

УДК 550.89

О. Іванік, докторант, В. Шевчук, зав. каф., В. Горбань, ст. наук. співроб.

АНАЛІЗ ТА ОЦІНКА ВПЛИВУ ДЕЯКИХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГЕОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА МОРСЬКІ ТРУБОПРОВОДИ

Визначено небезпечні геологічні процеси, що призводять до порушення динамічної рівноваги у системі "геологічне середовище – трубопровід" в межах морського шельфу. Навантаження на трубу істотно впливають на стійкість, міцність та надійність трубопроводу, вони залежать від положення трубопроводу на морському дні і визначаються пружнопластичними деформаціями ґрунту та гідродинамічними силами. Розрахунки впливів геологічного середовища необхідні для визначення стійкості циліндричних оболонок при дії зовнішнього тиску та згину.

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.

Вступ та постановка проблеми. Успішне освоєння вуглеводневих родовищ шельфу та континентального схилу пов'язане з широким використанням морських трубопроводів. Вони є складними природно-техногенними системами, функціонування яких знаходиться у прямій залежності від природних умов на морському шельфі 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 екологічної безпеки.

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 є 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 [7].

Згідно з класифікацією навантажень та впливів на морські трубопроводи [7], 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 дозволяє 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, витоків струмів катодного захисту. Дія цих факторів призводить до зміни напружено-деформованого стану ділянок трубопроводу, втрати його стійкості та ін. Так, наприклад, для трубопровідних систем, прокладених на дні Чорного моря, 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 зміщення трубопроводу під впливом підводних зсувів та суспензійних потоків.

На довговічність та експлуатаційні характеристики трубопроводів негативно впливають вібрації вільних прольотів труби, викликані придонними течіями, та корозійні процеси. Відомі результати діагностичних обстежень підводних трубопроводів підтверджують значну роль геологічного середовища. При розробці технологічних схем та регламенту проведення моніторингу технічного стану трубопроводу необхідно враховувати те, що різні ділянки труби знаходяться у різних геолого-геоморфологічних умовах.

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

- напороструктурний план морського дна та його зміни вздовж нитки трубопроводу;
- батиметрична диференціація морського дна, у тому числі наявність морфологічних комплексів рельєфу, таких, як каньйони, ущелини, промоїни 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 трубопровід потребує оцінки та аналізу впливу цих процесів на функціонування трубопровідних систем.

Вплив геологічного середовища на морські трубопровідні транспортні системи. Визначення зовнішніх факторів і відповідних сил, що діють на підводний

трубопровод, 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 трубопровод обтікається придонним потоком, а його деформації зумовлені гідродинамічними силами.

Метою даних досліджень є оцінка впливу гідродинамічних чинників на трубопроводні системи. 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.

Експериментальні дослідження дають наближену залежність для швидкості поблизу дна [10]:

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

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 визначено за експериментально отриманою залежністю [10]:

$$p_{\Gamma\Gamma} = 0,5 c_{\Gamma} \rho v_{\text{еф}}^2 D,$$

де c_{Γ} – 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_{Γ} на 25-30 % більше $c_x = 1,2$. При зазорі, що дорівнює діаметру трубопроводу, обидва коефіцієнти практично однакові; величина $v_{\text{еф}}$ – ефективна швидкість в придонній області, що визначається за формулою

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

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

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

Якщо трубопровод 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). 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 [4, 5] (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. 1 [10]. 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).

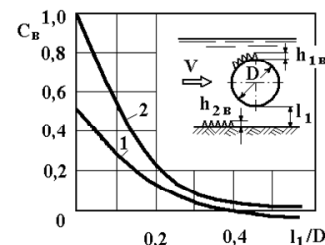


Рис. 1. Залежність коефіцієнта c_B від зазору і ступеня шорсткості дна і циліндру, за [10]

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

Вплив шорсткості донної поверхні на вертикальні сили, що діють на трубу, яка лежить на дні, докладно проаналізовано в роботі [11]. 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_{Γ} і c_B (h – зазор між циліндром та дном; d – діаметр циліндру) можна визначити за емпіричною формулою [4]

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

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

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) [11]. Вібрація трубопроводу істотно погіршує його експлуатаційні характеристики, надійність та довговічність [10]. Запобігти вібрації вдається при укладці труби в спеціальну траншею на дні. Для зменшення вібрації 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_y є істотним [4, 10].

