

Моделювання впливу небезпечних геологічних процесів на функціонування транспортних природно-техногенних систем в умовах морського середовища

Олена Іванік

Київський національний університет імені Тараса Шевченка
вул. Васильківська, 90, Київ, Україна, 03022, e-mail: om_ivanik@gmail.com

Анотація. Досліджено вплив небезпечних геологічних процесів на функціонування транспортних природно-техногенних систем в умовах морського середовища. Наведено особливості геолого-геоморфологічної будови та районування Чорноморської западини згідно різнохарактерних впливів геологічного середовища на трубопровідні об'єкти. Запропоновано підходи до оцінки гідродинамічних навантажень на трубопроводи та проаналізовано процеси, які порушують рівновагу системи «геологічне середовище – трубопровід».

Ключові слова: небезпечні геологічні процеси, трубопровідні системи, Чорноморська западина.

ВСТУП

Україна як незалежна держава має високий геополітичний потенціал із значними перспективами переходу до тривалого сталого розвитку. Однією із основних передумов цього розвитку та визначення стану природно-соціальної системи держави та окремих регіонів є безпечне функціонування природно-техногенних систем (ПТС) та їх надійність. ПТС є комбінованими системами, що являють собою просторово-часову композицію взаємодіючих компонентів штучних і природних об'єктів. Формування та функціонування ПТС є результатом освоєння території, що обумовлено процесами взаємодії між техногенними об'єктами і природним середовищем, одним із компонентів якого є геологічне середовище. Визначення характе-

ру впливів геологічного середовища на транспортні ПТС, що є багатофакторними і об'єднують різні типи та класи процесів, потребує окремих аналітичних досліджень та створення розрахункових схем, що дозволять дослідити джерела цих впливів, їх механізми, інтенсивність, зони дії, і, як наслідок, визначити адекватні методи щодо захисту від їх негативного впливу.

Транспортні ПТС, що належать до регіональної та спеціальної категорій ПТС, являють собою лінійні комунікативні системи, техногенною складовою в яких виступають нафтопроводи, газопроводи, етиленпроводи, автомобільні дороги, залізниці, лінії електропередач та кабельні системи на суходолі та морському середовищі. Транспортні ПТС – це, як правило, протяжні лінійні споруди, що перетинають або побудовані у різних ландшафтно-кліматичних зонах із різноманітними геолого-геоморфологічними умовами та відповідним проявом різнохарактерних геологічних процесів. Очевидно, що їх функціонування обумовлюється інженерно-геологічними умовами територій прокладення, значною протяжністю, а також особливим впливом геологічного середовища та небезпечних геологічних процесів. По-перше, вибір трас прокладення лінійних ПТС у більшості випадків унеможливорює врахування значної кількості варіантів з метою запобігання інтенсивному прояву складних геологічних умов та процесів. По-друге, у зв'язку із значною довжиною

цих систем, є ризик впливу негативних геологічних процесів різного характеру, що передбачає обов'язковий комплексний аналіз геологічних факторів та відповідні засоби прогнозування цього впливу[14]. Крім того, у загальній структурі аналізу й оцінюванні ризику в ПТС одним із головних етапів є ідентифікація всіх джерел небезпеки та визначення подій, що можуть ініціювати виникнення аварій та надзвичайних ситуацій, а обґрунтування фізико-математичних моделей, розрахунків просторово-часових змін і прогнозування можливих наслідків аварій є одним із головних завдань.

ОЦІНКА ВПЛИВУ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГЕОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ТРУБОПРОВІДНІ СИСТЕМИ В УМОВАХ МОРСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА

Трубопровідні системи, прокладені на морському дні у межах різних морфологічних елементів, зазнають інтенсивної дії сучасних геологічних процесів екзогенного та ендегенного характеру. Вони є складними ПТС, функціонування яких знаходиться у прямій залежності від природних умов на морському дні як при їх укладці на дні, так і при експлуатації. У зв'язку з вартістю та унікальністю таких систем необхідні розробки спеціальних методів та засобів їх надійної експлуатації, що враховують їх відмінність від сухопутних трубопроводів. Функціонування морських трубопроводів повинне відповідати певному рівню безпеки персоналу та населення на суміжних територіях, а також екологічній безпеці.

Негативні впливи на трубопровідні системи враховуються на стадії їх проектування та будівництва і залежать, перш за все, від природних особливостей морських акваторій, а також пов'язані із глибиною прокладання, протяжністю, наявністю додаткових статичних та динамічних навантажень. При виборі траси морського трубопроводу враховують (поряд з іншими впливами) вплив геологічного середовища на ці техногенні споруди, пов'язаний, в першу чергу, з сейсмічною активністю і

можливою просадкою ґрунту, а також з рельєфом морського дна, гідродинамічними процесами (хвилі та течії), структурою придонних потоків (наприклад, у випадку суспензійних потоків). Особливо важливими для поведінки трубопроводу мають параметри міцності ґрунту на зсув і відповідні модулі деформації. Необхідно враховувати також властивості ґрунту (густину, вологість, межу текучості та пластичності, гранулометричний склад тощо). Проектувальні розробки повинні враховувати спосіб укладки трубопроводу на морське дно, дію зовнішнього тиску, більшу (у порівнянні із сухопутними трубопроводами) вразливість до змін початкового положення у процесі експлуатації тощо [9].

