

В. В. Шевчук, О. М. Іванік, М. В. Лавренюк, В. І. Лавренюк

МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГЕОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРУБОПРОВІДНО-ТРАНСПОРТНИХ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННИХ СИСТЕМ

(Рекомендовано акад. НАН України П. Ф. Гожиком)

Разработана методика комплексного анализа состояния геологической среды и количественной оценки влияния опасных геологических процессов на функционирование трубопроводно-транспортных природно-техногенных систем (ПТС) в различных ландшафтно-климатических зонах, состоящая в создании и численном анализе научно обоснованного комплекса взаимосвязанных геологических, геолого-физических, математических и геоинформационных моделей сложных систем на основе средств механики сплошных сред, гидромеханики, гидродинамики, картографического моделирования (ГИС-анализа). Определены методические подходы формализации многофакторных воздействий геологической среды и опасных геологических процессов на функционирование транспортных ПТС. Методика предназначена для прогноза влияния опасных геологических процессов на трубопроводы и предупреждения чрезвычайных ситуаций.

The methodology has been developed on the comprehensive assessment of geological environment and quantitative validation of the impact of hazardous geological processes on the functionality of pipe-transporting nature-technical systems in various landscape-climatic zones. The methodology is based on the interrelated and validated geological, geologic-physical, mathematical and geoinformational models of the complex nature-technical systems. It has been used the main principles of continuum mechanics, hydromechanics, hydrodynamics, mapping modeling (GIS-analysis). The original methods have been proposed on formalization of the geological multi-factor impacts on the functioning of transporting nature-technical systems. The newly developed methodology would enhance the forecast of the impact of hazardous geological processes on the transport constructions, would allow to make recommendations on the operational sustainability of transporting objects and to prevent extreme situations.

Вступ та постановка проблеми

Лінійні трубопровідно-транспортні мережі, що забезпечують функціонування соціального та господарського секторів держав, є елементами природно-техногенних систем (ПТС), технічні і природні порушення яких призводять до аварійних і катастрофічних ситуацій з великими фінансово-ресурсними збитками і негативними екологічними наслідками. У механізмі розвитку цих порушень значну роль відіграють геологічні чинники. Проте у наявних методологічних і методичних розробках щодо забезпечення безпеки діяльності транспортних ПТС відмічаються проблеми недостатнього врахування глибинних змін геологічного середовища та обмеженої результативності методів інформаційного моделювання стану цих систем з адекватним відображенням геологічних чинників. Сучасні вимоги науко-

во-технічного прогресу в галузі розвитку транспортних мереж зумовлюють необхідність створення ефективних інформаційно-аналітичних засобів та експертних систем безпечного функціонування трубопровідно-транспортних ПТС з оцінкою впливу небезпечних геологічних процесів, включаючи завдання моніторингу, прогнозування, попередження і ліквідації наслідків.

Досвід експлуатації трубопровідних мереж демонструє, що традиційний підхід до оцінки стану інженерного комплексу не є висерпним та достатнім. Проблемним питанням залишається розробка системи комплексного аналізу стану геологічного середовища при функціонуванні магістральних трубопроводів. Важливим є те, що сучасні технології не здатні вирішити поставлені завдання без конкретного алгоритму дії, який, безумовно, вимагає аналітичних розробок та моделювання. Створення ефективної методики комплексного аналізу стану геологічного середовища та кількісної оцінки впливу небезпечних геологічних про-

цесів дозволяє спрогнозувати вплив небезпечних геологічних процесів на транспортні споруди, розробити рекомендації щодо підвищення експлуатаційної надійності техногенних об'єктів та попередити екстремальні ситуації.

Методичні засади кількісної оцінки впливу небезпечних геологічних процесів на трубопровідно-транспортні системи

Методика комплексного аналізу стану геологічного середовища та кількісної оцінки впливу небезпечних геологічних процесів на функціонування трубопровідно-транспортних ПТС різних ландшафтно-кліматичних та структурно-тектонічних зон базується на створенні та чисельному аналізі цільового комплексу взаємопов'язаних геологічних, геомеханічних та математичних моделей складних ПТС (рис. 1).

