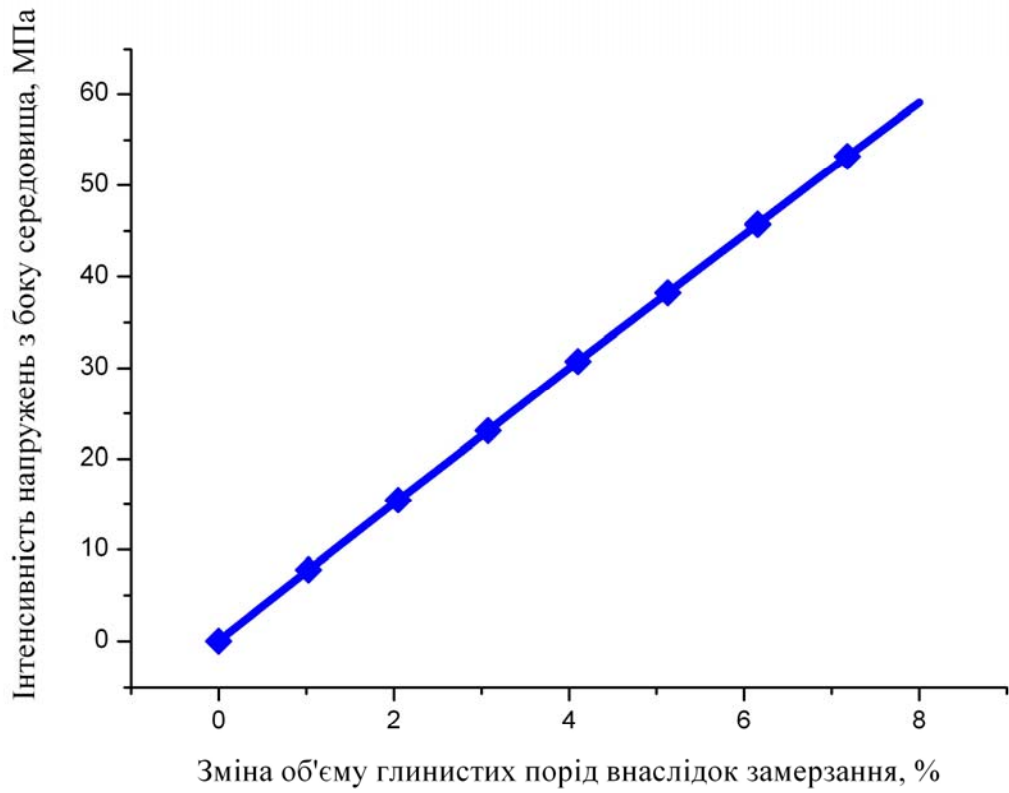


Рис. 3. Вплив зміни об'єму мерзлих глин за рахунок вимерзання на інтенсивність напружень з боку середовища

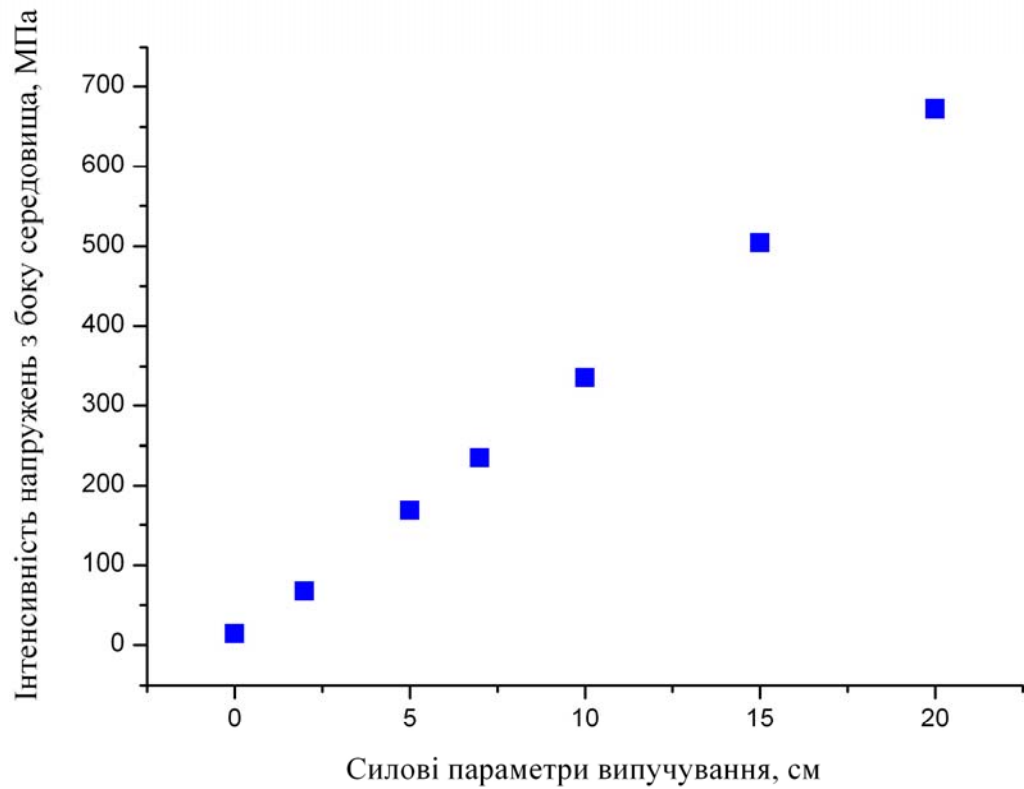


Рис. 4. Залежність інтенсивності напружень з боку середовища від силових параметрів випучування для піщаних мерзлих порід