Згідно класифікації навантажень та впливів на морські трубопроводи [9], можна виділити, зокрема, дію вітру і льодових полів, гідродинамічні сили від хвиль та придонних течій. В окремий клас виділяються навантаження іншого характеру: внутрішній тиск в трубопроводі, вага погонного метра трубопроводу, зовнішній гідростатичний тиск, температура продукту, вага засипки та захисних конструкцій, сили, пов'язані з залишковими деформаціями внаслідок усадок ґрунту та особливостями будівництва, зокрема силами натягу при монтажі трубопроводу та динамічними навантаженнями внаслідок переміщення судна-трубоукладника.

На попередніх стадіях проектування та будівництва розрахунки ґрунтуються на якісних оцінках впливу всього комплексу несприятливих природних факторів на морські трубопровідні системи. При аналізі режиму експлуатації з'ясовано, що в стаціонарних режимах функціонування трубопроводів вплив геологічного середовища незначний, однак ризики неконтрольованої поведінки системи "геологічне середовище-трубопровід" із реальними загрозами його руйнування залишаються. Для виявлення небезпечних геологічних процесів у межах трас магістральних трубопроводів проводяться спеціальні роботи по обстеженню дна, придонних течій та технічного стану устаткування. Регулярне обстеження морських трубопроводів до-

зволяє виявляти наноси і насипи ґрунту, занурення трубопроводу в ґрунт, розмиви ґрунту, що зумовлюють провисання окремих ділянок труби, утворення вигинів і зрушень труби в придонному потоці, зминання і деформації оболонки труби, ушкодження та втрати погонної ізоляції, витоку струмів катодного захисту. Дія цих факторів призводить до зміни напружено-деформованого стану ділянок трубопроводу, втрати його стійкості та ін.

Так, прокладання трубопроводів у межах Чорноморської западини проводиться на різних глибинах, охоплюючи різні морфологічні елементи морського дна. На сьогодні найбільша глибина положення газопроводу у межах Чорного моря складає 2150 м (газопровід “Блакитний потік”), що на третину перевищує глибини закладення усіх існуючих трубопроводів на морському дні. Прокладання підводних кабелів також виконується на різних глибинах, що охоплюють як континентальний шельф, схил, так і абісальну улоговину. Так, наприклад, прокладання підводної волоконно-оптичної лінії зв’язку Росія-Україна-Болгарія BSFOCS (Black Sea Fiber Optic Cable System) сягала глибин 1400 м.

Головний вплив як на вибір трас, так і на функціонування трубопровідних і кабельних систем у межах Чорноморського басейну здійснюють гідрогеологічні процеси (вітрове хвилювання, придонні та вздовжберегові течії), сейсмічні явища, гравітаційні процеси, серед яких визначальне значення мають обвали, підводні зсуви та турбідитні потоки, виділення із субмаринних товщ та ін. Найнебезпечнішими чинниками є значна батиметрична диференціація морського дна, що часто викликає “провисання” труби, зокрема, при перетині ущелин, каньйонів та інших нерівностей рельєфу, які утворюються внаслідок ерозійних процесів та розмиву ґрунту під трубопроводом, а також зміщень трубопроводу під впливом підводних зсувів та суспензійних потоків.

На довговічність та експлуатаційні характеристики трубопроводів негативно впливають вібрації вільних прольотів труби, викликані придонними течіями та ко-

розійні процеси. При розробці технологічних схем та регламенту проведення моніторингу технічного стану трубопроводу необхідно враховувати те, що різні ділянки труби знаходяться у різних геолого-геоморфологічних умовах.

Безумовно, що характер прояву та поширення описаних небезпечних геологічних процесів та їх негативних впливів визначається геологічною будовою цього регіону.

Азово-Чорноморський басейн розташований у межах декількох крупних геотектонічних областей: дорифейської Східно-Європейської платформи, епікімерійської Скіфської та байкальської Мізійської плит. Зона зчленування Східно-Європейської платформи і Скіфської плити простежується у субширотному напрямі по системі глибинних розломів, має шовний характер і супроводжується платформними депресіями. Очевидно, морфоструктурний план басейну контролюється закономірністю розташування геотектонічних елементів.

Порівняльний аналіз сучасної морфологічної структури з дочетвертинною засвідчує успадкованість неотектонічних рухів та визначальну роль розломно-блокової структури шельфу, континентального схилу та глибоководної западини в розподілі потужностей та фацій як четвертинних відкладів, так і всього осадового чохла западини [4].