Методика включає такі етапи:

- дослідження об'єктів моделювання, визначення вхідних параметрів моделювання на основі теоретичних, емпіричних та експериментальних даних та ПС-аналізу;
- постановка комплексних задач якісної і кількісної оцінки впливу геологічних процесів і середовищ на функціонування трубопровідно-транспортних ПТС;
- розробка фізичної, геолого-фізичної та математичної моделі геологічного середовища та небезпечних геологічних процесів;
- математичне моделювання;
- розробка розрахунково-аналітичних модулів (програмних комплексів) з оцінки впливу різногенетичних небезпечних геологічних процесів на трубопровідно-транспортні ПТС;
- математичне моделювання небезпечних геологічних процесів;
- розрахунки напружено-деформованого стану (НДС) геологічного середовища та ПТС;
- оцінка чинників та прогнозування впливу небезпечних геологічних процесів на трубопровідні споруди.

Наведемо характеристику цих етапів.

Головним етапом моделювання є дослідження об'єктів моделювання, побудова моделі геологічного середовища та процесів на основі дослідження закономірнос-

тей їх перебігу із використанням існуючої бази геологічної, гідрометеорологічної та геоморфологічної інформації.

Головним об'єктом моделювання слугують трубопровідно-транспортні ПТС та небезпечні геологічні процеси. Лінійні трубопровідно-транспортні ПТС являють собою комунікативні системи, техногенною складовою в яких виступають нафтопроводи, газопроводи, етиленпроводи на суходолі та в морському середовищі. Вони відрізняються від локальних та об'єктних промислових, сільськогосподарських, селітебних і рекреаційних ПТС за умовами прокладання, значною протяжністю та відповідно особливостями геологічного середовища і впливу небезпечних геологічних процесів. Для дослідження структури ПТС необхідним є створення та аналіз таких аналітичних блоків, що стосуються впливу геологічного середовища на споруди: геологічна будова, гідрогеологічні умови території, геодинамічні умови, геоморфологічна будова, геофізичні та ландшафтно-кліматичні умови.

Визначальною складовою ПТС є геологічне середовище, яке, за більшістю тверджень, визначається як складова біосфери, що зазнає техногенного впливу. В цілому, для вивчення стану геологічного середовища необхідні спеціалізовані геолого-геоморфологічні дослідження та моделювання з кількісною оцінкою енергетичного балансу сучасних та прогнозних геологічних і технологічних процесів. Основу стратегії таких досліджень складає аналіз обміну речовиною, енергією та інформацією, що відбувається протягом створення та функціонування ПТС, а також пізнання механізму і закономірностей, за якими такий обмін відбувається. Провідним при цьому є територіально-функціональний підхід, що спирається на системний, багатофакторний, порівняльно-геологічний аналіз, на апарат статистики, методи теорій планування експерименту, розпізнавання образів, а також інтеграції досліджень [1]. Використання з цією метою системного підходу та методів геоінформаційного картографування дозволяє об'єднати розрізнену, різномасштабну та різночасову інформацію.

Складність чисельного аналізу стану геологічного середовища пов'язана з різноманіттям геологічних процесів, специфікою

