

SECTION 12. TRANSPORT

DOI: 10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.4.12.1

12.1 Визначення архітектурно-конструктивного типу бурових платформ для шельфу Азовського моря з урахуванням льодових навантажень

Успішне проектування нафтогазопромислових океанотехнічних систем, призначених для експлуатації на шельфі морів і океанів, залежить від достовірних методів розрахунку зовнішніх впливів, зокрема льодових навантажень. Зовнішні навантаження на океанотехнічні системи є основними факторами при виборі їх типів і конструктивних особливостей в процесі проектування з урахуванням природно-кліматичних умов конкретного району експлуатації. Об'єктивний розрахунок цих навантажень дозволить оптимізувати вартість таких споруд, які повинні успішно протистояти впливу вітрового хвилювання і дрейфуючих торосів в замерзаючих морях, забезпечуючи ефективну експлуатацію промислів і екологічну безпеку цілих регіонів. Діючі в даний час нормативні документи щодо визначення цих навантажень, не містять цілого ряду рекомендацій, які б враховували різні форми проєктованих споруд та ту різноманітність різних розрахункових сценаріїв, які можуть реалізуватися в процесі їх терміну служби. З цієї причини, розвиток існуючих і створення нових методів розрахунку льодових навантажень на океанотехнічні системи специфічних форм є досить актуальною проблемою.

Незважаючи на те, що в основному, існуючі бурові платформи — морські бурові платформи працюють цілком добре за умови правильного урахування дії льоду, виникає ряд проблем як технічного, так і економічного характеру, які викликані або необґрунтованими, або завищеними оцінками товщини льоду в районі їх установки [432]:

- Прогноз зміни товщини льоду, особливо з огляду на різкі кліматичні зміни в останнє десятиліття, підвищує безпеку експлуатації морських бурових платформ (МБП) та сприяє скороченню часу їх простою.

- Невірна орієнтація МБП в залежності від напрямку дрейфу льоду може призвести до невірного урахування розрахованої льодового навантаження.
- Розлом льоду навколо МБП є дуже важливим по відношенню до величини льодових навантажень.

Усі ці фактори беруться до уваги при розробці МБП, що працюють в складну льодову обстановку для того, щоб звести до мінімуму криголамну підтримку, з огляду на можливість опору дії льодового навантаження, яку буде зазнавати МБП з будь-якого напрямку.

Прогнозовані льодові умови використовуються для оцінки льодових навантажень на МБП і, отже, для оцінки життєздатності пропонованої конструкції платформи.

Таким чином, формалізація способу розв'язання задач аналізу впливу навантаження льоду на бурові платформи виявляється досить складною задачею. Разом з тим, вона диктується потребами автоматизації проектування систем на ЕОМ. Уже з цієї досить важливої причини виникає необхідність в пошуку інших підходів.

Застосування нейронних мереж до прогнозу товщини льоду полягає в розробці методів, що дозволяють визначити величину льодових навантажень на бурові платформи.

Штучні нейронні мережі або просто нейронні мережі часто розглядаються як мережі дублюючі обробку інформації нервової системи. Ранні роботи в зазначеній галузі були засновані на біологічних дослідженнях функцій мозку. У роботах [433, 434, 435] описані системи нейронів і правила навчання, заснованих на біологічних моделях. Сьогодні більшість нейронних мереж несуть тільки швидкоплинну схожість з природою мозкової або нервової систем. Схожість між сучасною нейронною мережею і головним мозком тварини лежить в ідеї виконання обчислень за допомогою паралельної взаємодії дуже великої кількості простих об'єктів.

Нейронні мережі використовуються в задачах розпізнавання образів, класифікації або апроксимації функцій [436, 437, 438, 439, 440, 441]. Як правило,

мережі буде запропоновано класифікувати вхідний шаблон, як той, що належить до одного з декількох різних можливих класів, або для отримання вихідного значення невідомої функції для одного або декількох вхідних значень. Принциповою особливістю нейронних мереж є їх здатність будувати зв'язок між входом і виходом мережі без чітко вираженого пояснення правила. Замість цього, вони регулюють їх внутрішні з'єднання, ґрунтуючись на ряді прикладів необхідного відображення, і потім використовують їх для узагальнення.

Існують різні типи нейронних мереж [442], кожна з яких має свої переваги і недоліки, залежно від задачі, що розглядається. Так, для задач класифікації і ряду інших додатків застосовується мережа прямого поширення, яка містить або одношаровий перцептрон, або багатошаровий перцептрон. Мережі прямого поширення характеризуються тим, що інформація, яка надходить на вхід, прямує строго вперед і прямує на вихід без зворотного зв'язку, тобто графи в зазначених мережах не мають петель. Мережі прямого поширення є статичними в тому сенсі, що на заданий вхід вони виробляють одну сукупність вихідних значень, що не залежать від попереднього стану мережі.

Переваги використання нейронних мереж.

Особливостями роботи нейронних мереж є, по-перше, розпаралелювання обробки інформації і, по-друге, здатність до самонавчання, тобто створювати узагальнення (здатність отримувати обґрунтований результат на підставі даних, які не зустрічалися в процесі навчання) [443]. Ці властивості дозволяють нейронним мережам вирішувати складні (масштабні) завдання, які на сьогоднішній день вважаються важковирішуваними.

Використання нейронних мереж забезпечує наступні корисні властивості систем.

1. Нелінійність. Нелінійність розподілена по мережі, є надзвичайно важливою властивістю, особливо якщо сам фізичний механізм, який відповідає за формування вхідного сигналу, теж є нелінійним.

2. Відображення вхідної інформації у вихідну. Однією з популярних парадигм навчання є навчання з учителем. Це передбачає зміну синаптичних ваг

на основі набору маркованих учбових прикладів. Кожен приклад складається з вхідного сигналу і відповідного йому бажаного відгуку. На цьому безлічі випадковим чином вибирається приклад, а нейронна мережа модифікує синаптичні ваги для мінімізації розбіжностей бажаного вихідного сигналу і формованого мережею відповідно до обраного статистичного критерію. При цьому власне модифікуються вільні параметри мережі. Це навчання проводиться до тих пір, поки зміни синаптичних ваг не стануть незначними. Таким чином, нейронна мережа навчається на прикладах, складаючи таблицю відповідностей вхід-вихід для конкретного завдання.

3. Адаптивність. Нейронні мережі мають здатність адаптувати свої синаптичні ваги до змін навколишнього середовища. Зокрема, нейронні мережі, навчені діяти в певному середовищі, можна легко перевчити для роботи в умовах незначних коливань параметрів середовища. Відомо, що чим вище адаптивні здібності системи, тим більш стійкою буде її робота в нестаціонарному середовищі. Для того щоб використовувати всі переваги адаптивності, основні параметри системи повинні бути досить стабільними, щоб можна було не враховувати зовнішні перешкоди, і досить гнучкими, щоб забезпечити реакцію на істотні зміни середовища.

4. Очевидність відповіді. У контексті завдання класифікації образу можна розробити нейронну мережу, що збирає інформацію не тільки для визначення конкретного класу, а й для збільшення вірогідності прийнятого рішення. Згодом ця інформація може використовуватися для виключення сумнівних рішень, що підвищить продуктивність нейронної мережі.

5. Контекстна інформація. Знання подаються у самій структурі нейронної мережі за допомогою її стану активації. Кожен нейрон мережі потенційно може бути схильний до впливу всіх інших її нейронів. Як наслідок, існування нейронної мережі безпосередньо пов'язано з контекстною інформацією.

6. Відмовостійкість. Це означає, що при несприятливих умовах їх продуктивність падає незначно. Незначне пошкодження структури ніколи не викликає катастрофічних наслідків. Це — очевидна перевага робастних

обчислень, однак її часто не враховують. Щоб гарантувати відмовостійкість роботи нейронної мережі, в алгоритми навчання потрібно закладати відповідні поправки.

7. Масштабованість. Паралельна структура нейронних мереж потенційно прискорює рішення деяких завдань і забезпечує масштабованість нейронних мереж в рамках технології VLSI (Very-large-scale integration). Одним з переваг технологій VLSI є можливість представити досить складну поведінку за допомогою ієрархічної структури.

8. Однаковість аналізу і проектування. Нейронні мережі є універсальним механізмом обробки інформації. Це означає, що одне і те ж проектне рішення нейронної мережі може використовуватися в багатьох предметних областях. Це властивість проявляється декількома способами.

- Нейрони в тій чи іншій формі є стандартними складовими частинами будь-якої нейронної мережі.
- Ця спільність дозволяє використовувати одні і ті ж теорії та алгоритми навчання в різних нейромережевих додатках.
- Модульні мережі можуть бути побудовані на основі інтеграції цілих модулів.