Чорноморська западина є внутрішньо-материковою депресійною структурою. У межах Чорноморської западини чітко виокремлюються наступні морфоструктурні елементи – шельф, материковий схил та абісальна улоговина. Вони характеризуються відмінною будовою морфологічних елементів морського дна та контролюють прояв різногенетичних екзогенних геологічних процесів, умови формування та особливості залягання осадових утворень у районах, умовними межами яких є зони активних (сейсмоактивних) розломів, що розділяють ділянки з різним неотектонічним режимом. За цим структурно-тектонічним районуванням виділено райони, які мають відмінні особливості геологічної будови та літолого-стратиграфічних

особливостей, і, відповідно прояву небезпечних геологічних процесів.

Перший – **північно-західний шельф, континентальний схил та Західно-Чорноморська западина**. Шельф цієї частини чорноморського басейну являє собою відносно мілководну, відносно вирівняну прилягаючу до суші частину морського дна, що у структурно-геологічному відношенні є продовженням суші і у більшості випадків має реліктовий субаеральний рельєф. Північно-Західний шельф Чорного моря є достатньо протяжним, має ширину від 60 до 200 км та глибину до 120...170 м, та характеризується добре розвинуеною системою підводних каньйонів із значними глибоководними осадовими комплексами конусів виносу, сформованими під час регресивних фаз розвитку басейну (Рис. 1). Найбільшими каньйонами є Дунайський та Дніпровський [4], обидві системи каньйонів були сформовані седиментаційними потоками вздовж вісей тальвегів, що викликало практичну відсутність осадового матеріалу на їх флангах.

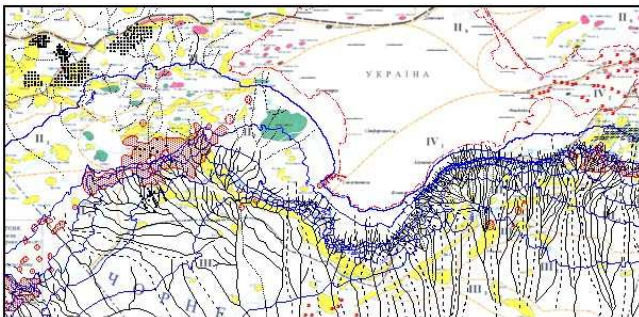
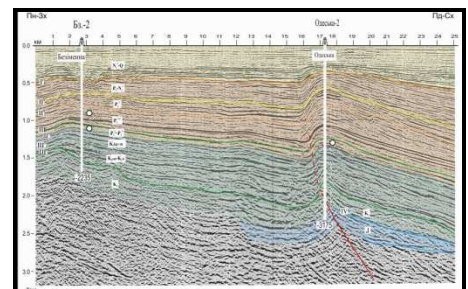


Рис. 1. Схема каньйонів українського сектору Чорноморського басейну, за даними В.І. Мельника та ДП «Чорноморнафтогаз»

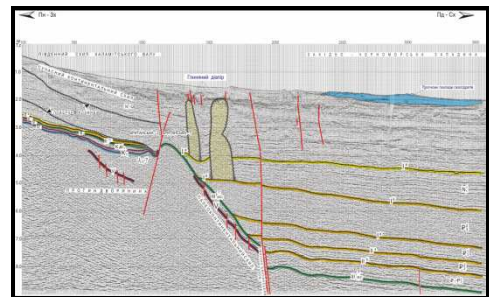
Fig.1. Scheme of canyons of the Ukrainian sector of the Black Sea, according to V. Melnik and "Chornomornaftogas"

Відклади антропогену з різкою стратиграфічною та кутовою незгідністю залягають на більш давніх утвореннях — від пліоценових до мезозойських. Потужності четвертинних відкладів змінюються залежно від морфоструктурних особливостей басейну від декількох сот метрів до повної їх відсутності. Саме відклади антропогену є основою розвитку більшої частини не-

безпечних геологічних процесів у межах морського дна та першочергово досліджуються при аналізі стійкості підводних транспортних систем. За сейсмічними даними в товщі антропогену виокремлюються сейсмостратиграфічні горизонти (Рис. 2), що розділяються чітко означеними незгідностями. Вони відповідають нижній ланці четвертинної системи (гурійський, чаудинський горизонти), середній ланці (древньо-евксинський, евксинсько-узунарський горизонти) та верхній ланці (карангатський та посткарангатський горизонти).



а



б

Рис. 2. Геологічна будова структур Безіменна, Одеська (а) та континентального схилу і північного борту Західно-Чорноморської западини (б) на регіональних профілях МЗГТ (метод загальної глибинної точки), за даними ТЦ ДГП «Укргеофізика»

Fig. 2. Geological structure of structures Nameless, Odessa (a) and the continental slope and the northern edge of the West Black Sea basin (b) on the regional profiles of total depth point method, according to "Ukrgeofizika"

Складну геологічну будову плейстоцен-голоценового чохла північно-західного шельфу Чорного моря характеризують такі прибережно-морські літогенетичні комплекси: алювіальні, морські, алювіально-морські, лиманно-морські, дельтово-морські, прибережно-морські, берегові, лагунно-лиманні, алювіально-дельтові.