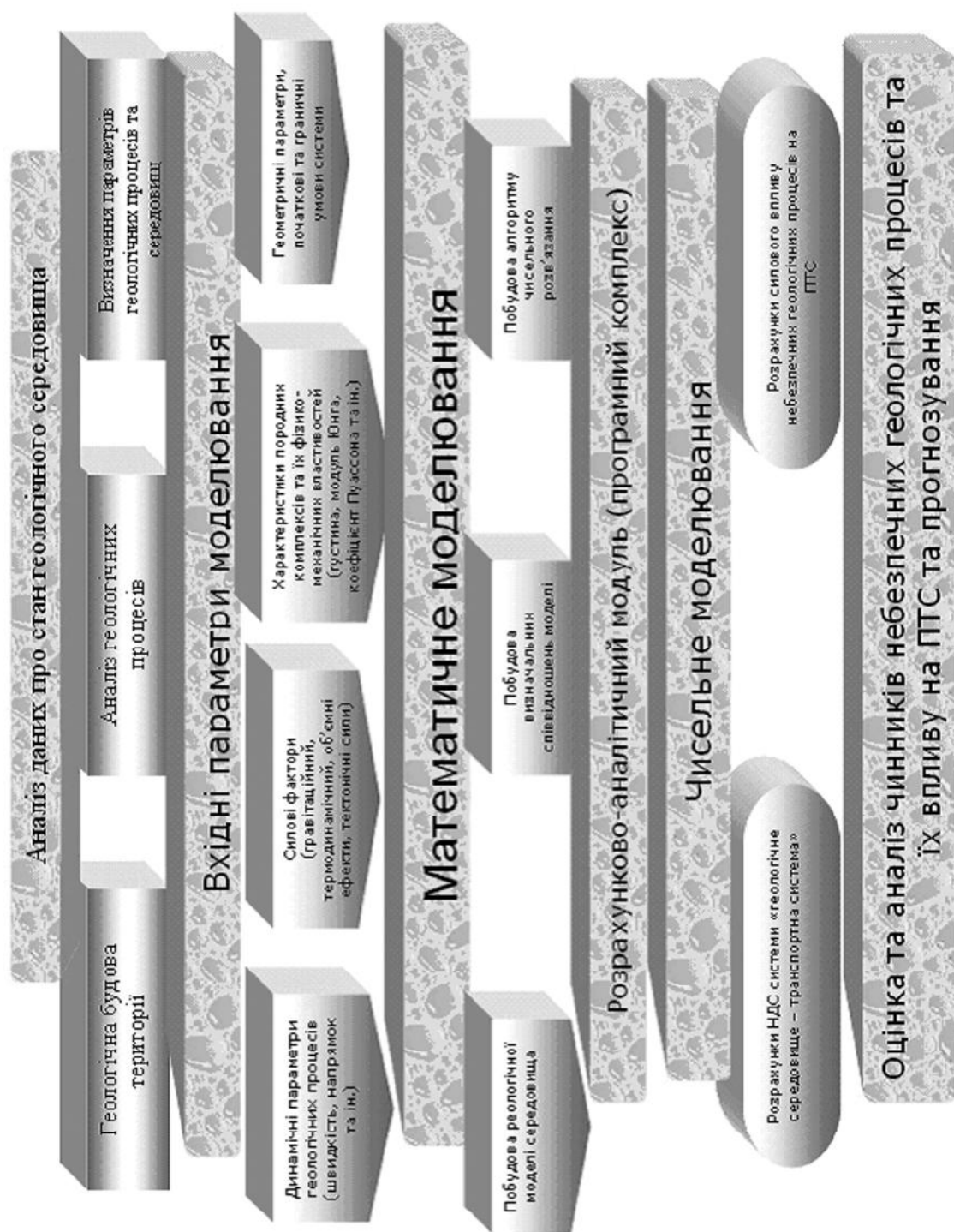


Рис. 1. Схема моделювання стану транспортних ПТС в умовах впливу безпечних геологічних процесів

їх взаємодії, складним характером параметрів, визначення яких потребує обов'язкового поглибленого геологічного аналізу та використання аналітичних досліджень. Саме для цього необхідним є проведення детального аналізу геологічного середовища та характеру геологічних процесів, що здійснюється на окремих модельних полігонах. Полігони обираються таким чином, щоб простежити найбільш характерний вияв геологічних процесів у реологічно різних геологічних середовищах та встановити їх природу і механізми. Аналіз проводиться у межах різних ландшафтно-кліматичних та структурно-тектонічних зон, де спостерігається виразний вплив комплексу геологічних процесів на трубопровідно-транспортні мережі різного призначення.

