

**КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ЧИННИКІВ ВПЛИВУ
НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН
У СИСТЕМІ ГЕОЛОГІЧНЕ СЕРЕДОВИЩЕ – ТРУБОПРОВІД У КРІОЛІТОЗОНІ
(ЗА ДАНИМИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ)**

© О.М. Іванік, М.В. Лавренюк, 2008

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

The computer modeling of frost phenomenon effect on piping systems has been conducted with view to analyze the state of the geological medium and to ascertain the origin of all negative situations within gas main pipelines. The developed numerical-analytical algorithm of analysis of strained and deformed state in the system of geological medium-pipeline creates premises for discriminating and forecasting endangered sections within the limits of a pipeline and providing an opportunity to take preventive methods to ensure protected pipeline exploitation. This numerical-analytical algorithm forms the basis of a calculating-analytical modulus that examines a geological-environmental impact on a piping complex and gives away a veritable picture of a change in geological conditions and variation of the strained-deformed state of both trunk pipeline and natural technical-genetic system. Consequently, the quantitative assessment of factors provoking strained and deformed state in the system of geological medium-pipeline in cryolithozone has been given proceeding from accomplished calculations.

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 чинників, виникають лише на основі оперативних розрахунків напружено-деформованого стану (НДС) у системі геологічне середовище–трубопровід у широкому діапазоні початкових та граничних умов, а також природних і техногенних параметрів. Особливо важливого значення такі розрахунки набувають у межах територій з активним проявом небезпечних геологічних процесів, які істотно поширені і у кріолітозоні.

НДС системи геологічне середовище–трубопровід залежить від багатьох чинників, які визначаються як геологічними умовами території прокладання трубопроводів, геоморфологічними параметрами й ландшафтно-кліматичною зональністю, так і техногенними чинниками, що зумовлені технологічними характеристиками самих трубопровідно-транспортних систем. Аналіз впливу негативних природних процесів на ці системи наведено 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 чинників впливу на НДС 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 чинників цього впливу на НДС у системі геологічне середовище–трубопровід.

Кількісна оцінка чинників впливу на НДС системи геологічне середовище – трубопровід. НДС системи геологічне середовище – трубопровід визначається низкою геологічних і техногенних чинників. Певний вплив здійснюють 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 перелічені чинники належать до суто геологічних та природних умов впливу. До техногенних чинників слід віднести певні характеристики трубопроводу (діаметр, товщина стінки, характер матеріалу) та його експлуатаційні параметри, зокрема тепловий режим, глибина залягання та ін.

Моделювання впливу кріогенних процесів на трубопровідні системи і, відповідно, визначення НДС системи геологічне середовище – трубопровід спрямовані 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 кріогенних процесів на трубопроводи побудовано фізичні моделі навантажень окремої ділянки трубопроводу, а також визначено механічні (математичні) моделі фізич-

ної задачі. У межах теорії пружності кусково-однорідних тіл розглядали плоску деформацію матриці (середовище) із включенням (трубою). Поставлена задача зводилась до розв'язання 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 чисельний алгоритм розв'язання поставленої задачі. В результаті застосування модифікованого МГЕ розв'язання вихідної системи граничних інтегральних рівнянь зводилось до розв'язання системи лінійних алгебричних 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 і граничних умов системи. Визначення певного впливу кожного з чинників здійснювали за умови обмеження активного впливу інших. Штучне спрощення природної моделі кріогенезу 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'єкта – трубопроводу (рис. 1). Під час розрахунків головну увагу приділяли оцінці впливу геологічного середовища на трубопровід, що і слугувало визначальною метою досліджень. Спеціальні розрахунки щодо міцнісних властивостей трубопроводу не проводили. Всі наведені дані стосуються поперечного перерізу труби.

У результаті тестування розробленого модуля та виконаних розрахунків визначено характер впливу на НДС природних і техногенних чинників у системі геологічне середовище – трубопровід. Головними вихідними параметрами слугували інтенсивності напружень (МПа) з боку

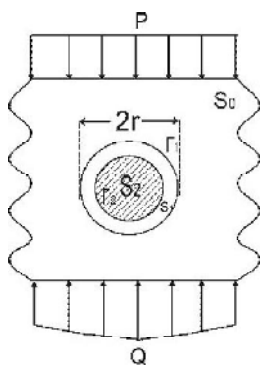


Рис. 1. Модель перерізу системи геологічне середовище – трубопровід

середовища, інтенсивність напружень на зовнішньому та внутрішньому контурах труби (МПа).