Як інструмент для прогнозування товщини льодових полів в даній роботі використовуються нейронні мережі: однопараметричні і багатофакторні. Використання цих мереж, як говорилося вище, дозволить оперативно і точно оцінювати товщини льодових утворень, що в свою чергу дозволить визначати величину льодового навантаження на океантоехнічне споруду. Перевагою застосування нейромережевих технологій є можливість прогнозувати товщину льодових утворень, як на найближчі години, так і на весь термін експлуатації бурової платформи. Цей прогноз є гнучким, при змінах вхідних параметрів буде змінюватися і прогнозована товщина.

У загальному вигляді алгоритм визначення величини льодових навантажень з урахуванням прогнозованої товщини льоду виглядає наступним чином:

1) На початковому етапі відбувається відбір і обробка статистичних даних фізичних параметрів, що впливають на формування льодових утворень.

2) Вибір типу нейронної мережі для аналізу параметрів льодових утворень (однопараметрична або багатопараметрична нейронні мережі).

3) Поділ статистичних даних на дві категорії: навчальна вибірка (за допомогою неї буде проводитися «тренування і навчання» мережі) і перевірочні дані (після отримання результатів за допомогою нейронної мережі, необхідно виконати верифікацію отриманих даних, порівнявши їх з реальними значеннями).

4) Підготовка статистичних даних до введення в нейронну мережу.

5) Виконання прогнозу.

6) Введення отриманих даних у відомі методики з визначення льодових навантажень на бурові платформи.

Розглянемо докладніше послідовність дій при прогнозуванні льодових утворень.

Для попередньої оцінки льодового навантаження можна використовувати однопараметричну нейронну мережу, яка прогнозує товщину льоду за статистичними даними товщини льоду, зібраних за деякий період. Для більш точного прогнозу і мінімізації помилки слід підібрати статистику з найбільшим числом даних.

Для оцінки льодового навантаження в конкретній точці експлуатації бурової платформи пропонується багатфакторна нейронна мережа, в якій в якості вхідних даних крім товщини льоду так само вносяться дані про температуру повітря, швидкості вітру, рівень моря і тип погодних умов, згідно з метеорологічним кодуванням.

Відповідно до рекомендацій, викладених в [444, 445, 446, 447], перед початком навчання мережі необхідно виконати попередню обробку даних, так званий підготовчий етап, який зводиться до масштабування або нормування вихідних даних. Для цієї мети можуть бути використані наступні функції (1), (2).

$$a_i' = \frac{a_i - M_a}{\sqrt{D_a}}, \quad (1)$$

$$\text{де } M_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i, \quad D_a = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_i - M_a)^2.$$

або співвідношення

$$a_i' = \frac{a_i - a_{i,\min}}{a_{i,\max} - a_{i,\min}}, \quad (2)$$

де $a_{i,\min}$ і $a_{i,\max}$ — відповідно мінімальне і максимальне значення параметра на всьому діапазоні можливих значень в рамках наявної вибірки.

Використання співвідношення (2) дозволяє виконати нормування параметра в діапазоні значень $[0 \dots 1]$. Таке нормування забезпечить кращу якість навчання і підвищить швидкість навчання нейронної мережі.

На наступному етапі необхідно розрахувати параметри майбутньої нейронної мережі. Число входів мережі (визначається числом факторів, які були обрані з набору статистичних даних) N_x ;

1) число виходів мережі (відповідно до структури мережі є тільки один вихід — оцінка значення товщини льоду) N_y ;

2) число навчальних вибірок (визначається як 75-80% від загального числа статистичних даних) Q .

Далі, на основі прийнятих значень параметрів мережі обчислюється необхідне число синаптичних ваг N_w за допомогою нерівності (3):

$$\frac{N_y Q}{1 + \log_2(Q)} \leq N_w \leq N_y \left(\frac{Q}{N_x} + 1 \right) (N_x + N_y + 1) + N_y. \quad (3)$$

Після цього стає можливим обчислення необхідного числа нейронів прихованого шару за формулою (4)

$$N = \frac{N_w}{N_x + N_y}. \quad (4)$$

Також число нейронів прихованого шару можна визначити за допомогою нерівності (5) [448]

$$\frac{Q}{10} - N_x - N_y \leq N \leq \frac{Q}{2} - N_x - N_y. \quad (5)$$

Алгоритм послідовностей виконання дій при прогнозуванні товщини льодових утворень представлений на рисунку 1 у вигляді блок-схеми.

Однопараметрична нейронна мережа

Розглянемо нейронну мережу прямого поширення для реалізації алгоритму градієнтного походження, що дозволяє прогнозувати товщину морського льоду в Азовському морі, аналізуючи характеристику, що змінюється в часі і розрахунок оцінки навантаження.

У даній роботі розроблена модель нейронної мережі, в якій є три шари, в тому числі вхідний шар, прихований шар, і вихідний шар. Номер нейрона кожного шару n , m і l відповідно. Початкові ваги W_1 , W_2 , і пороги Θ_1 , Θ_2 , нейронної мережі генеруються за допомогою відповідності випадкової послідовності, як вихідних даних. Як функція активації між шарами нейронної мережі вибирається сігмовидна функція (6).

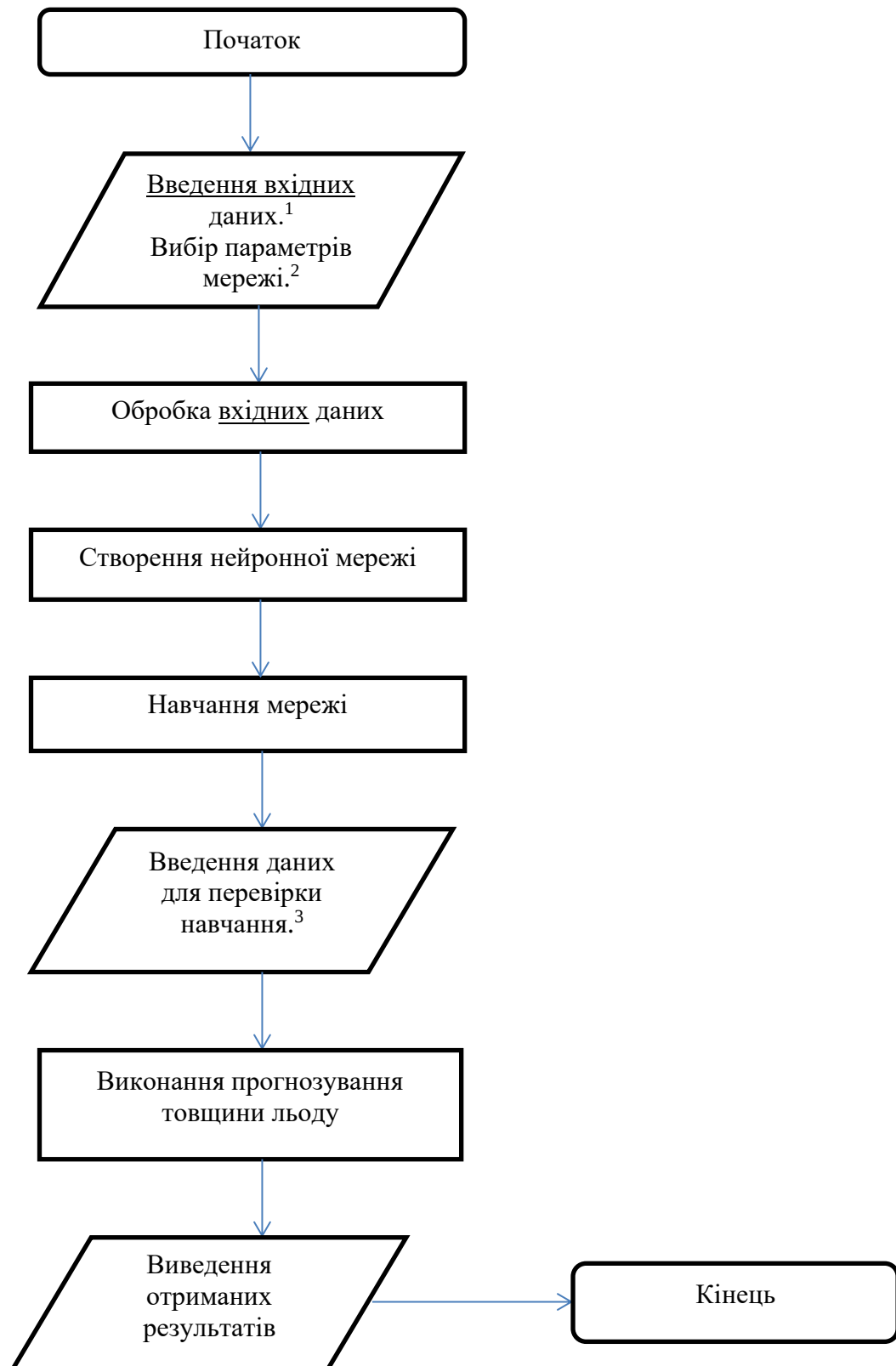


Рисунок 1 — Блок-схема алгоритму виконання прогнозу товщини льоду

¹Вхідні дані:

- Для однопараметричної нейронної мережі:
товщина льоду;
дата виміру товщини льоду
- Для багатопараметричної нейронної мережі:
дата проведення замірів;
швидкість вітру;
температура повітря;
зміна рівня води;
товщина льоду.