Друга зона – Кримсько-Південно-бережна. Ділянка шельфу характеризується значною вузькістю, великою крутістю, складною геологічною будовою з яскраво вираженим зменшенням потужностей антропогенової товщі [4]. Зона зчленування із континентальним схилом ускладнена розривними порушеннями типу насувів. У межах континентального схилу виділяється декілька зон: перша – інтенсивного гравітаційного зносу в межах верхньої частини схилу (до глибин 350 м); друга – акумуляції алеврито-пелітових осадків, де накопичуються продукти гравітаційного зносу і сучасні осадки (до глибин 800 м). Третя зона – зона зносу і транзиту осадків – простежується до глибин 1700 м. Четверта – охоплює нижню частину схилу (до глибин 2000 м) і переходить у ложе западини. Поверхня цієї зони відносно рівна. Специфічним утворенням у межах цієї зони є Ласпинський глибоководний каньйон, що падає у бік Чорноморської западини та переходить у відносно широку пологу долину.

Мінливість седиментаційного процесу в цій активній зоні призвела до того, що на мезо-кайнозойських породах залягають різновікові і не повні розрізи четвертинних осадків. Їх стратиграфічний об'єм контролюється в більшій мірі успадкованими формами рельєфу.

Третя зона – це Прикерченський шельф, континентальний схил та Східно-Чорноморська западина. Шельф Керченського регіону є подовженням Північно-Західної рівнини Керченського півострову, представлений плоскою рівниною, яка поступово понижується у бік глибоководної западини. Шельфову зону та північну частину Східно-Чорноморської западини займають конуси виносів пра-Дону та пра-Кубані, що вплинули на фаціальну структуру кайнозойських відкладів. Шельф складений мезо-кайнозойськими осадовими утвореннями потужність яких становить понад 10...15 км. Континентальний схил Східно-Чорноморської западини по всій довжині ускладнений ступене-подібними перегибами, які залягають на різних рівнях. Четвертинні ступені (рівні) є результатом зміщення, переносу по поло-

го-нахиленому скиді та є свідченням структурно-тектонічних перебудов. Континентальний схил, зокрема склепіннева частина валу Шатського, за своїм структурним положенням значною мірою відповідає північно-західному шельфу. Четвертинні відклади мають мінливі потужності і залягають майже горизонтально.

Загалом четвертинні відклади мають спокійне моноклінальне залягання, але в зонах прикримського шельфу та континентального схилу (вал Андрусова, Западина Сорокіна, вал Шацького) четвертинні розрізи складно побудовані - відрізняються наявністю кутових незгідностей, шаруватістю, евстатичними коливаннями рівня моря, трансгресивно-регресивною ритмікою та змінними швидкостями осадконакопичення. Потужність мінлива і складає за сейсмічними даними від 0 до 2000 м. Наявні численні перериви, зокрема на схилах каньйонів деякі ланки четвертинних стратонів часто взагалі відсутні.

Досліджена геологічна будова Чорноморського регіону дозволяє виокремити структурно-тектонічні, літолого-стратиграфічні, геоморфологічні, геодинамічні та фаціальні критерії та чинники формування небезпечних геологічних процесів, що здійснюють негативний вплив на функціонування транспортних систем, прокладених на морському дні.

Таким чином, головні чинники впливу геологічного середовища на морські трубопровідні системи, що приурочені до складно-побудованих геологічних структур, такі:

- морфоструктурний план морського дна та його зміни вздовж нитки трубопроводу;
- батиметрична диференціація морського дна, у тому числі наявність морфологічних комплексів рельєфу, таких як каньйони, ущелини, проміїни тощо;
- складна літолого-фаціальна структура та відповідні фізико-механічні властивості донних осадків;
- морфолітодинамічні процеси на морському дні у різних батиметричних зонах;
- вплив екзогенних геологічних процесів, пов'язаних як з гравітаційними, так і з гідрогенними чинниками;

- сейсмічність.

У зв'язку з вищевикладеним моделювання екстремальних впливів геологічного середовища на трубопроводи потребує оцінки та аналізу впливу цих процесів на функціонування трубопровідних систем.

Визначення зовнішніх факторів і відповідних сил, що діють на підводний трубопровід, залежить від його положення на морському дні. При заглибленому положенні трубопроводу, засипці його ґрунтом та переміщеннях дна напружено-деформований стан трубопроводу визначається пружнопластичними деформаціями ґрунту (відповідні методи розрахунку можна знайти, наприклад, в роботах П.П. Бородавкіна [1-3]).

У випадку положення трубопроводу на дні або поблизу дна трубопровід обтікається придонним потоком, а його деформації зумовлені гідродинамічними силами.

Найбільш небезпечних впливом характеризуються гідродинамічні процеси, оцінка дії яких на трубопровідні системи наводиться далі. Вплив течій (як хвильових, так і придонних) на трубопроводи, прокладені на морському дні, призводить до розмиву ґрунту. Відомі випадки розмиву трубопроводів на ділянках завдовжки до 600 м.