Необхідним етапом запропонованої методики є визначення природи та характеру впливів на лінійні транспортні споруди. У відповідності до природи впливу геологічного середовища на ПТС та механізму дії геологічних процесів можуть бути виділені такі типи впливів:

1. *Фізичний*, що зумовлений енергетичним впливом певних фізичних полів.

2. *Фізико-хімічний*, пов'язаний з фізико-хімічними властивостями породних комплексів та фізико-хімічними процесами взаємодії різних компонентів ПТС.

3. *Хімічний*, що включає впливи хімічної природи, обумовлений хімічною і біохімічною взаємодією різних речовин і компонентів геологічного середовища як у межах породних комплексів, так і підземних вод [4].

Всі процеси, що виділяються, не залежать від рангу та ієрархічного рівня ПТС, оскільки один і той же вид впливу може проявлятися на різних ієрархічних рівнях. Головною умовою виділення окремих типів та класів впливів є те, що кожний з них визначається певними якісними і кількісними параметрами, що обумовлює розробку ефективних засобів його оцінки. Ці параметри повинні відображати особливості відповідного впливу та співвідноситись із джерелом, що його викликає.

Фізичний тип впливу об'єднує процеси фізичної природи, які є наймасштабнішими і найрізноманітнішими та здійснюються механічним шляхом. У межах цього впливу у

залежності від типу фізичного поля, що діє на споруду, виділяються такі класи, як механічний, гідромеханічний, гідродинамічний, термічний, електромагнітний. Механічний вплив призводить до пошкодження і руйнування споруд та здійснюється силовим шляхом без гідромеханічних впливів. Механічні впливи на ПТС здійснюються внаслідок екзогенних геологічних процесів, найвпливовішими з яких є гравітаційні процеси та криогенні явища. Перша група процесів має гравітаційну природу; отже, масові сили обов'язково беруть участь у їх формуванні. Вони виникають у реологічно різних середовищах (в'язких, пластичних, пружних), а з врахуванням зміни умов – пружно-в'язко-пластичних. Криогенні явища різної генетичної природи пов'язані з механічним впливом сезонно- і багаторічномерзлих порід та зміною їх реологічних характеристик. Гідромеханічні впливи – це впливи, що здійснюються шляхом гідромеханічних механізмів та викликаються рухом частинок у газоподібних та рідких середовищах. У геологічному середовищі вони пов'язані з процесами водної акумуляції та ерозії. Ці впливи також можуть бути викликані зміною рівня підземних вод та їх напору.

До наступного підкласу відносять впливи термічної природи, зумовлені дією теплових полів. Цей вплив є одним з провідних у межах криолітозони, що безумовно діє на всі технологічні елементи ПТС унаслідок різкої зміни температурного режиму гірських порід та набуття ними різних теплофізичних властивостей, що істотно залежать від їх стану, літологічного складу та будови. Поза зоною поширення сезонно- і багаторічномерзлих порід цей вплив позначається на функціонуванні ПТС через процеси нагрівання та охолодження таких компонентів геологічного середовища, як ґрунти, поверхневі води тощо, однак не має такого катастрофічного впливу, як дія криогенних явищ.

Електромагнітні впливи викликаються дією електричних, магнітних та електричних полів; вони можуть бути як тривалими, так і короткочасними.

У класі хімічних та фізико-хімічних впливів вирізняються процеси, обумовлені різноманітними поверхневими фізико-хімічними явищами, що відбуваються у гірських породах і підземних водах. Це такі

процеси, як дифузія, вилуговування, розчинення, осаждення, адсорбція, капілярні явища тощо.