Розглянемо геологічні чинники впливу.

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 пилуватості ґрунтів за повного їх водонасичення напруження пучіння в цілому зростають у зв'язку зі збільшенням початкової вологості, міграційних потоків води, деформації пучіння й ролі чинника розклинювального тиску. Тому літологічний чинник і характер водонасичення є визначальними характеристиками в аналізі впливу кріогенних явищ на техногенні системи.

Оскільки у зоні поширення кріогенних явищ розвинуті переважно пухкі породи, було проаналізовано такі головні літологічні їх різновиди: *піски, супіски, суглинки та глини*. Вологість піщаних і 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 і тонкозернистих пісків у цій зоні може сягати 35–40%. Природна вологість глин змінюється у широких межах: у сучасних глинистих осадах озер та морів вона становить 80–90% та більше, у глинистих породах малого та середнього ступеня літифікації (глини, ущільнені глини) – від 12–15 до 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. Враховували 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], приводить до зміни інтенсивності напружень на внутрішньому, зовнішньому контурах труби та з боку середовища. Наприклад, для супісків у мерзлом 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

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

Тип порід	Модуль Юнга, МПа	Інтенсивність напружень, МПа		
		з боку середовища	на зовнішньому контурі труби	на внутрішньому контурі труби
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

пропорційна залежність між напруженнями та відносними деформаціями у піщаних та глинистих порід встановлена у межах відносно обмеженого інтервалу тиску.

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

Різні літологічні типи осадових мерзлих гірських порід характеризуються диференційованими значеннями модуля Юнга (або модуля загальної деформації). Цей параметр для сезонно- та багаторічномерзлих порід істотно залежить від температури порід та їх вологості. Для глин у мерзлому стані, за даними Є.Д. Єршова [8], модуль Юнга за температури $-1,2^{\circ}\text{C}$ становить 680 МПа, при $-8,4^{\circ}\text{C}$ – 2780 МПа, за іншими даними, для цього ж типу порід за температури $-1,2^{\circ}\text{C}$ значення модуля Юнга оцінено у 18,1 МПа за сумарної вологості 28 %, 3 МПа – за сумарної вологості 46 %, 10,1 МПа – за сумарної вологості 42 %.

Зважаючи на ці змінні значення, у результаті розрахунків, що передбачали відсутність процесів випучування та вимерзання, та за умови залягання трубопроводу на глибині 1 м отримуємо, відповідно, різні значення напружень. Так, для глинистих відкладів, якщо модуль Юнга дорівнює 2780 МПа, інтенсивність напружень по зовнішньому контуру труби становить 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 при значеннях модуля Юнга 680 МПа становить – 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 дорівнює 0,02 МПа за модуля Юнга 680 МПа, 0,06 МПа – при 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 дорівнює 0,9 МПа, на зовнішньому контурі труби – 7,2 МПа, на внут-

рішньому – 9,1 МПа. Для супісків із модулем Юнга 20 000 МПа ці значення дорівнюють відповідно 1,0; 8,4 та 10,3 МПа, із модулем Юнга 2250 МПа – відповідно 0,1; 3,6 та 5,8 МПа (табл. 1).

Отже, зміна модуля Юнга для мерзлих порід, який істотно залежить від літологічного типу порід, температури та ступеня льодовистості порід, приводить до зміни кількісних значень показників напружень як з боку середовища, так і на зовнішньому й внутрішньому контурах труби. Так, за інших рівних значень параметрів середовища (із зняттям інших силових чинників) та трубопроводу максимальні напруження виникають у разі впливу на трубопровідні системи мерзлих пісків (модуль Юнга 22 500 МПа) та супісків (20 000 МПа), що створюються за температури нижче 8°C та високого ступеня льодовистості порід.

2. Вимерзання. Цей показник характеризує зміну об'єму мерзлих порід залежно від водонасичення та вологоємності гірських порід. За результатами дослідження впливу вологоємності й пористості ґрунту на величину пучіння, в породах, що промерзають, зменшення пористості й зниження вологості приводять до зменшення величини деформацій пучіння внаслідок зменшення сумарного льодонакопичення. За повного вологонасичення зменшується величина усадки ґрунту.