Вплив течій на трубопроводи відрізняється від впливу на елементи опорних основ морських споруд. Це зумовлено положенням трубопроводів безпосередньо на межі розділу вода – ґрунт. Придонні течії характеризуються високим рівнем турбулентності. Область турбулентного руху займає відносно невелику за глибиною зону і може не враховуватися при розрахунках вертикальних елементів, але відіграє важливу роль при розрахунках стійкості труб, прокладених на морському дні [7].

Експериментальні дослідження дають наближену залежність для швидкості поблизу дна [7,12]:

$$v = v_1 (\bar{z}/\bar{z}_1)^{1/7},$$

де v та v_1 швидкості потоку на відстанях від дна $\bar{z}$ та $\bar{z}_1$ відповідно. Якщо, наприклад, на відстані від дна $\bar{z}_1 = 12$ м заміряна швидкість $v_1 = 2$ м/с, то в межах висоти

трубопроводу діаметром 1,2 м, прокладеного безпосередньо на дні, швидкість буде змінюватись від 0 до 1,65 м/с.

Горизонтальне навантаження на одиницю довжини трубопроводів, розташованих біля дна, може бути визначеним за експериментально отриманою залежністю [7, 12]:

$$p_{TG} = 0,5 c_G \rho v_{ef}^2 D,$$

де c_G - коефіцієнт опору, який залежить не тільки від числа Рейнольдса та шорсткості циліндру, а і від зазору між дном і циліндром. Тут ρ - густина води або щільність багатофазної суміші, що складається з води, піску та уламків порід, яка зазнає руху біля дна. Експерименти продемонстрували, що при розташуванні трубопроводу безпосередньо на дні коефіцієнт c_G на 25...30% більше $C_x = 1,2$. При зазорі, що дорівнює діаметру трубопроводу, обидва коефіцієнти практично однакові; величина v_{ef} - ефективна швидкість в придонній області, що визначається за формулою

$$v_{ef}^2 = (7/9) v_1^2 (D/\bar{z}_1)^{2/7}.$$

Розподіл тиску по поверхні циліндра, розташованого біля дна, асиметричний відносно горизонтальної осі. Розрідження, що утворюється на верхній поверхні циліндру, викликає появу рівнодіючої тиску, направленої вгору. Значення цієї рівнодіючої, що припадає на одиницю довжини циліндра, оцінюють за формулою

$$p_B = 0,5 c_B \rho v_{\partial b}^2 D.$$

Якщо трубопровід розташований на певній віддалі від дна, то відповідно до теорії ідеальної рідини швидкість у зазорі повинна значно зростати (згідно із законом Бернуллі збільшення швидкості супроводжується зменшенням тиску) [7]. Таким чином, в ідеальній рідині під циліндром може виникнути розрідження, і рівнодіюча тиску матиме складову, направлену вниз. У реальних потоках такі ефекти спостерігаються при малій товщині пограничного шару [5, 6] (наприклад, в потоках газу). В придонних потоках вертикальні сили на трубу зазвичай діють вгору (відривають трубу від дна). Це пояснюється

тим, що при обтіканні циліндру на дні розрідження виникає тільки зверху, що створює вертикальну силу, направлену вгору, яка за певних умов може відірвати циліндр від дна. Ця сила не зникає і після відриву тіла від дна, а лише слабшає та поступово зменшується по мірі віддалення від границі потоку, обертається на нуль на відстані, при якій обтікання стає симетричним.

На величину і напрямок вертикальної сили істотно впливає шорсткість дна. Залежність коефіцієнта C_B вертикальної гідродинамічної сили від зазору і ступеня шорсткості дна і циліндру приведена на Рис. 3 [12]. При зазорі $l > 0,5D$ значення коефіцієнту C_B наближається до нуля. При значній шорсткості циліндра можливі відносно невеликі від'ємні значення C_B (гідродинамічна сила спрямована вниз).

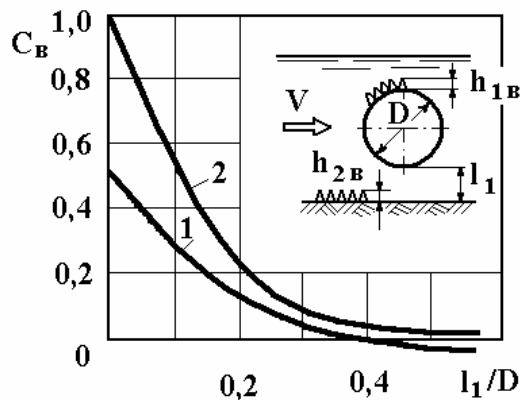


Рис. 3. Залежність коефіцієнта C_B від зазору і ступеня шорсткості дна і циліндру, за [12].

Fig. 3. Dependence of coefficient C_B from the gap and the degree of roughness and the bottom of the cylinder [12].

$$1 - \frac{h_{1B}}{D} = \frac{h_{2B}}{D} = 0.2; \quad 2 - \frac{h_{1B}}{D} = \frac{h_{2B}}{D} = \frac{1}{30}.$$

Вплив шорсткості донної поверхні на вертикальні сили, що діють при трубу, яка лежить на дні докладно проаналізовано в роботі [13]. Тут наведено результати експериментів для циліндра в пристінному потоці. Шорсткість донної поверхні моделювалась піском різних фракцій, гравієм та галькою. При великій шорсткості донної поверхні (зокрема, у випадку гальки) виникають гідродинамічні сили направлені вниз (до дна).