²Визначення кількості входів в нейронну мережу (відповідає кількості параметрів в мережі), визначення кількості виходів, кількості проміжних шарів, точності, кількості спроб навчання, точність похибки.

³Для багатопараметричної нейронної мережі введення вхідних даних без товщини льоду.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (6)$$

Q групи навчальних вибірок $X_p = \{x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pn}\} (1 \leq p \leq Q)$ повинні бути введені в нейронну мережу, і далі розраховується загальна середня помилка нейронної мережі (7)

$$E_{avg} = \frac{1}{2Q} \sum_{p=1}^Q \sum_{k=1}^l (y_k^t - y_k)^2, \quad (7)$$

де E_{avg} є спільною середньою помилкою з Q груп зразків навчання, і очікуваний вихід y_k^t і y_k реальний вихід нейронної мережі відповідно.

Функція відповідності алгоритму полягає в наступному:

$$F_v = \frac{1}{1 + E_{avg}^v},$$

де F_v є відповідністю v -го значення у вибірці, і E_{avg}^v середня похибка v -го значення ($1 \leq v \leq N$). Відповідність між процесом відбору, можливістю вибору p_s обчислюється з використанням (8), і процес відбору буде завершено.

$$p_s(U^i) = \alpha p_f(U^i) + (1 - \alpha) p_d(U^i) = \alpha \frac{f(U^i)}{\sum_{i=1}^M f(U^i)} + (1 - \alpha) \frac{1}{N} e^{C_i/\beta}. \quad (8)$$

Адаптивна ймовірність перетину і ймовірність зміни розраховуються з використанням (9) і (10) відповідно, процеси перетину і зміни будуть завершені, і генеруються значення нового покоління.

$$p_c = \begin{cases} k_1 \frac{f_{\max} - f_m}{f_{\max} - f_{avg}}, f_m \geq f_{avg} \\ k_2, f_m < f_{avg} \end{cases}; \quad (9)$$

$$p_c = \begin{cases} k_3 \frac{f_{\max} - f_l}{f_{\max} - f_{avg}}, f_l \geq f_{avg} \\ k_4, f_l < f_{avg} \end{cases}. \quad (10)$$

Розрахунок відбувається до тих пір, поки середня помилка E_{avg} з оптимального значення задовольняється $E_{avg} < \varepsilon_1$, де ε_1 є глобальною точністю пошуку. Адаптивний алгоритм застосовується для оптимізації ваги і порога нейронної мережі з використанням (11), поки середня помилка E_{avg} оптимального значення не задовольняє $E_{avg} < \varepsilon_2$, де ε_2 є остаточною точністю.

$$\Delta W = \eta \frac{\partial E_{avg}}{\partial W}, \quad (11)$$

де ΔW є коригування ваги, η є швидкість навчання і розраховується з використанням (12):

$$\eta(k+1) = \begin{cases} 1.05\eta(k), \text{ якщо } E_{avg}(k+1) < E_{avg}(k) \\ 0.7\eta(k), \text{ якщо } E_{avg}(k+1) > 1.04E_{avg}(k) \\ \eta(k), \text{ інакше.} \end{cases} \quad (12)$$

Після всіх дій навчені ваги W_1 , W_2 і пороги Θ_1 , Θ_2 нейронної мережі зберігаються, і готові для зразків тестування.

Застосування розробленої моделі нейронної мережі для прогнозування товщини льоду в Азово-Чорноморському басейні.

Реальна товщина льоду може бути отримана за даними режимних спостережень. Нормативні дані регіонів, отримані емпіричним шляхом, призначені, для того щоб дати зацікавленим сторонам загальне уявлення про регіон. Вони не спрямовані на надання значень параметрів, придатних для використання при проектуванні морських споруд. Описані параметри повинні враховуватися при проектуванні, однак деякі з них можуть виявитися несуттєвими при проектуванні окремих видів споруд. Повний опис відповідних параметрів може зажадати перевірки та аналізу всіх наявних даних, збору нових даних, інтерпретації параметрів, що характеризують сусідні регіони або схожі льодові режими, а також статистичної оцінки даних при визначенні параметрів фізичного середовища. Для визначення параметрів природного середовища, необхідних для проектування морських споруд, слід залучати фахівців відповідного профілю. Для попередніх розрахунків використовується також різні емпіричні методи.

Відповідно до статистичних значень товщини льоду в Азовському морі з 2007 по 2017 років, отримані за допомогою супутникових даних (таблиця 1),

максимальна товщина льоду прогнозується завдяки моделі нейронної мережі, і прогнозує результати відповідні реальним значенням.

Значення навчальної вибірки нормовані на підвищення ефективності нейронної мережі з використанням (13):

$$\xi' = \frac{\xi - \xi_{\min}}{\xi_{\max} - \xi_{\min}}, \quad (13)$$

де ξ — необроблені дані зразка, $\xi_{\min}$ і $\xi_{\max}$ — максимальні і мінімальні початкові дані зразка відповідно і ξ' — нормовані дані між 0 і 1.

Таблиця 1 – Товщина льоду для Азовського моря за період з 2007 року по 2017 рік.

Дата	Максимальна товщина льоду, см	Дата	Максимальна товщина льоду, см
18.12.2007	5	10.04.2012	5
15.01.2008	30	25.12.2012	15
12.02.2008	70	22.01.2013	30
11.03.2008	30	05.02.2013	30
30.12.2008	15	28.01.2014	5
13.01.2009	70	04.02.2014	15
03.02.2009	30	17.02.2014	30
29.12.2009	5	05.12.2014	5
19.01.2010	15	02.01.2015	5
09.02.2010	15	20.01.2015	10
25.01.2011	15	12.01.2016	10
15.02.2011	15	27.12.2016	10
29.11.2011	5	23.01.2017	10
06.12.2011	5	30.01.2017	15
31.01.2012	15	07.02.2017	15
13.02.2012	30	13.02.2017	30
19.03.2012	30		

За формулою (13) були розраховані значення для навчання моделі нейронної мережі, представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Дані для навчання моделі нейронної мережі

Серійний номер	Вхідні дані	Вихідні дані
1	0; 0,3846; 1,0000; 0,3846	0,1538
2	0,3846; 1,0000; 0,3846; 0,1538	1,0000
3	1,0000; 0,3846; 0,1538; 1,0000	0,3846
4	0,3846; 0,1538; 1,0000; 0,3846	0
5	0,1538; 1,0000; 0,3846; 0	0,1538
6	1,0000; 0,3846; 0; 0,1538	0,1538
7	0,3846; 0; 0,1538; 0,1538	0,1538
8	0; 0,1538; 0,1538; 0,1538	0,1538
9	0,1538; 0,1538; 0,1538; 0,1538	0
10	0,1538; 0,1538; 0,1538; 0	0
11	0,1538; 0,1538; 0; 0	0,1538
12	0,1538; 0; 0; 0,1538	0,3846
13	0; 0; 0,1538; 0,3846	0,3846
14	0; 0,1538; 0,3846; 0,3846	0
15	0,1538; 0,3846; 0,3846; 0	0,1538
16	0,3846; 0,3846; 0; 0,1538	0,3846
17	0,3846; 0; 0,1538; 0,3846	0,3846
18	0; 0,1538; 0,3846; 0,3846	0
19	0,1538; 0,3846; 0,3846; 0	0,1538
20	0,3846; 0,3846; 0; 0,1538	0,3846
21	0,3846; 0; 0,1538; 0,3846	0
22	0; 0,1538; 0,3846; 0	0
23	0,1538; 0,3846; 0; 0	0,0769
24	0,3846; 0; 0; 0,0769	0,0769

Для навчання нейронної мережі були обрані товщини льоду в період з 18.12.2007 року по 17.02.2014 рік. Нормовані навчальні дані в таблиці 2 вводяться в моделі нейронної мережі. Нейрони вхідного рівня, прихованого