В основі хімічних впливів лежать обмінні та окисно-відновні реакції, а також реакції з формуванням комплексних сполук та ін. Це хімічна взаємодія різних речовин та компонентів геологічного середовища (породних комплексів та поверхневих і підземних вод) з інженерними спорудами. Істотним процесом впливу на функціонування транспортних ПТС, що має фізико-хімічну природу, є корозія. Він зумовлений головним чином електрохімічними реакціями окиснення металу при взаємодії з вологою, при яких метал, видозмінюючись на іонному рівні, зникає з трубопроводу. Корозії зазнають заглиблені трубопроводи, на корозійні процеси яких впливає стан ґрунту, його хімічна складова, питомий електричний опір, аерація, вологість. Корозійні явища також можуть бути пов'язані з впливом хіміко-мікробіологічних факторів (так звана "біокорозія").

Із хімічними впливами пов'язані також процеси карстоутворення, спричинені розчиненням чи вилуговуванням тріщинуватих розчинних гірських порід під дією підземних чи поверхневих вод.

Головними факторами та агентами, що викликають розглянуті впливи різної природи, відповідно слід вважати гравітаційний чинник, гідродинамічний, температурний, фізико-хімічний та біологічний. Екзогенні процеси впливу на транспортні ПТС, що зазнають дії цих факторів, наведено на рис. 2.

Серед великої кількості процесів та явищ, що є супутніми до існування та функціонування транспортних ПТС, у процесі моделювання досліджуються ті, що призводять до найбільших змін при експлуатації споруд та здатні призвести до катастрофічних наслідків і надзвичайних ситуацій. Вони об'єднуються у такі групи. Перша – це комплекс криогенних процесів, пов'язаних з сезонним та багаторічним випучуванням ґрунтів, криогенним розтріскуванням ґрунтів, поліеутворенням, криогенними спливами, відкритими соліфлюкційними потоками, термоерозією, термокарстом, тепловою осадкою ґрунту. Ці процеси, особливо випучування ґрунтів, що виявляється у деформаціях та руйнуванні дорожніх пок-

риттів, трубопроводів тощо, завжди проявляються там, де істотним є хоча б сезонне промерзання ґрунтів. Друга – водні процеси, пов'язані з різними типами потоків (стаціонарними і нестаціонарними схиловидами) у максимально широкому діапазоні зміни властивостей і, відповідно, параметрів геологічного середовища. Третя – гравітаційні процеси, що проявляються у вигляді власне гравітаційних явищ, водно-гравітаційних та гравітаційно-водних процесів як в умовах різних ландшафтно-кліматичних зон суходолу, так і в морському середовищі.

Наступним етапом проведення досліджень є визначення вхідних параметрів моделювання, що визначаються характером процесу та структурою геологічного середовища, в якому він відбувається. Це, як правило, динамічні параметри (швидкість, напрямок тощо), силові чинники впливу (гравітаційний, об'ємні ефекти термопружності, тектонічні сили), фізичні та фізико-механічні характеристики породних комплексів (густина, вологість, модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона тощо), геоморфологічні дані та ін. Значення вказаних параметрів оцінюються за даними польових спостережень, довідниковими та нормативними матеріалами, експериментальними дослідженнями. Значну допомогу у встановленні низки кількісних параметрів для проведення моделювання надають процедури ПС-аналізу, на підставі яких, наприклад, обраховуються довжини русел річок та селевих потоків, площі водозбірних басейнів, кути нахилу схилів, їх експозиція, горизонтальне та вертикальне розчленування рельєфу тощо. Однак слід зазначити, що визначення деяких параметрів моделювання (наприклад, фізико-хімічних параметрів порід у межах деструктивних зон) є практично неможливим як у натурних, так і у лабораторних умовах; тому ці дані також отримуються в результаті моделювання.