Вплив зазору $\bar{h} = h/d$ на гідродинамічні коефіцієнти c_F і c_B (h – зазор між циліндром та дном; d – діаметр циліндру) можна визначити за емпіричною формулою [5]

$$c_F = c_{F_{\bar{h} \rightarrow \infty}} + \frac{1}{3 + 10\bar{h}};$$

$$c_B = \frac{1}{1,25 + 3,5\bar{h}}.$$

Окрім стаціонарних (осереднених по часові), на трубу діють також нестаціонарні гідродинамічні сили, зумовлені формуванням вихорів за конструкцією. Вони досягають великих значень при малих зазорах та у випадках, коли труба розташована в придонному потоці з високим рівнем турбулентності, наприклад, над нерівним дном з істотною шорсткістю (гравій, галька) [13]. Вібрація трубопроводу істотно погіршує його експлуатаційні характеристики, надійність та довговічність [12]. Запобігти вібрації вдається при укладці труби в спеціальну траншею на дні. Для зменшення вібрації трубопроводів, викликаній відривом вихорів, на поверхні трубопроводів встановлюють інтерцептори, які істотно зменшують кореляцію відриву вихорів по довжині і відповідно зменшують нестаціонарні гідродинамічні сили, що викликають вібрацію. Зокрема, для подолання вібрації використовують спойлери, додаткові швелери, кріпильні деталі, інші надбудови на поверхні труби. Вплив цих деталей на стаціонарні значення гідродинамічних коефіцієнтів опору c_x і вертикальної сили c_v є істотним [5, 12].

Процес розмиву, що характерний для піщаних донних осадків, полягає у винесенні частинок осаду системою вихрових потоків, що виникають при взаємодії течії зі спорудою і дном. Зі збільшенням інтенсивності турбулентних вихорів зростає імовірність розмиву конструкції (особливо при наявності зазору між трубою і дном). Процес розмиву супроводжується зсувом труби в заглиблення, що формується внаслідок розмиву [10-12]. Далі, зазвичай, труба заноситься піском, дно приймає конфігурацію, при якій інтенсивні вихори не утворюються. При зростанні

швидкості придонної течії конструкція може бути розмита знову.

На великих глибинах розмив викликають в основному морські течії. На середніх і малих глибинах істотно впливають хвилі, які турбулізують потік в пристінній області (періодичний характер хвильового руху води сприяє ослабленню структурних зв'язків донного ґрунту).

Існує два головних способи попередження розмиву ґрунту: вибір конструкції фундаменту, що виключає можливість утворення значних циркуляцій води, і спеціальний захист морського дна від розмиву, укладка труби в траншею та її захист спеціальною засипкою. Питання про доцільність заглиблення підводної лінії вирішується з урахуванням надійності та безаварійності роботи споруди впродовж періоду експлуатації і порівнянні будівельних і експлуатаційних затрат. Умови експлуатації підводного трубопроводу, заглибленого в дно нижче за граничний профіль розмиву, досить сприятливі. На таку систему не впливатимуть гідродинамічні навантаження, окрім сил, зумовлених зовнішнім та внутрішнім тиском, а також перепадом температур. Збільшується також стійкість труби до корозії. Недоліком таких технологій є складність проведення ремонтних робіт, а також велика залежність від нестаціонарних геологічних процесів, зокрема, пов'язаних з підводними зсувами, формуванням придонних грязевих потоків, тектонічними процесами.

Якщо трубопровід розташовується на дні (або з зазором над дном), зниженню швидкості обтікання труби сприяють оголожі, бетонні блоки і плити, відсипка з каменю або гравію. В умовах прокладки труб на піщаному дні можна використати явище самозаглиблення [12-13], коли при укладці труба розташовується біля дна з певним невеликим зазором, а далі, внаслідок розмиву дна під нею, труба зміщується в утворене заглиблення і заноситься піском (прикладом успішного застосування такої технології є експлуатація трубопроводу, прокладеного в датському секторі Північного моря).

Поперечні деформації підводного трубопроводу, зумовлені геологічними процесами та дією гідродинамічних сил в придонному потоці, необхідно враховувати на стадії попереднього проектування [8,9]. В розрахунках міцності та стійкості труби поряд з дією зовнішнього тиску слід враховувати також поперечний згин труби. До небезпечних ситуацій може привести провисання ділянки трубопроводу над морським дном та перегин нитки трубопроводу біля дна.

Місцева нестійкість морського трубопроводу (зокрема, газопроводу) пов'язана перш за все з дією великого зовнішнього гідростатичного тиску (колапс труби). Коли зовнішній гідростатичний тиск перевищує внутрішній, умови стійкості (для поперечного перетину труби) записуються у вигляді:

$$(p_e - p_i) \leq k_0 p_{cr},$$

де p_e – зовнішній гідростатичний тиск; p_i – внутрішній тиск; p_{cr} – критичний зовнішній тиск при зминанні (колапсу) труби; k_0 – коефіцієнт, що враховує овальність перетинів труб і дорівнює 0,7 для безшовних труб та 0,6 для труб, що зазнають холодного експандування [8, 9].