рівня і вихідного рівня встановлюються як 4 ($n = 4$), 10 ($m = 10$) і ($l = 1$) [437]. Змінюючи глобальну точність пошуку ε_1 і кінцеву точність ε_2 та максимальну кількість ітерацій, було проведено навчання моделі нейронної мережі. На рисунках 2 – 5 представлено результати навчання: зелена крива показує реальні значення, а синя крива — значення, отримані за допомогою моделі нейронної мережі

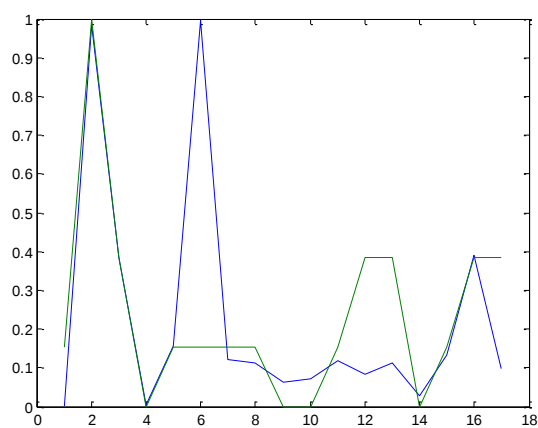
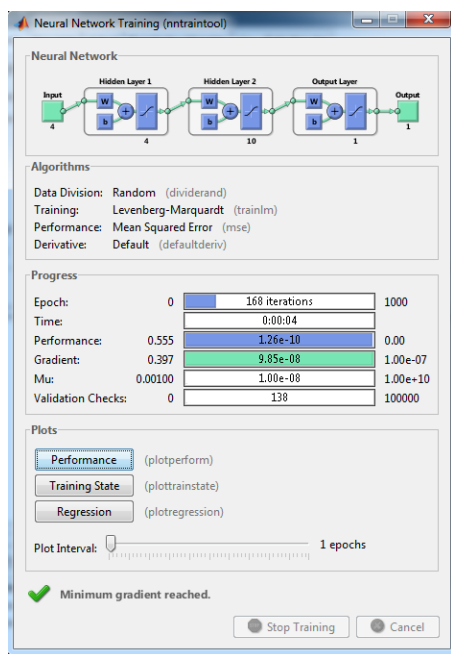


Рисунок 2 — Модель нейронної мережі $\varepsilon_1 = 10^{-7}$, $\varepsilon_2 = 10^{10}$, максимальна кількість ітерацій 1000, кількість перевірок достовірності 10^5 , процес навчання задоволений 168 раз.

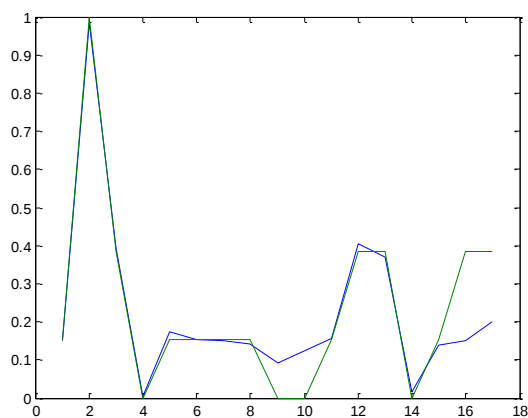
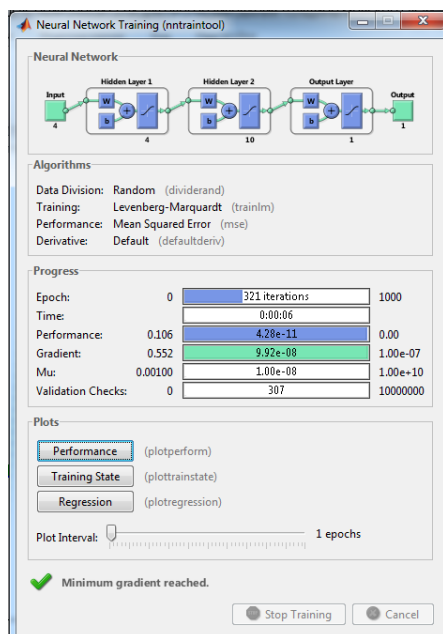


Рисунок 3 — Модель нейронної мережі $\varepsilon_1 = 10^{-7}$, $\varepsilon_2 = 10^{10}$, максимальна кількість ітерацій 1000, кількість перевірок достовірності 10^7 , процес навчання задоволений 307 раз.

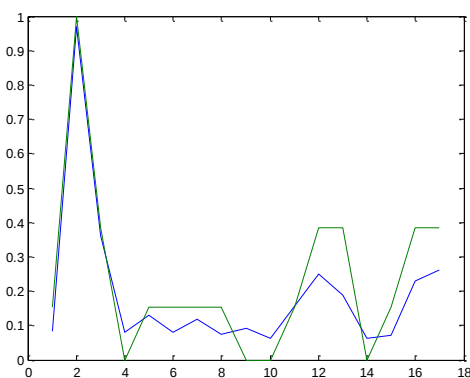
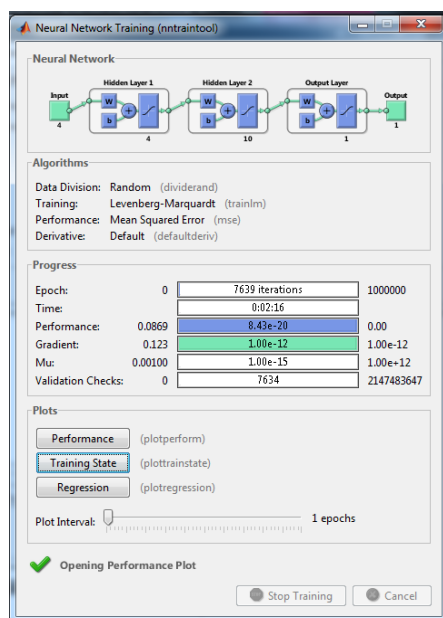


Рисунок 4 — Модель нейронної мережі $\varepsilon_1 = 10^{-12}$, $\varepsilon_2 = 10^{12}$, максимальна кількість ітерацій 106, кількість перевірок достовірності 10^{12} , процес навчання задоволений 7634 рази.

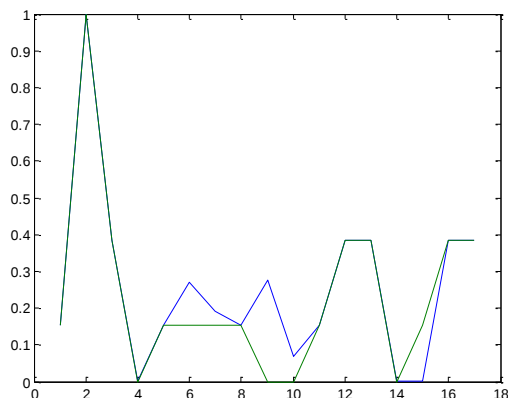
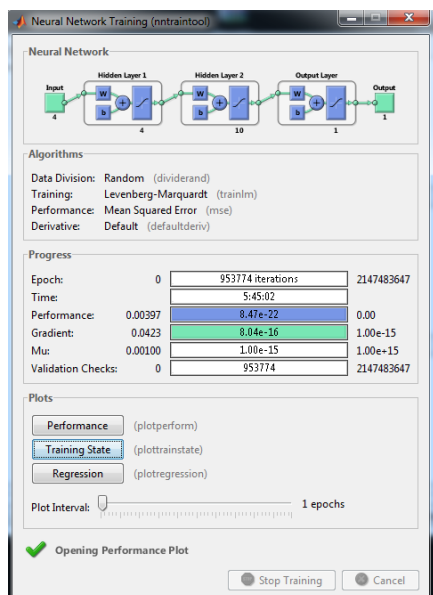


Рисунок 5 — Модель нейронної мережі $\varepsilon_1 = 10^{-15}$, $\varepsilon_2 = 10^{-15}$, максимальна кількість ітерацій 1016, кількість перевірок достовірності 10^{15} , процес навчання задоволений 953774 рази.

З рисунку 1 видно, що кількість ітерацій, виконаних в процесі навчання мала, тому що відбувається стрибок кривої в діапазоні значень, які не відповідають реальним даним. Це пов'язано з кількістю ітерацій і кількістю нейронів на кожному з рівнів. На рисунках 2 – 5 зі збільшенням кількості ітерацій при навчанні спостерігається збіг кривої прогнозованих значень і кривої навчальних значень. Таким чином, в подальшому потрібно провести оптимізацію моделі, вибрати оптимальну кількість нейронів на кожному шарі і ітерацій для точного прогнозування товщини льоду.