Загальна величина пучіння залежить від величини пучіння породи внаслідок збільшення на 9% об'єму води під час переходу в лід, від величини пучіння за рахунок об'єму води, що надходить у мерзлу частину породи в результаті міграції або ін'єкції, а також від величини деформацій усадки відталої зони породи, яка обезводнюється. У формуванні сумарної величини пучіння порід, що промерзають, найбільшу роль 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 спостерігати меться не піднімання, а опускання поверхні ґрунту. Наприклад, незважаючи на значні величини

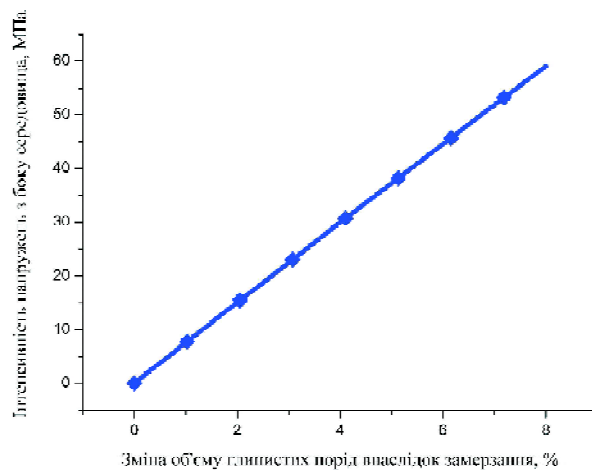
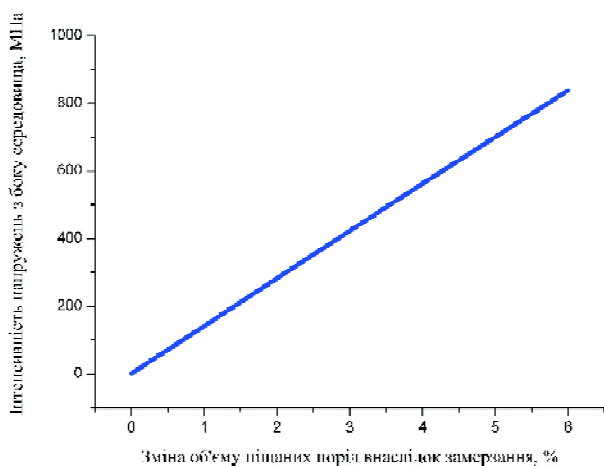


Рис. 2. Вплив зміни об'єму мерзлих пісків (а) та мерзлих глин (б) унаслідок вимерзання на інтенсивність напружень з боку середовища

міграційного льодонакопичення в глині, величина пучіння в ній може бути меншою, ніж у суглинку, внаслідок розвитку більших деформацій усадки. Тому одним із головних питань, що потребують кількісного розв'язку, є 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 осадового шару. Для промерзання такого типу формування надлишкової льодовистості пов'язане, як правило, із сегрегаційним льодовиділенням, для якого (окрім впливу літологічного чинника) 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 за рівнянням Клапейрона–Клаузіуса їх оцінюють у 13,4 МПа на 1°С зниження від'ємної температури. Однак оскільки природні ґрунти не можна розглядати як закриті й недеформовану систему, то частка напружень випучування в загальній величині напружень і деформацій пучіння порід, що промерзають, не домінує, а проявляється як доповнення до напружень набухання, що розвивається в результаті розклинювальної дії тонких плівок мігруючої води.

Оскільки вологість порід є змінною, то параметр вимерзання масиву може також змінюватись у межах від 0 до 8% від загального об'єму. Саме зміна загального об'єму системи є тією чутливою характеристикою, що реагує на кількість води у породі. Виходячи із граничних умов системи зау-

важимо, що обов'язково слід враховувати значення допущеної деформації зі збільшенням об'єму масиву та релаксацію певної частини напружень. Окремим випадком є процес підтоку води (наприклад, плівкової води), що також забезпечує збільшення вологості порід; він може бути врахований у представленому варіанті розв'язку лише як зміна об'єму системи залежно від процесів вимерзання. За 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).