При дії зовнішнього тиску та згину умови місцевої стійкості визначаються з відношення:

$$\frac{(p_e - p_i)}{E} + \frac{\varepsilon}{g} < n$$

де E – деформація згину в трубопроводі, ε_b – деформація згину, що відповідає місцевому зім'яттю стінки трубопроводу при чистому згині; g – понижуючий коефіцієнт, що враховує початкову овальність перетинів труб. В основі умови недопущення місцевого зім'яття лежить теорія стійкості замкнених кругових циліндричних оболонок при дії зовнішнього тиску та згину.

ВИСНОВКИ

У загальній структурі аналізу й оцінюванні ризику в транспортних ПТС одним із головних етапів є ідентифікація всіх джерел небезпеки та визначення подій, що можуть ініціювати виникнення аварій та надзвичайних ситуацій, при цьому головним завданням є обґрунтування фізико-математичних моделей, розрахунок просторово-часових змін і прогнозування можливих наслідків аварій. При оцінці впливу геологічного середовища на трубопровідні системи необхідно враховувати гідродинамічні навантаження на трубу біля дна та процеси, які порушують рівновагу системи «геологічне середовище – трубопровід». Вони істотно залежать від положення трубопроводу на морському дні і визначаються пружнопластичними деформаціями ґрунту та величиною гідродинамічних сил. На стадіях попереднього проектування та експлуатації необхідним є врахування поперечних деформацій підводного трубопроводу, зумовлених геологічними процесами та дією гідродинамічних сил. Оцінки цих впливів необхідні для визначення стійкості труби як замкненої кругової циліндричної оболонки при дії зовнішнього тиску та згину.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Бородавкін П.П., 1976.** Механіка ґрунтів в трубопроводному строїтєльствє. Москва, Недра, 224.
2. **Бородавкін П.П., Березин В.М., 1987.** Сооружение магистральных трубопроводов. Москва, Недра, 471.
3. **Бородавкін П.П., Синюков А.М., 1984.** Прочность магистральных трубопроводов. Москва, Недра, 245.
4. **Гожик П.Ф., Багрий І.Д., Войцицький З.Я. та ін., 2010.** Геолого-структурно-термоатмогеохімічне обґрунтування нафтогазоносності Азово-Чорноморської акваторії Київ, Логос, 419.
5. **Девнин С. И., 1983.** Аэрогидромеханика плохобтекаемых конструкций. Справочник. Ленинград, Судостроение, 320.
6. **Диковская Н.Д., 1990.** Экспериментальное

и численное исследование поперечного обтекания цилиндра вблизи плоского экрана. Новосибирск, 21 с.

7. **Іванік О. М., Шевчук В.В., Горбань В.О., 2009.** Аналіз та оцінка впливу деяких небезпечних геологічних процесів на морські трубопроводи. Вісник. Київ. ун-ту. Сер. "Геологія", 47, 61–64.
8. **Мансуров М.Н., Черний В.П., 2005.** Методы расчета морских трубопроводов на прочность и устойчивость. Газовая промышленность, №2, 47-51.
9. **Мансуров М.Н., Черний В.П., 2005.** Современные методы проектирования морских трубопроводов. Газовая промышленность, №2, 43-46.
10. **Россинский К. И., Арбулиева К.М., 1977.** Обтекание тел в турбулентном потоке вблизи твердой поверхности. Водные ресурсы, № 6, 156-167.
11. **Россинский К. И., Любомирова К. С., 1972.** Основные закономерности движения речных наносов. Водные ресурсы, №2 (132), 132-141.
12. **Симаков Г.В., Шхинек К.Н., Смелов В.А., Марченко Д.В., Храпаты Н.Г., 1989.** Морские гидротехнические сооружения на континентальном шельфе. Ленинград, Судостроение, 328.
13. **Сребнюк С. М., Молодорич А.Н., Горбань В.А., Забора В.В., 1988.** Экспериментальные исследования отрывного обтекания цилиндра вблизи плоского шероховатого экрана. Совершенствование средств и методов экспериментальной гидромеханики судна для развития научного прогресса в судостроении. Ленинград, Судостроение, 138-139.
14. **Шевчук В.В., Іванік О.М., Лавренюк М.В., Лавренюк В.І., 2012.** Методичні засади моделювання впливу небезпечних геологічних процесів на функціонування трубопровідно-транспортних природно-технологічних систем. Геологічний журнал, №2, 66-73.

REFERENCES

1. **Borodavkin P.P., 1976.** Mekhanika gruntov v truboprovodnom stroitel'stve [Mechanics of soils in the pipeline construction]. Moscow, Nedra publ., 224 (in Russian).
2. **Borodavkin P.P., Berezin V.M., 1987.** Sooruzhenie magistral'nykh truboprovodov [Constructions of trans pipelines]. Moscow, Nedra publ., 471 (in Russian).