У таблиці 3 представлено максимальні значення товщини льоду в Азовському морі, які отримані за допомогою розробленої модель нейронної мережі з максимальним числом ітерацій 10^{16} , кількістю перевірок достовірності 10^{15} , процесом навчання, задоволеним 953774 рази.

Таблиця 3 – Максимальні значення товщини льоду в Азовському морі, які
спрогнозовані розробленою моделлю нейронної мережі

Дата	Реальна товщина льоду, см	Прогнозована товщина льоду розробленої нейронної мережі, см і похибка (%)
05.12.2014	5	4,9 (2%)
02.01.2015	5	4,95 (1%)
20.01.2015	10	9,98 (0,2%)
12.01.2016	10	9,9 (1%)
27.12.2016	10	10,2 (2%)
23.01.2017	10	9,84 (1,6%)
30.01.2017	15	14,63 (2,5%)
07.02.2017	15	14,58 (2,8%)
13.02.2017	30	28,75 (4,3%)

Як видно з розрахунків, прогнозована товщина льоду практично збігається з реальними статистичними значеннями, а похибка не перевищує 5%. Отже, розроблена модель нейронної мережі здатна прогнозувати з достатньою точністю товщину льоду.

Багатофакторний підхід для розрахунку льодових навантажень за допомогою нейронної мережі.

У цьому розділі пропонується метод підвищення якості прогнозу товщини льоду, а також точності розрахунку льодових навантажень, за допомогою введення в навчальну вибірку додаткових параметрів – зовнішніх факторів навколишнього середовища, що впливають на формування льодового покриття [449, 450].

За аналогією з концепцією розв’язання задачі прогнозування товщини льоду на базі використання нейронної мережі, запропонованої в роботі [447], перш за все, необхідно визначитися з оптимальною архітектурою мережі. В задачах прогнозування часових рядів використовуються багатошарові,

найчастіше тришарові, нейронні мережі прямого поширення [435, 442, 446]. Зовнішній вигляд такої мережі представлений на рисунку 6.

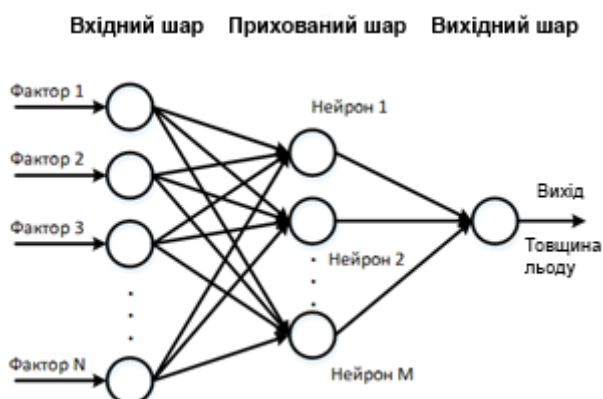


Рисунок 6 — Структура нейронної мережі для прогнозування товщини льодового покриття

В якості вхідних сигналів на вхід мережі подаються значення параметрів, що визначають чинники, які впливають на формування льоду. На виході мережі — прогноз значення шуканого параметра (товщина льоду). При цьому кількість входів мережі (кількість врахованих факторів), може варіюватися від 1 до деякого натурального числа N , а кількість нейронів M , розташованих в прихованому шарі, підлягає визначенню.

Математично постановка задачі може бути описана в наступному вигляді.

Нехай дана вибірка $\{x_i, y_i\}_{i=1}^n$, де x_i — вектор параметрів, що описує i -й прецедент, y_i — значення залежної змінної на i -м прецедент, n — кількість прецедентів. Потрібно побудувати нейронну мережу, що дозволяє отримати прогноз виду $\hat{y} = f(x)$. Для випадку багатofакторної залежності вхідні параметри можуть бути описані у вигляді матриці X , а необхідний прогноз у вигляді $\hat{Y} = f(X)$.

Статистичні дані про залежність товщини льодового покриття від зовнішніх чинників навколишнього середовища приведено в таблиці 4. Ці дані можуть бути використані для навчання нейронної мережі, а також для подальшої

перевірки точності оцінок вихідного параметра, одержуваних за допомогою мережі.

Таблиця 4 — Статистичні дані для навчання і перевірки мережі.

№	Швидкість вітру, м / с	Температура повітря, °С	Погодні умови, кодування WMO4501	Рівень моря, см	Товщина льоду, см
0	1	2	3	4	5
1	0	-4	1	135	0,5
2	2	-4	0	110	4
3	0	-6	0	90	7
4	7	-4	0	50	10
5	6	-8	2	50	12
6	6	-3	2	60	13
7	3	-2	6	85	14
8	2	-3	2	100	15
9	2	-7	2	130	16
10	0	-14	0	140	18
11	0	-13	0	140	17
12	3	-3	2	175	17
13	0	-13	0	175	18
14	0	-14	0	162	18
15	2	-11	0	155	19
16	2	-9	0	165	20
17	1	-14	0	146	21
18	5	-9	3	165	23
19	2	-12	1	175	23
20	7	-3	7	204	23
21	2	-13	0	145	23
22	5	-10	1	185	23
23	2	-2	2	162	25

Продовження таблиці 4

24	2	-1	2	160	27
25	1	0	1	172	29
26	2	3	2	170	29
27	2	2	6	165	30
28	2	2	4	175	25
29	0	1	4	175	24
30	2	2	0	175	21
31	2	4	2	168	19
32	2	3	2	172	17
33	0	2	2	165	16
34	4	1	4	135	15
35	1	2	2	158	13
36	4	-1	2	150	14
37	2	-2	2	165	14
38	0	-1	2	165	16
39	0	0	2	155	15
40	2	5	0	180	12
41	0	0	2	170	10
42	2	-6	7	110	3
43	2	0	2	160	4
44	3	-1	2	135	4

Розглянемо поетапно розв'язання задачі отримання оцінки товщини льодового покриття за допомогою нейронної мережі при багатofакторному підході.

У таблиці 4 такі параметри, як швидкість вітру, температура повітря, погодні умови, рівень води (чотири різних фактора, що описують стан навколишнього середовища) будуть використовуватися в якості значень елементів вхідного вектора x_i , що описує поточний i -й прецедент. Параметр товщини льоду буде використаний в якості значення залежної змінної y_i на i -м прецеденті.

Кількість входів мережі (визначається кількістю факторів, які були обрані з набору статистичних даних) $N_x = 4$. Кількість виходів мережі (відповідно до структури мережі є тільки один вихід — оцінка значення товщини льоду) $N_y = 1$. Число навчальних вибірок (визначається як 75-80% від загальної кількості статистичних даних) $Q = 35$.

Для даної задачі з урахуванням прийнятих значень параметрів мережі нерівність (4) набуде вигляду

$$5,71 \leq N_w \leq 59,5$$

При цьому, з урахуванням (1.6) можна записати

$$1,14 \leq N \leq 11,9$$

Для тих же значень параметрів нерівність (5) буде мати вигляд

$$-1,5 \leq N \leq 12,5$$

Використовуючи останні два нерівності і враховуючи той факт, що кількість нейронів має бути числом натуральним, можна записати умову вибору кількості нейронів на прихованому шарі у вигляді (14)

$$2 \leq N \leq 11 \quad (14)$$

Остаточно приймемо число нейронів прихованого шару $N = 7$.

Описані дії з розрахунку кількості нейронів прихованого шару можуть бути автоматизовані за допомогою Matlab-функції.

Отримана за допомогою функції `calc_N` кількість нейронів прихованого рівня використовується як третій параметр стандартної Matlab-функції `newfit`, що

використовується для створення та навчання нейронної мережі. У загальному вигляді прототип функції має вигляд

$$\text{net} = \text{newfit}(\text{P}, \text{T}, \text{S}),$$

де P — матриця, що містить значення вхідних параметрів; T — вектор виходів, відповідних вхідних вибірці; S — розмірність прихованого рівня, обчислена за допомогою функції calc_N ; net — ідентифікатор мережі.

Прогноз товщини льоду обчислюється за допомогою Matlab-функції

$$\text{Y0} = \text{sim}(\text{net}, \text{X0}),$$

де net — ідентифікатор мережі, отриманий за допомогою функції newfit ; X0 — тестова вибірка, матриця, яка містить набір значень параметрів з решти статистичних даних, які не використовувалися для навчання мережі; Y0 — вектор оцінок незалежної змінної – товщини льоду.

Описаний підхід може бути представлений у вигляді структурної схеми, зображеної на рисунку 7.



Рисунок 7 — Етапи побудови нейронної мережі

Побудована нейронна мережа дозволила отримати наступні оцінки товщини льодового покриття (таблиця 5) з урахуванням багатофакторного підходу.