Так, для піщаних відкладів, модуль Юнга яких дорівнює 22 500 МПа, густина – 1750 кг/м³, із збільшенням об'єму від 0 до 8% внаслідок вимерзання інтенсивність напружень з боку середовища змінюється від 1,3 до 1110,9 МПа, на внутрішньому контурі труби – від 11,9 до 3241,6 МПа (табл. 2). Критичною для стану трубопроводу є 3-відсоткова зміна об'єму мерзлих пісків, що спричинює напруження з боку середовища у 423,2, на зовнішньому контурі труби – 399 МПа. Закономірним є розподіл напружень унаслідок вимерзання по контуру трубопроводу із незначними варіаціями від 141,9 до 139,6 МПа (для 1% збільшення об'єму).

Для глинистих мерзлих порід, модуль Юнга яких дорівнює 680 МПа, густина – 1350 кг/м³; спостерігається аналогічна тенденція зростання напружень унаслідок зміни об'єму. Із зростанням об'єму від 0 до 8% інтенсивність напружень з боку середовища змінюється від 0,02 до 59,1 МПа (рис. 2), на зовнішньому контурі труби – від 3,3 до 59, на внутрішньому – від 5,5 до 83,1 МПа.

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

Таблиця 2. Зміна інтенсивності напружень зі зміною об'єму піщаних порід унаслідок вимерзання

Вимерзання, %	Товщина труби, м	Інтенсивність напружень, МПа		
		з боку середовища	на внутрішньому контурі труби	на зовнішньому контурі труби
0	0,0186	1,3	11,9	10,1
1	0,0186	141,9	405,3	133,9
2	0,0186	283	818,4	266,9
3	0,0186	423,2	1228,8	399,1
4	0,0186	562,5	1636,6	532,3
5	0,0186	700,9	2041,7	660,7
6	0,0186	838,4	2444,3	790,3
7	0,0186	975	2844,4	919
8	0,0186	1110,8	3241,6	1047

Примітка. Модуль Юнга породи 22500 МПа; коефіцієнт Пуассона породи 0,41; густина породи 1750 кг/м³; силові параметри випучування 0%; глибина залягання труби 1 м; радіус труби 0,71 м; відстань до джерела випучування 1 м.

3. Силові параметри випучування. У результаті взаємодії трубопроводу із багаторічномерзлими породами активізуються або виникають нові несприятливі явища, що призводять до деформацій. Наземні обстеження несприятливих ділянок, дешифрування матеріалів аерофотозйомки різних років, геодезичні виміри вигинів газопроводу демонструють, що найпоширенішим та інтенсивним є процес випучування газопроводів. За короткий термін експлуатації (5 – 7 років) деформації через випучування досягають 1 м і більше. Внаслідок названих чинників першочергово у модулі за розрахунком впливу кріогенних процесів на лінійні споруди аналізували та розраховували процеси кріогенного пучіння. Ці процеси в межах розглянутої модельної території розвиваються під час як сезонного, так і багаторічного промерзання порід. Кріогенне пучіння зумовлене збільшенням обсягу замерзаючої вологи й льодонакопиченням (унаслідок міграції води) в процесі промерзання. За даними Е.Д. Єршова [8], найбільші деформації пучіння спостерігаються під час промерзання у відкритій системі добре вологопровідних, найчастіше пілуватих і водонасичених супіщаних і суглинистих порід за малої швидкості промерзання й близького розташування водоносного горизонту, чим визначається міграційний механізм пучіння.

Саме такі умови відкритої системи спостерігаються в межах території розташування дослідженої мережі магістральних трубопроводів, оскільки в цьому регіоні найпоширенішими є явища сезонного кріогенного пучіння, що проявляється в різних за складом породах.

Механізм розвитку деформацій пучіння визначається кількома фізико-хімічними процесами, частка яких у формуванні сумарної величини пучіння залежить від умов промерзання дисперсних порід.

Інтенсивність процесів пучіння істотно залежить від силових параметрів випучування, які пов'язані з переміщеннями на нижній межі маси-

ву і можуть змінюватися від 0 до 100 см. Цей показник визначає характер напружень у процесах пучіння і певним чином обмежує їх інтенсивність. Проведені розрахунки продемонстрували, що існує загальна тенденція зростання інтенсивності напружень з боку середовища та на внутрішньому і зовнішньому контурах трубопроводу із зростанням силових параметрів випучування (рис. 3).

4. Відстань до джерела випучування. Цей параметр характеризує відстань від поверхні до джерела випучування, що зазвичай не є рівномірною і змінюється у межах від 0 до 2 м. Ця величина істотно залежить від глибини промерзання сезонномерзлих та багаторічномерзлих порід, а також від потужності сезонномерзлого та сезонноталого шару. Існує загальна закономірність зниження інтенсивності напружень із збільшенням цієї відстані для усіх літологічних різновидів порід.