Блок підготовки даних моделювання передбачає створення баз даних різномірної інформації по окремих процесах та їх параметрах. Оптимальним варіантом є реляційні бази даних, що організовані з використанням відомих програмних продуктів Oracle, DB2, Microsoft SQL Server, Informix та ін. Також можливою є організація атрибутивних

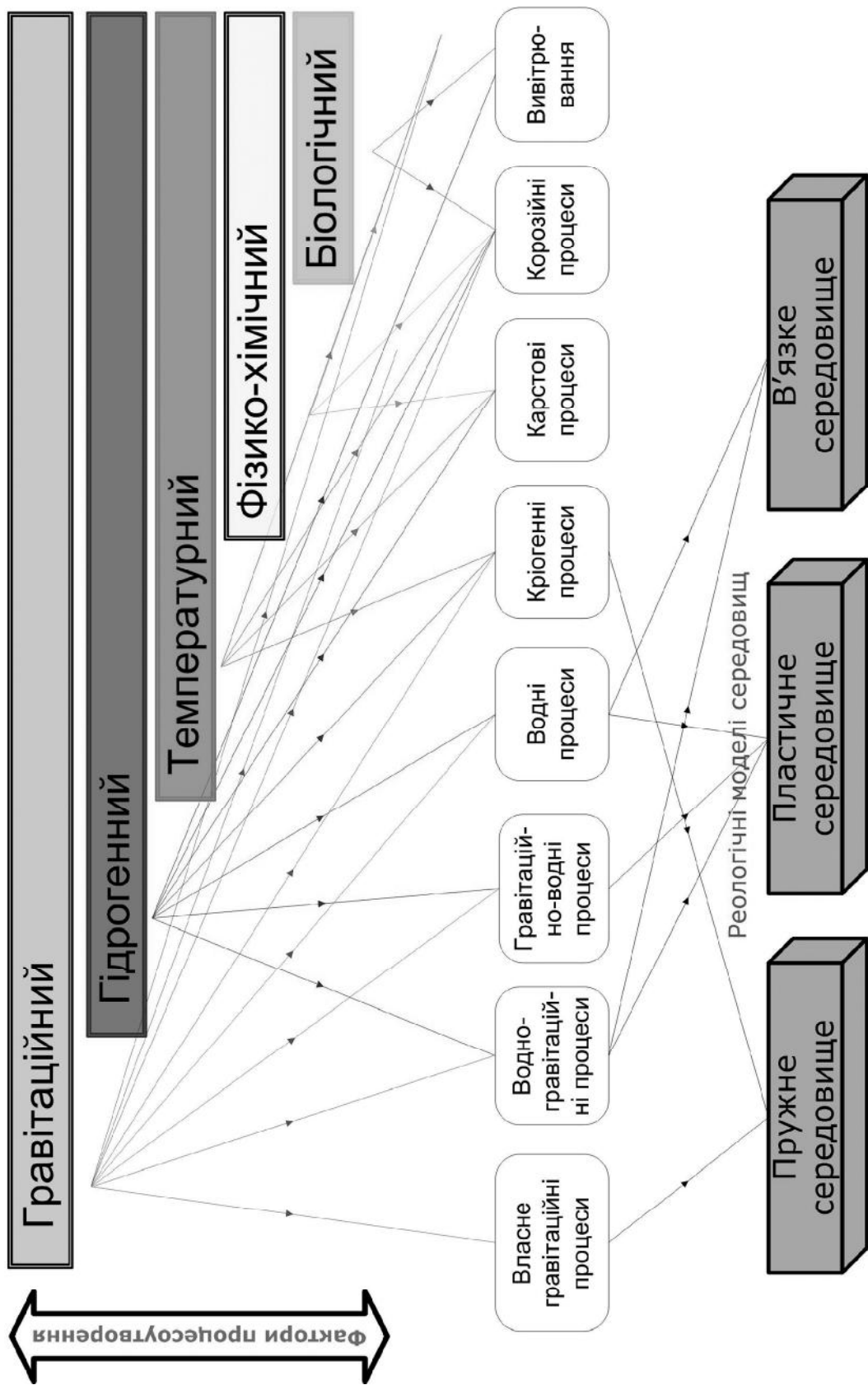


Рис. 2. Головні чинники формування небезпечних геологічних процесів у ПТС та реологічна характеристика середовищ

та просторових даних у ГІС-середовищі. Загалом ГІС-аналіз у даній методиці використовується для розробки прогнозно-еталонних моделей небезпечних геологічних процесів, створення банку критеріїв і ознак їх формування, просторового моделювання та визначення розрахункових параметрів.