На підставі даних, наведених у таблиці 5, запропонований багатofакторний підхід дозволяє отримати прогноз товщини льоду в заданому регіоні з відносною похибкою, що не перевищує 1,5%. Таким чином, багатofакторний підхід дозволяє підвищити точність прогнозу, однак вимагає великих обчислювальних потужностей і більше часу, який витрачається на навчання мережі.

Таблиця 5 — Результати моделювання нейронної мережі

№	Швидкість вітру, м/с	Температура повітря, °C	Погодні умови, кодування WMO4501	Рівень моря, см	Товщина льоду, см	Прогнозована товщина льоду розробленої нейронної мережі, см	Відносна похибка, %
1	4	-1	2	150	14	14,2	1,41
2	2	-2	2	165	14	14,1	0,71
3	0	-1	2	165	16	16,15	0,93
4	0	0	2	155	15	14,82	1,21
5	2	5	0	180	12	11,95	0,42
6	0	0	2	170	10	10,12	1,19
7	2	-6	7	110	3	3,01	0,33
8	2	0	2	160	4	3,99	0,25
9	3	-1	2	135	4	4,04	0,99

В Азово-Чорноморському басейні існують кілька видів льоду, які діють на платформи [451, 452, 453].

- Рівний лід
- Битий лід
- Стамухи
- Тороси
- Льодові поля

Згідно ISO-19906 [454] при розробці платформ повинні бути розглянуті наступні умови для однорічного льоду для Азово-Чорноморського басейну:

1. Квазі-статичний вплив через рівень льоду, при цьому інерційними ефектами можна знехтувати.

2. Динамічний вплив рівного льоду, де інерційні ефекти є важливими і необхідний динамічний аналіз.

3. Квазі-статичний вплив уламків льоду, при цьому інерційними ефектами можна знехтувати. Варіанти взаємодії уламків льоду з платформою представлені на рисунках 8 –11.

4. Дія крижаних островів.

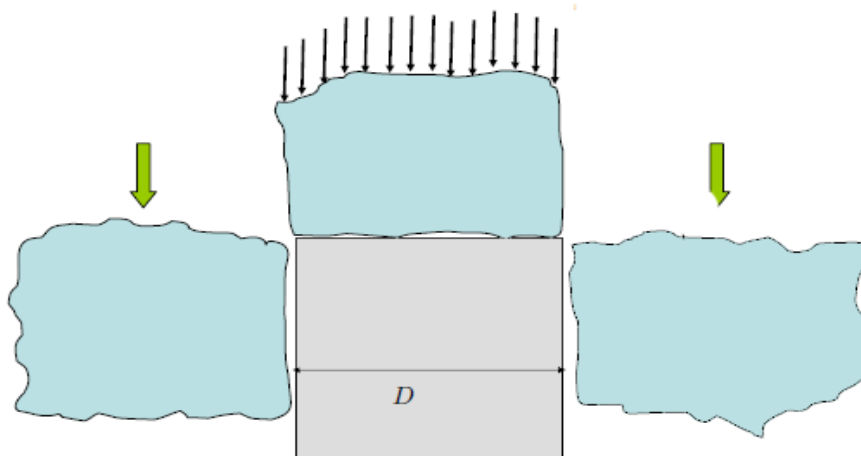


Рисунок 8 — Взаємодія великих шматків льоду з платформою

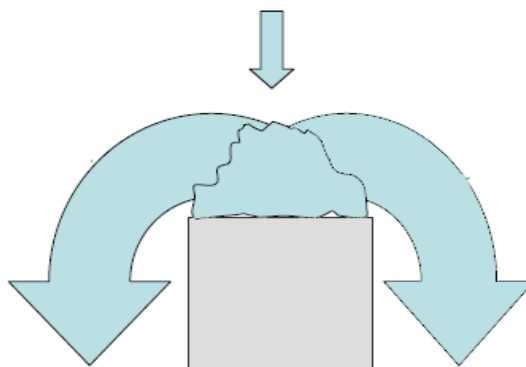


Рисунок 9 — Взаємодія дрібних шматків льоду з платформою

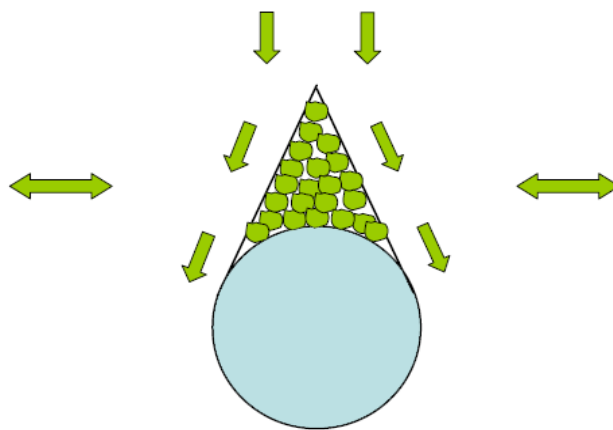


Рисунок 10 — Взаємодія дрібних шматків льоду з платформою в разі бокового тиску.

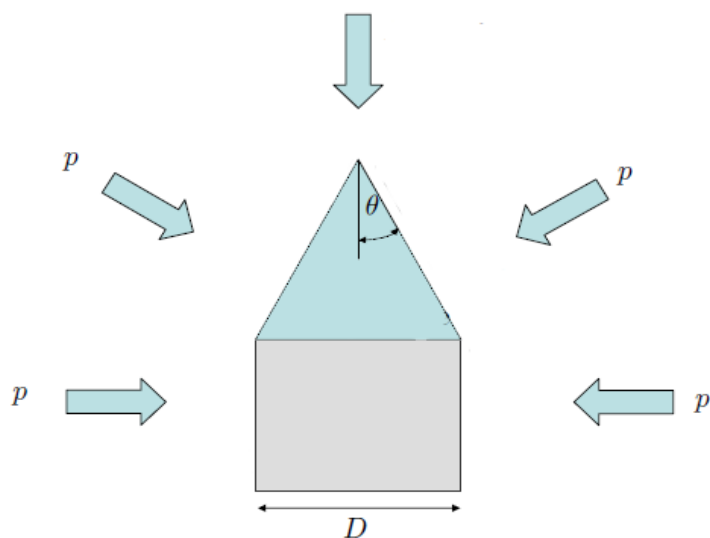


Рисунок 11 — Параметри льодового клину

Таким чином, на ранній стадії проектування потрібний множинний аналіз статичного навантаження в найбільш поширених льодових умовах для області, що цікавить.

Існує чотири різних режими взаємодії льодової структури згідно Løset та ін. [456]: граничне навантаження, максимальне напруження, граничний момент, і руйнування. Основним параметром є рівень льодових навантажень.

Розглянемо методики розрахунку льодових навантажень на бурові платформи з похилими гранями згідно ISO 19906, авторської методики Шхінека, APIRP 2N [457]. В основі цих методик лежать моделі і методи Croasdale і Ralston [458 – 462]. Важливим параметром в наведених методиках є товщина льоду. При цьому необхідно враховувати, що товщина льоду є змінною випадковою величиною.

Методика розрахунку льодового навантаження згідно ISO19906.

Модель, заснована на вигині пружної балки.

Відповідно до моделі, заснованої на вигині пружної балки, компонент утворення тріщин від вигинів може бути оцінений за допомогою розгляду льодового покриву як пружної балки на пружній основі. На додаток до моделі, описаної в роботах Croasdale можуть розглядатися тривимірні ефекти, а також наявність крижаних уламків на поверхні конструкції [463, 464].

Відповідно до цієї моделі [462] компонент горизонтального навантаження визначається як:

$$F_H = \frac{H_B + H_P + H_R + H_L + H_T}{1 - \frac{H_B}{\sigma_f l_c h}}, \quad (15)$$

де H_B — руйнівне навантаження;

H_P — компонент навантаження, необхідний, щоб проштовхнути льодовий протокол через крижані уламки;

H_R — навантаження, необхідне для проштовхування крижаних блоків вгору до укосу через крижані уламки;

H_L — навантаження, необхідне, щоб підняти льодовий валун наверх до льодового покриву, що наближається до того, як він зламається;

H_T — навантаження, необхідне, щоб посунути льодовий блок на вершину схилу.

$$H_B = 0.68\xi\sigma_f\left(\frac{\rho_wgh^5}{E}\right)^{0.25}\left(w + \frac{\pi L_c}{4}\right), \quad (16)$$

$$L_c = \left(\frac{Eh^3}{12\rho_wg(1-\nu^2)}\right)^{1/4}, \quad (17)$$

де $\xi = \frac{\sin\alpha + \mu\cos\alpha}{\cos\alpha - \mu\sin\alpha}$ — параметр, що відноситься до горизонтального та

вертикального компонентів впливу льоду;

α — кут нахилу поверхні конструкції щодо горизонталі, рад;

μ — коефіцієнт кінетичного тертя між льодом і поверхнею конструкції;

E — модуль пружності, ГПа;

ν — коефіцієнт Пуассона;

ρ_w — щільність води, кг/м³;

σ_f — міцність льоду при вигині, кПа;

h — товщина льоду, м;

L_c — характерна довжина крижаного покриття, м;

w — ширина нахилу конструкції, м.