Так, для піщаних мерзлих порід залежно від зміни вказаної відстані від 0,1 до 2 м інтенсивність напружень з боку середовища змінюється від 2,4 до 0,6 МПа, на зовнішньому контурі

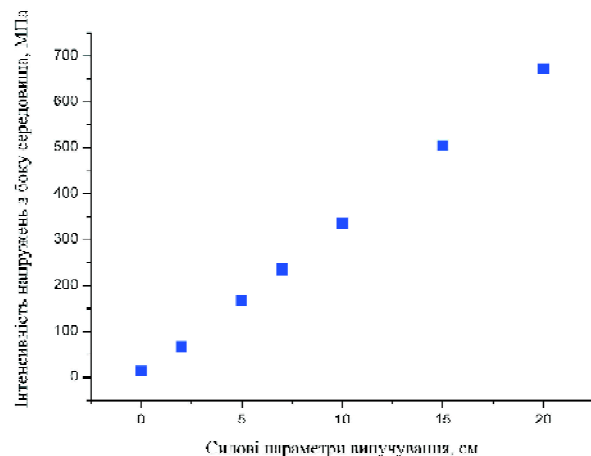


Рис. 3. Залежність інтенсивності напружень з боку середовища від силових параметрів випучування для піщаних мерзлих порід

Таблиця 3. Зміна інтенсивності напружень зі зміною відстані до джерела випучування для піщаних мерзлих порід

Товщина труби, м	Відстань до джерела випучування, м	Інтенсивність напружень, МПа		
		з боку середовища	на внутрішньому контурі труби	на зовнішньому контурі труби
0,0186	0,1	2,4	21,2	19,3
0,0186	0,4	1,9	17	15,1
0,0186	0,6	1,6	15	13,1
0,0186	0,8	1,4	13,3	11,4
0,0186	1,0	1,3	12	10,1
0,0186	1,2	1,1	10,7	8,8
0,0186	1,4	1,0	9,6	7,7
0,0186	1,6	0,8	8,6	6,7
0,0186	1,8	0,7	7,7	5,7
0,0186	2,0	0,6	6,9	4,9

Примітка. Модуль Юнга породи 22500 МПа; коефіцієнт Пуассона породи 0,41; густина породи 1750 кг/м³; силові параметри випучування 0%; глибина залягання труби 1 м; радіус труби 0,71 м.

труби – від 19,3 до 4,9, на внутрішньому контурі – від 21,2 до 6,9 МПа (табл. 3). Спостерігається тенденція зміни інтенсивності напружень по контуру труби із зростанням на верхній і нижній її частинах та зменшенням у центральній (рис. 4).

Серед техногенних факторів були виділені:

- 1) внутрішній тиск газу у трубі (розрахункове значення 7,5 МПа);
- 2) товщина стінки трубопроводу – 0,0186; 0,0197; 0,0215; 0,023; 0,026; 0,015 м;
- 3) глибина залягання труби, що змінюється від залягання на поверхні до 11 м у межах річкових переходів;
- 4) радіус труби – за розрахунковими значеннями 0,71; 0,36 м.

Великий 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 мерзлих піщаних порід ці показники змінюються від 2,9 до 14,2 МПа при визначенні інтенсивності напружень з боку середовища (рис. 5). Аналогічні залежності встановлено під час розрахунків інтенсивності напружень і для інших породних комплексів.

Зміна товщини стінки не істотно впливає на результати розрахунків. Набагато більший вплив спричиняє зміна радіуса трубопроводу. Так, за радіуса 0,36 м інтенсивність напружень має тен-



Рис. 4. Зміна інтенсивності напружень з боку середовища по контуру труби

денцію до зростання (наприклад, якщо параметр вимерзання дорівнює 1%, інтенсивність напружень з боку середовища становить 190 МПа порівняно із 141 МПа за радіуса 0,71).

Одним із важливих компонентів розрахунків НДС системи геологічне середовище – трубопровід є розмір обраної системи та задані граничні умови на її межах.