Постановка задач якісної і кількісної оцінки впливу геологічних процесів і середовищ на функціонування ПТС описує точне формулювання умов задачі та включає низку завдань вибору реологічної моделі середовища та процесів, визначення співвідношень цієї моделі та побудову алгоритму чисельного розв'язання поставленої задачі. У залежності від механізму та типу процесу обираються моделі поведінки середовища – пружна, пластична, в'язка чи їх комбінації. Кожна модель виражається набором головних реологічних рівнянь, які пов'язують особливості деформацій з особливостями напружень. В основі алгоритмів – базові рівняння механіки суцільного середовища, гідромеханіки та емпіричні залежності по окремих регіонах.

Слід зазначити, що реально існуючі природні геологічні процеси та реологічні різні геологічні середовища характеризуються дуже складною поведінкою, яка повинна розглядатись як комбінація ідеальних моделей. Ці типи поведінки можуть проявлятися або одночасно, або кожна з них переважає у певному інтервалі фізичних умов. Комбіновані моделі характеризують пружно-в'язку та пружно-в'язко-пластичну поведінку. Ці обставини враховуються при розгляді та створенні фізико-геологічних моделей геологічного середовища та наступній розробці математичних моделей розглядуваних процесів і явищ.

Розробка фізико-геологічних моделей процесів та середовищ виконується з чітким визначенням геометричних характеристик розглядуваної системи, параметрів процесів та проводиться на підставі удосконалених класифікацій. Підвищення точності математичного моделювання ПТС досягається за рахунок мінімізації спрощень, що приймаються у математичних моделях та методах їх чисельного аналізу. Головними обмеженнями при цьому виступають повнота та доступність даних, глибина вивчення фізичних та геологічних процесів, ефективність чисельних методів тощо.

Як приклад моделювання розглянемо задачу визначення НДС геологічного середовища з розташованим в ньому трубопроводом (газопроводом). Вважається, що температура середовища та труби є різними. Крім того, припускається можливість зміни об'єму середовища та прояву зовнішніх щодо системи силових впливів. Досліджується НДС системи "геологічне середовище – трубопровід" у поперечному перерізі, яка розглядається як кусково-однорідне тіло.

Зв'язок між компонентами тензорів напружень (σ_{ij}) та деформацій (ε_{ij}) у випадку дії на тіло силових і температурних чинників описується співвідношенням Дюганеля-Неймана:

$$\sigma_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} - 3K\alpha T \delta_{ij}, \quad i, j = 1, 2,$$

де K – модуль об'ємного розширення; λ, μ – параметри Ляме; $\theta = \varepsilon_{ll}, l = 1, 2$; δ_{ij} – символ Кронекера; α – середній коефіцієнт лінійного розширення матеріалу; T – приріст температури.

У разі врахування зміни елементарного об'єму використовується співвідношення

$$\sigma_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} - 3K \delta V_0 \delta_{ij} - 3K\alpha T \delta_{ij},$$

де δV_0 – відносний приріст об'єму.

Враховуючи залежність між деформаціями та переміщеннями $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{ij} + u_{ji})$,

а також фізичні рівняння рівноваги

$$\sigma_{ij,j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0,$$

отримуємо рівняння рівноваги в переміщеннях:

$$(\lambda + \mu)u_{i,li} + \mu u_{i,jj} + \frac{\partial p}{\partial x_i} - 3K((\delta V_0) + \alpha T)_i = 0.$$

Для постановки крайової задачі необхідно додати крайові (граничні) умови, які також записуються у переміщеннях. У випадку задання на границі тіла Γ зусиль q_i маємо

$$(\lambda u_{i,l} \delta_{ij} + \mu (u_{i,j} + u_{j,i})) n_j = q_i + 3K(\delta V_0 + \alpha T) n_i.$$

У випадку задання на межі тіла Γ переміщень f_i одержуємо $u_i = f_i$.