На рис. 2 наведені експериментальні значення коефіцієнтів c_x і c_y для круглого циліндру з інтерцепто-

ром, що обтікається потоком (дослідження виконані в аеродинамічній трубці при швидкостях потоку 5–40 м/сек) [4]. Паралельно твірній на циліндрі була встановлена швелерна балка. Вектор швидкості потоку перпендикулярний до осі труби.

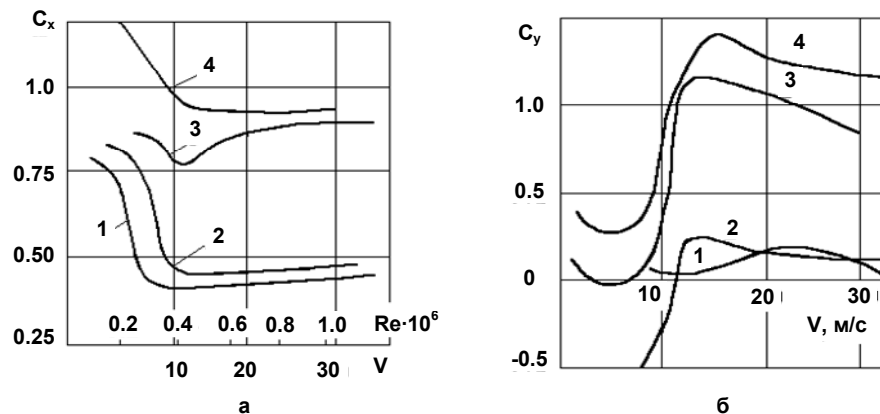


Рис 2. Значення гідродинамічних коефіцієнтів c_x і c_y для труби з швелером, за [4].

а: 1 – $\theta = 0$, 2 – труба без швелера, 3 – $\theta = \pi/2$, 4 – $\theta = \pi/3$;

б: 1 – $\theta = 0$, 2 – $\theta = \pi/6$, 3 – $\theta = \pi/3$, 4 – $\theta = \pi/2$.

Розмиваюча дія течій. 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 [8, 9, 10]. 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 головні 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 згідно з будівельними і експлуатаційними затратами. 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 грязьових потоків, тектонічними процесами.

Якщо трубопровід розташовується на дні (або з зазором над дном), зниженню швидкості обтікання труби сприяють огорожі, бетонні блоки і плити, відсіпка з каменю або гравію. В умовах прокладки труб на піщаному дні можна використати явище самозаглиблення [10,

11], 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 [7]. 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) запи-суються 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 [6, 7].

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

$$\frac{(p_e - p_i)}{p_{cr}} + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_b} \leq g$$

де ε – 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. 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.

1. *Бородавкін П.П.* Механіка ґрунтів в трубопроводному будівництві. – М., 1976. 2. *Бородавкін П.П., Березин В.М.* Сооружение магистральных трубопроводов. – М., 1987. 3. *Бородавкін П.П., Синюков А.М.*

Прочность магистральных трубопроводов. – М., 1984. 4. *Девнин С.И.* Аэрогидромеханика плохобтекаемых конструкций: Справочник. – Л., 1983. 5. *Диковская Н.Д.* Экспериментальное и численное исследование поперечного обтекания цилиндра вблизи плоского экрана // Автореф. диссертации на соискание уч. степени канд-та техн. наук. – Новосибирск, 1990. 6. *Мансуров М.Н., Черный В.П.* Методы расчета морских трубопроводов на прочность и устойчивость // Газовая промышленность. – 2005. – №2. – С. 47-51. 7. *Мансуров М.Н., Черный В.П.* Современные методы проектирования морских трубопроводов // Газовая промышленность. – 2005. – №2. – С. 43-46. 8. *Россинский К.И., Арбулиева К.М.* Обтекание тел в турбулентном потоке вблизи твердой поверхности // Водные ресурсы. – 1977. – № 6. – С.156-167. 9. *Россинский К.И., Любимирова К.С.* Основные закономерности движения речных наносов // Водные ресурсы. – 1972. – №2 (132). – С.132-141. 10. *Симаков Г.В., Шхинек К.Н., Смелов В.А., Марченко Д.В., Храпатый Н.Г.* Морские гидротехнические сооружения на континентальном шельфе. – Л., 1989. 11. *Сребнюк С.М., Молодориц А.Н., Горбань В.А., Забора В.В.* Экспериментальные исследования отрывного обтекания цилиндра вблизи плоского шероховатого экрана // Совершенствование средств и методов экспериментальной гидромеханики судна для развития научного прогресса в судостроении. – Л., 1988. – С.138-139.

Надійшла до редколегії 27.09.08