3. **Borodavkin P.P., Sinyukov A.M., 1984.** Prochnost mahystralnych truboprovodov [Strength of trans pipelines]. Moscow, Nedra publ., 245(in Russian).
4. **Gozhik P.F., Bagriy I.D., Voytsytsky Z.Y. et al., 2010.** Geologo-structurno-termoatmogeohimichne obgruntuvannya naftogazonosnosti Azovo-Chornomorskoj akvatorii [Geological-structural and thermoatmogeochemical study of oil and gas prospecting of Azov-Black Sea basin. Kyiv, Logos Publ., 419 (in Ukrainian).
5. **Devnyn S.I., 1983.** Aehrogidromekhanika plokhobtekaemykh konstruksij. Spravochnik. [Aerohydrodynamic of bypass constructions. Directory]. Leningrad, Sudostroenye Publ., 320 (in Russian).
6. **Dykovskaya N.D., 1990.** Eksperimental'noe i chislennoe issledovanie poperechnogo obtekaniya tsilindra vblizi ploskogo ehkrana [Experimental and numerical study of a cross-flow cylinder near a flat screen]. Novosibirsk, 21(in Russian).
7. **Ivanik O.M., Shevchuk V.V., Gorban V.O., 2009.** Analiz ta otsinka vplyvu deyakykh nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv na mors'ki truboprovody [Analysis and evaluation of the effects of certain dangerous geological processes on the marine pipelines]. Bull. of Kyiv University, Geology, 47, 61-64 (in Ukrainian).
8. **Mansurov M.N., Chernykh V.P., 2005.** Metody rascheta morskikh truboprovodov na prochnost' i ustojchivost' [Methods for Calculating of the offshore pipelines on strength and stability]. Gas Industry, Nr. 2, 47-51 (in Russian).
9. **Mansurov M.N., Chernykh V.P., 2005.** Sovremennye metody proektirovaniya morskikh truboprovodov [Modern methods of design of offshore pipelines]. Gas Industry, Nr. 2, 43-46 (in Russian).
10. **Rossynskiy K. I., Arbulyeva K.M., 1977.** Obtekanie tel v turbulentnom potoke vblizi tverdoj poverkhnosti [Flow around bodies in a turbulent flow near the solid surface]. Water Resources, Nr. 6, 156-167 (in Russian).
11. **Rossynskiy K. I., Lyubomyrova K.S., 1972.** Osnovnye zakonomernosti dvizheniya rechnykh nanosov [The basic laws of motion of river sediment]. Water Resources, Nr. 2, 132, 132-141 (in Russian).
12. **Simakov G.V., Shhynek K.N., Smelov V.A., Marchenko D.V., Hrapatiy N.G., 1989.** Morskie gidrotekhnicheskie sooruzheniya na kontinental'nom shel'fe [Marine hydraulic structures on the continental shelf]. Leningrad, Sudostroenye publ. (in Russian).
13. **Srebnyuk S.M., Molodorych A.N., Gorban V.A., Zabora V.V., 1988.** Eksperimental'nye issledovaniya otryvnogo obtekaniya tsilindra vblizi ploskogo sherokhovatogo ehkrana. Sovershenstvovanie sredstv i metodov ehksperimental'noj gidromekhaniki sudna dlya razvitiya nauchnogo progressa v sudostroenii [Experimental studies of separated flow around a cylinder near a rough flat screen. Perfection of means and methods of experimental fluid mechanics vessel for the development of scientific advances in shipbuilding]. Leningrad, Sudostroenye publ., 138-139 (in Russian).
14. **Shevchuk V.V., Ivanik O.M., Lavrenyuk M.V., Lavrenyuk V.I., 2012.** Metodichni zasady modelyuvannya vplyvu nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv na funktsionuvannya truboprovodno-transportnykh pryrodno-tekhnohennykh system [Methodical principles of modeling of dangerous geological processes on pipeline transporting systems]. Geol. Mag., Nr.2, 66-73 (in Ukrainian).

MODELING THE IMPACT OF HAZARDOUS GEOLOGICAL PROCESSES ON FUNCTIONALITY OF OFFSHORE TRANSPORTING NATURE-TECHNICAL SYSTEMS

Olena Ivanik

Taras Shevchenko National University of Kyiv
Vasilkivska str., 90, Kyiv, Ukraine, 03022,
e-mail: om_ivanik@gmail.com

Summary. The consideration is given to the modelling of the influence of dangerous geological processes on the functionality of the offshore transporting systems in the marine geological environment. The peculiarities of geological and geomorphological structure and zoning of the Black Sea basin are considered according to the varying influences of geological environment on the pipeline facilities. Geological hazards distorting the balance in the system "geological environment–pipeline" in the offshore zones are defined. It is proved that the loads and influences depend on the pipe location on the sea bottom. They characterized by the elastic-plastic strain of the soil and hydrodynamic forces. Calculations of these effects are belong to the theory of stability of secluded cylindrical shell.

Key words: geological hazards, pipeline systems, Black Sea basin