Компонент навантаження H_p виражений як:

$$H_p = wh_r^2\mu_i\rho_i g(1-e)\left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\alpha}\right)^2 \frac{1}{2\tan\theta}, \quad (18)$$

де h_r — висота нагромадження, м;

μ_i — коефіцієнт тертя льоду по льоду;

θ — кут, утворений нагромадженням щодо горизонталі, рад;

e — коефіцієнт пористості уламків льоду;

ρ_i — щільність льоду, кг/м³.

Компонент навантаження H_R :

$$H_R = wP \frac{1}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha}, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{де } P = & 0,5\mu_i (\mu_i + \mu) \rho_i g (1-e) h_r^2 \sin \alpha \left(\frac{1}{\tan \theta} - \frac{1}{\tan \alpha} \right) \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right) + \\ & + 0,5(\mu_i + \mu) \rho_i g (1-e) h_r^2 \frac{\cos \alpha}{\tan \alpha} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right) + h_r h \rho_i g \frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{\mu \sin \alpha} \quad - \quad \text{опір} \end{aligned}$$

крижаного покриву;

Компонент навантаження H_L :

$$\begin{aligned} H_L = & 0,5wh_r^2 \rho_i g (1-e) \xi \left(\frac{1}{\tan \theta} - \frac{1}{\tan \alpha} \right) \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right) + \\ & + 0,5wh_r^2 \rho_i g (1-e) \xi \tan \phi \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right)^2 + \xi c wh_r \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right), \end{aligned} \quad (20)$$

де c — зчеплення крижаних уламків;

ϕ — внутрішній кут тертя крижаних уламків, рад.

Останній компонент H_T визначається як:

$$H_T = 1,5wh^2 \rho_i g \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha - \mu \cos \alpha}. \quad (21)$$

Рівняння (15) було змінено в порівнянні з вихідним рівнянням, запропонованим Croasdale, щоб врахувати напруження стискання в льоді як результат застосовуваного горизонтального навантаження, що враховується в знаменнику цього рівняння. Це враховується з використанням розрахункового значення горизонтального навантаження, таким чином, щоб змінити межу міцності на вигин в такий спосіб

$$\sigma_f^{(1)} = \frac{F_H}{l_c h} + \sigma_f, \quad (22)$$

де l_c — загальна довжина тріщини по колу, м, $l_c = w + \frac{\pi^2}{4} L_c$.

Метод, заснований на теорії пластичності для конусів.

Метод, описаний нижче, заснований на аналізі граничного стану для рівних льодів при взаємодії з висхідними і спадними конусоподібними криголамними конструкціями [465]. Модель розглядає навантаження, зумовлені утворення тріщин від вигинів льодового покриття і наповзання через велику кількість уламків льоду. Відхилення для висхідного криголаманного конуса, також підходить для низхідного криголаманного конуса, якщо ρ_i замінити на $\rho_w - \rho_i$.

Беручи товщину одиночного льодового покриття при наповзанні, горизонтальне навантаження наповзання H_R і вертикальне навантаження наповзання V_R можуть бути отримані за такими виразами:

$$H_R = W \frac{\tan \alpha + \mu E_2 - \mu f g_r \cos \alpha}{1 - \mu g_r}, \quad (23)$$

$$V_R = W \cos \alpha \left(\frac{\pi}{2} \cos \alpha - \mu \alpha - f h_v \right) + H_R h_v, \quad (24)$$

де $f = \sin \alpha + \mu E_1 \cos \alpha$ — геометричний параметр конічних конструкцій;

$$g_r = \frac{\sin \alpha + \frac{\alpha}{\cos \alpha}}{\frac{\pi}{2} \sin^2 \alpha + 2 \mu \alpha \cos \alpha} \quad \text{— геометричний параметр для конічних}$$

конструкцій;

$$h_v = \frac{f \cos \alpha - \mu E_2}{\frac{\pi}{4} \sin^2 \alpha + \mu \alpha \cos \alpha} \quad \text{— геометричний параметр для конічних}$$

конструкцій;

$$W = \rho_i g h_r \frac{w^2 - w_T^2}{4 \cos \alpha} \text{ — ваговий параметр уламків для конічної конструкції;}$$

w_T — верхній діаметр конуса, ;

h_r — товщина наповзання льоду($h_r > h$);;

α — кут нахилу конструкції, виміряний від горизонталі, рад;

μ — коефіцієнт кінетичного тертя між льодом і поверхнею конструкції;

ρ_i — щільність льоду, кг/м³.

Ефект накопичення крижаних уламків на конусі може бути розглянутий за допомогою значення, яке перевищує товщину одиночного льодового покриття на товщину наповзання. Параметр E_1 і E_2 є повними еліптичними інтегралами першого і другого роду, визначені як:

$$E_1 = \int_0^{\pi/2} (1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \eta)^{-1/2} d\eta, \quad (25)$$

$$E_2 = \int_0^{\pi/2} (1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \eta)^{1/2} d\eta, \quad (26)$$

де η — середньорічна частота зустрічі.

Горизонтальне зламувальне навантаження H_B і вертикальне зламувальне навантаження V_B дані як:

$$H_B = \frac{\sigma_f h^2}{3} \frac{\tan \alpha}{1 - \mu g_r} \left(\frac{1 + Yx \ln x}{x - 1} + G(x - 1)(x + 2) \right), \quad (27)$$

$$V_B = H_B h_v, \quad (28)$$

де $Y = 2,711$ для плинності Тріска, $Y = 3,422$ для плинності Йохансена;

$$G = \frac{\rho_i g w^2}{4\sigma_f h} \text{ — параметр в криголамній складовій впливів на конічні}$$

конструкції;

$$x = 1 + (3G + \frac{Y}{2})^{-1/2} \text{ — параметр в виразі льодових впливів на конічні}$$

конструкції.

Глобальні навантаження на конструкцію визначаються за формулами (29) та (30).

$$F_H = H_B + H_R, \quad (29)$$

$$F_v = V_B + V_R. \quad (30)$$

Методика розрахунку льодового навантаження за авторською методикою К.Н. Шхінека.

При взаємодії крижаного поля з платформами які мають похилі борта і зокрема, з платформами з конічними вставками, лід може ламатися від вигину або стиснення. Переваги цих споруд перед вертикальними реалізується в тих випадках, коли лід ламається від вигину. У деяких випадках, коли змерзання льоду з колонами, дуже великі швидкості руху льоду, велике скупчення уламків льоду на поверхні платформи і т.д., переваги платформ з похилими бортами перед спорудами з вертикальними можуть бути незначні. Тому при розрахунку споруд з похилими бортами повинні бути розглянуті різні несприятливі, але можливі ситуації (вмерзання в лід, великі швидкості руху льоду).

Залежно від відношення D/l_c [466],

$$l_c = [Eh^3 / (12\gamma_w(1-\nu)^2 \cdot 10^{-3})]^{0.25}, \quad (31)$$

де E — модуль пружності, ГПа;

ν — коефіцієнт Пуассона;

γ_w — питома вага води, кг/м³;

h — товщина льоду, м.

Усі платформи з похилими бортами ділять на широкі (першого типу) і вузькі (другого типу). Платформи з $D/l_c \geq 2,0$ відносять до першого типу, а з $D/l_c \leq 1,0$ до другого. Навантаження при $1,5 < D/l_c < 2$ визначаються лінійною інтерполяцією між навантаженнями, відповідними вказаним граничним значенням.

Горизонтальна і вертикальна складові навантаження від рівного і нашарованого льоду на похилий борт платформи (колони) першого типу, що звужується вгору, або широку вертикальну платформу з конічними вставками, або багатокутну в плані споруду в квазістатичному наближенні визначають за формулами [460]:

$$F_{xc} = (A_1 R_f h_1^2 + A_2 \gamma_w h_1 D^2 \cdot 10^{-3} + A_3 \gamma_w \cdot 10^{-3} h_r (D^2 - D_b^2)) A_4, \quad (32)$$

$$F_{zc} = B_1 F_{xc} + B_2 \gamma_w h_r (D^2 - D_b^2) \cdot 10^{-3}, \quad (33)$$

де $h_r = 2h_1$;

R_f — залишкова міцність льоду, МПа;

D_b — діаметр конуса на висоті $h_3 = \min(h_m, \Delta)$, м;

Δ — верхня відмітка конічної частини платформи (колони), м;

h_m — максимально можлива висота наповзання льоду на платформу, м, наближено рівна:

$$h_m = 3 + 4h. \quad (34)$$

При недостатній інформації щодо кута тертя уламків φ і пористості поля уламків p_r , допускається приймати $\varphi_1 = 25^\circ$, $p_r = 0,5$.