За стандартних розмірів системи 2,7×2,7 м і збереження граничних умов на бічних межах системи як нульових переміщень інтенсивність напружень як з боку середовища, так і на зовнішньому контурі труби має не критичні значення – відповідно 0,9 та 7,2 МПа. Такі невеликі напруження зберігаються і зі збільшенням латеральних розмірів системи до 5,4 м; 10,8; 21,6; 43,2 м за умови, що інші силові чинники системи, такі як випучування та вимерзання, дорівнюють нулю.

За умови відсутності зусиль на бічних межах системи (нульові зусилля) та усіх інших силових чинників інтенсивність напружень з боку середовища та на внутрішньому і зовнішньому контурах труби є також незначною і становить відповідно 0,8; 4,3 і 6,1 МПа (за співвідношення вертикальних та горизонтальних розмірів системи 1:16). Зменшення латеральних розмірів системи не при-

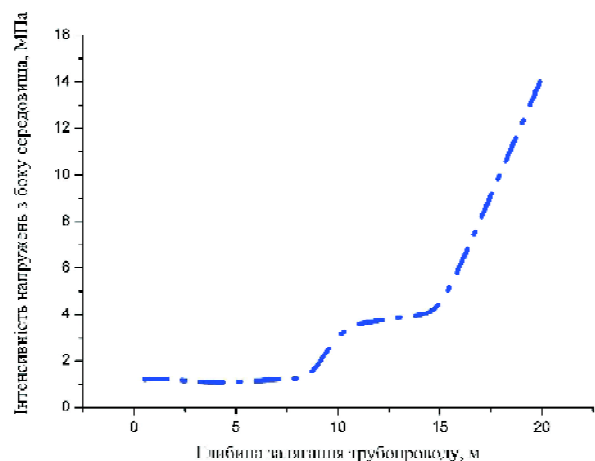


Рис. 5. Зміна інтенсивності напружень з боку середовища залежно від глибини залягання трубопроводу у піщаних породах

водить 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 мірою зумовлює зростання недопущеної деформації у межах середовища, що відбувається у разі защемлення на бічних межах системи, до чого призводить значне збільшення напружень як з боку середовища, так і на зовнішньому контурі труби.

НДС системи різко змінюється з урахуванням чинника вимерзання, що характеризує зміну об'єму мерзлих порід залежно від водонасичення та вологоємності гірських порід. Зміна цього показника лише на 1% спричиняє різке зростання інтенсивності напружень, причому із збільшенням латеральних розмірів системи за умови *нульових переміщень* на бічних межах інтенсивність напружень також зростає, що можна інтерпретувати як зростання впливу середовища із зростаючим об'ємом. Так, за розмірів системи у 1,9×1,9 м інтенсивність напружень з боку середовища становить 147,5 МПа; 1,9×7,6 м – 692,2 МПа; 1,9×15,2 м – 704,4 МПа; 1,9×30,4 м – 689 МПа. За подальшими розрахунками, збільшення латеральних розмірів системи не створює відчутного впливу на НДС у її межах.

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

Отже, граничні умови системи істотно впливають 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 в умовах защемлення на бічних межах системи, що спричи-

няється об'ємними зусиллями, створюваними силовими факторами вимерзання та випучування, дія яких розглядатиметься детально далі.

Висновки. Виходячи з пріоритетності виділення небезпечних геологічних процесів, запропоновані 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, що забезпечують розрахунки полів напружень і деформацій, створює передумови для виділення та прогнозування небезпечних ділянок у межах трубопроводу, а також передбачає можливість прийняття попереджувальних заходів щодо безпечної експлуатації трубопроводів.

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 чинників та їх можливих комбінацій.

1. *Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов* / Под ред. Е.С. Мельникова, С.Е. Гречишева. – 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 // Вісн. Київ. ун-ту. Сер. 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 // Газ. пром-сть. – 2004. – № 11. – С. 59–63.
6. *Бреббиа К., Теллес Ж., Вроубел Л.* Методы граничных элементов. – М.: Мир, 1987. – 524 с.
7. *Лавренко В.И.* Про визначення напружено-деформованого стану матриці з включенням методом граничних елементів // Вісн. Київ. ун-ту. Сер. фіз.-мат. науки. – 1993. – № 2.
8. *Ершов Э.Д.* Физико-химия и механика мерзлых пород. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1986. – 336 с.
9. *Цытович Н.А.* Механика мерзлых грунтов. – М.: Высш. шк., 1973. – 448 с.

Надійшла до редакції 04.05.07 р.