На контурі включення виконуються умови ідеального зчеплення:

$$\sigma_{ij}^{(c)} n_j = \sigma_{ij}^{(a)} n_j,$$

$$u_i^{(c)} = u_i^{(a)},$$

де $\sigma_{ij}^{(c)}, u_i^{(c)}$ та $\sigma_{ij}^{(B)}, u_i^{(B)}$ – складові тензорів напружень та векторів переміщень середовища і включення, відповідно.

Поставлена задача зводиться до розв'язання системи диференціальних рівнянь Нав'є у часткових похідних, яка з урахуванням теореми взаємності робіт Бетті зводиться до системи граничних інтегральних рівнянь. Компоненти НДС визначаються з одержаної системи рівнянь модифікованим методом граничних елементів [2, 3, 5].

Для оцінки факторів впливу на НДС у системі "геологічне середовище – трубопровід" розроблено розрахунково-аналітичний модуль, який забезпечує розрахунки полів напружень та деформацій, надає можливість для виділення та прогнозування небезпечних ділянок у межах трубопроводу, а також передбачає можливість прийняття попереджувальних заходів щодо безпечної експлуатації трубопроводів.

Висновки

Таким чином, запропоновано нові методичні підходи до моделювання складних ПТС, що полягають у розробці окремих моделей геологічних процесів та оцінці їх впливу на транспортні магістралі. Головні послідовні етапи моделювання полягають у побудові моделей геологічного середовища та процесів, що відбуваються у ньому, постановці комплексних задач якісної і кількісної оцінки впливу геологічних процесів і середовищ на функціонування ПТС, розробці фізичної, геолого-фізичної та математичної моделей геологічного середовища, чисельному аналізу небезпечних геологічних процесів, розрахунках НДС геологічного середовища на основі розрахунково-аналітичних моделей. Методика дозволяє прогнозувати

вплив небезпечних геологічних процесів на транспортні споруди, розробити рекомендації щодо підвищення експлуатаційної надійності техногенних об'єктів та попередити екстремальні ситуації. Розрахунково-аналітичні модулі оцінки функціонування ПТС можуть бути використані автономно для незалежної оцінки впливу геологічного середовища на техногенні комплекси та оперативного отримання конкретних рекомендацій щодо випереджувальних заходів безпеки.

1. *Захаров Ю. Ф.* Инженерно-геологический мониторинг освоения Западно-Сибирского нефтегазового комплекса // Газовая пром-сть. – 1987. – № 4. – С. 28–33.
2. *Лавренюк В. І.* Про визначення напружено-деформованого стану матриці з включенням методом граничних елементів // Вісн. Київ. ун-ту. Сер. Фіз.-мат. науки. – 1993. – № 2. – С. 41–44.
3. *Лавренюк В. І., Лавренюк М. В.* Про застосування методу граничних елементів в задачах термопружності кусково-однорідних тіл // Крайові задачі термомеханіки: Міжнар. конф., присвячена пам'яті проф. Ю. М. Коляно, 15–17 квіт. 1996 р. – Львів, 1996. – С. 176–180.
4. *Трофимов В. Т., Королєв В. А., Герасимова А. С.* Классификация техногенных воздействий на геологическую среду // Геоэкология. – 1995. – № 5. – С. 96–107.
5. *Шевчук В. В., Иваник Е. М., Лавренюк В. И., Лавренюк Н. В.* Напряженно-деформированное состояние системы геологическая среда – трубопровод в условиях криолитозоны // Геофиз. журн. – 2008. – Т. 30, № 1. – С. 62–70.

Київ. нац. ун-т
імені Тараса Шевченка,
Київ
E-mail: ivanik@univ.kiev.ua

Стаття надійшла
25.01.12