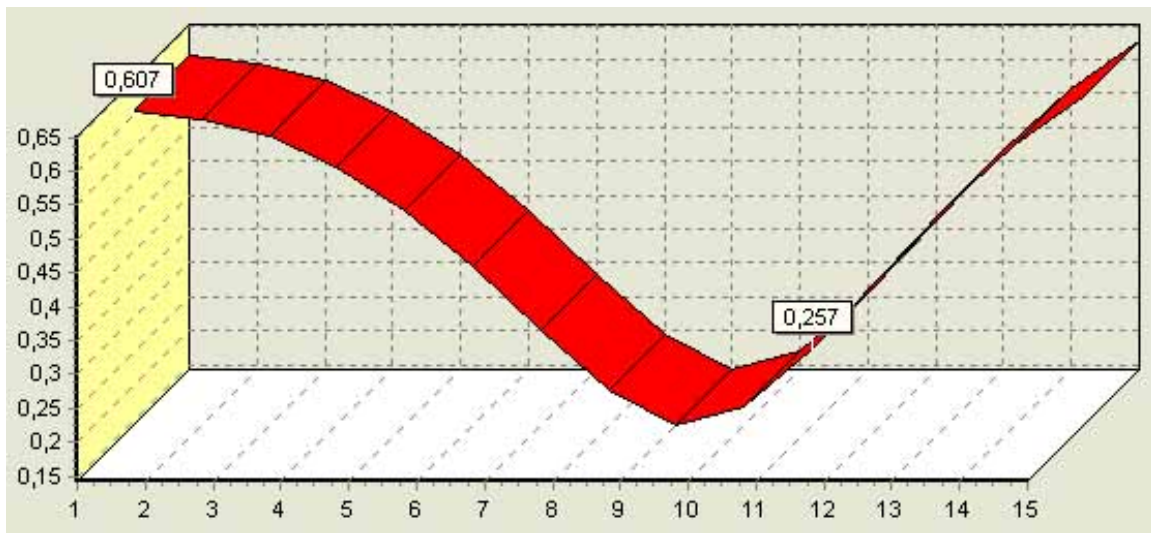


Рис. 5. Зміна інтенсивності напружень з боку середовища по контуру труби

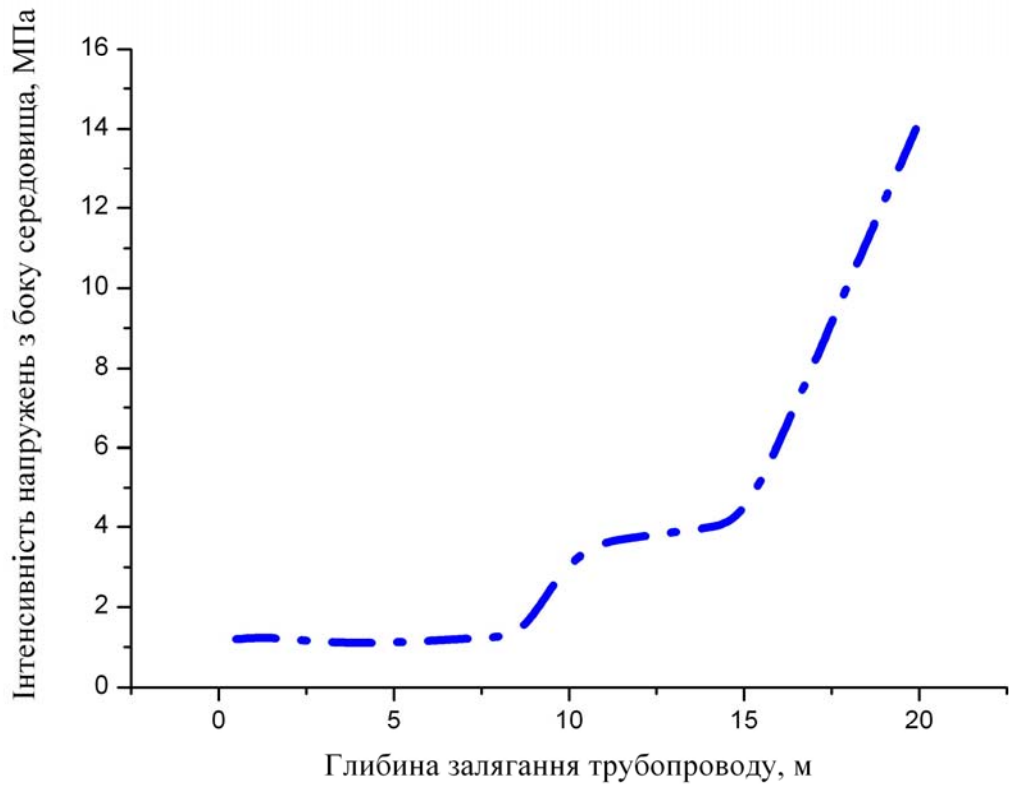


Рис. 6. Зміна інтенсивності напружень з боку середовища у залежності від глибини залягання трубопроводу у піщаних породах.