$A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, B_2$ — коефіцієнти, які приймаються за даними рисунках 12 і 13.

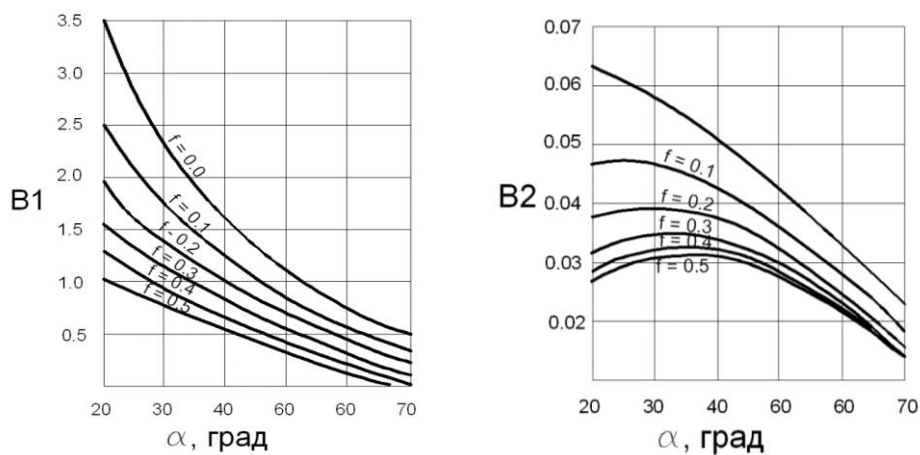


Рисунок 12 — Графіки для визначення коефіцієнтів B_1 і B_2

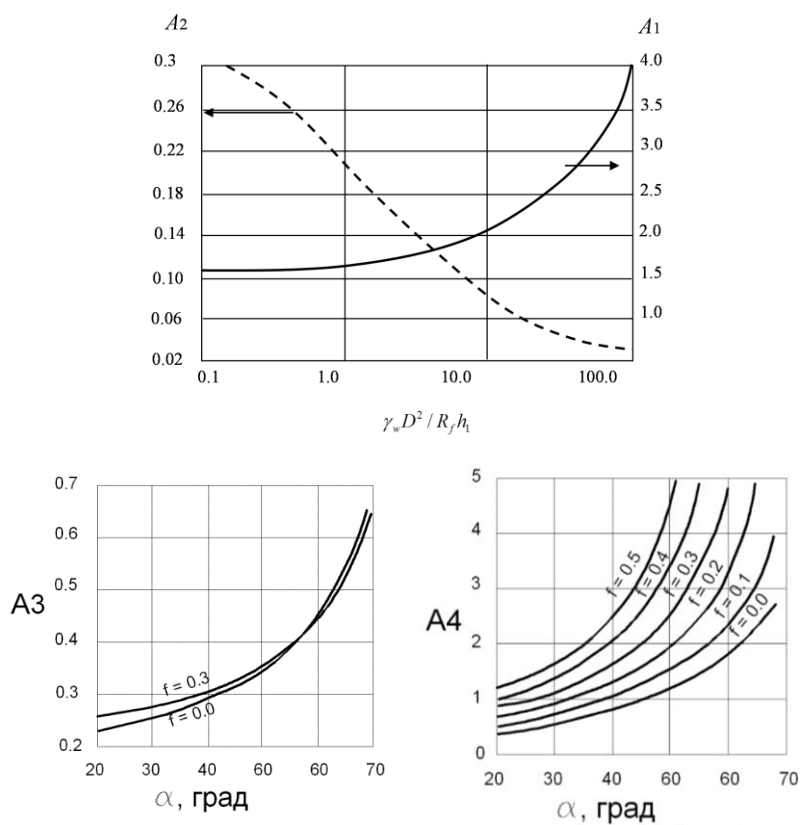


Рисунок 13 — Графіки для визначення коефіцієнтів A_1, A_2, A_3 і A_4

Методика розрахунку льодового навантаження згідно APIRP 2N.

При складанні комп'ютерних програм з обчислення навантажень на платформу з похилими бортами, що звужуються догори, більш доцільним є використання результатів наближеного аналітичного розв'язання, викладеного в нормах APIRP 2N [467]:

Горизонтальну F_{HH} і вертикальну F_{HV} компоненти навантаження від битого льоду, що знаходиться на похилій поверхні, слід визначати за формулами:

$$F_{HH} = W \frac{\operatorname{tg} \alpha + fE_2 - fc(\alpha)d(\alpha)\cos \alpha}{1 - fd(\alpha)}, \quad (35)$$

$$F_{HV} = W \cos \alpha \left(\frac{\pi}{2} \cos \alpha - f\alpha - C(\alpha)\varepsilon(\alpha) \right) + H_r \varepsilon(\alpha), \quad (36)$$

де функції $C(\alpha)$, $d(\alpha)$, $\varepsilon(\alpha)$, W рівні:

$C(\alpha) = \sin \alpha + E_1 f \cos \alpha$ — геометричний параметр для конічних конструкцій;

$$d(\alpha) = \frac{\sin \alpha + \alpha / \cos \alpha}{2 \left(\frac{\pi}{4} \sin^2 \alpha + \mu \alpha \cos \alpha \right)} \text{ — геометричний параметр для конічних}$$

конструкцій;

$$\varepsilon(\alpha) = \frac{C(\alpha) \cos \alpha - fE_2}{\frac{\pi}{4} \sin^2 \alpha + f\alpha \cos \alpha} \text{ — геометричний параметр для конічних}$$

конструкцій;

$$W = \frac{\gamma_0 h_1 (D^2 - D_1^2)}{\cos \alpha} \text{ — ваговий параметр уламків для конічної конструкції;}$$

α — кут нахилу конструкції, виміряний від горизонталі, град;

h_1 — розрахункова товщина рівного або нашарованого льоду, м;

D_1 — діаметр платформи на верхньому рівні дії уламків льоду, м;

D — поперечний розмір в районі дії льоду, м;

γ_{δ} — питома вага льоду, кг/м³;

f — коефіцієнт тертя льоду по платформі.

E_1 і E_2 — еліптичні інтеграли першого і другого роду, визначаються як:

$$E_1 = \int_0^{\pi/2} (1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \theta)^{-1/2} d\theta, \quad (37)$$

$$E_2 = \int_0^{\pi/2} (1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \theta)^{1/2} d\theta, \quad (38)$$

де θ — кут внутрішнього тертя уламків льоду на і біля платформи, рад.

Навантаження від наповзання льоду (F_{gH} , F_{gV}) визначають за формулами:

$$F_{gH} = \frac{R_f h_1^3}{3} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{1 - f d(\alpha)} \left[\frac{1 + 2.71x \log x}{x - 1} + G(x - 1)(x + 2) \right], \quad (39)$$

$$F_{gV} = \varepsilon(\alpha) F_{gH}, \quad (40)$$

де x — визначають за виразом:

$$x = 1 + (3G + 1.36)^{-1/2}; \quad (41)$$

$$G = \frac{\gamma_i D^2}{4R_f h_1}. \quad (42)$$

Сумарні горизонтальну і вертикальну складові навантаження визначають

як:

$$F_H = F_{HH} + F_{gH};$$

(43)

$$F_V = F_{HV} + F_{gV}.$$

Навантаження на конічний борт платформи (колони) першого типу, що розширюється догори, в квазістатичному наближенні визначають за формулами, замінюючи в них h_r на h_1 і γ_w на $((\gamma_w - \gamma_i) \cdot)$.

Період дії навантаження на платформу першого типу слід визначати за допомогою чисельного розв'язання. Наближено середній період визначають за формулою:

$$\tau = 5h_1 / V, \quad (44)$$

де V — швидкість дрейфу льоду, м/с.

Деякі вхідні параметри, необхідні для розрахунків, були визначені на основі довідкових і даних для проектування платформи [451]. У таблиці 6 представлені основні необхідні параметри, визначені користувачем, які є вихідними для запуску програми Matlab.

Величини позначені такими ж символами, як в програмі MATLAB.

Як приклад для розрахунків була обрана бурова платформа ЛСП-1 (рисунок 14), характеристики якої представлені в таблиці 6.

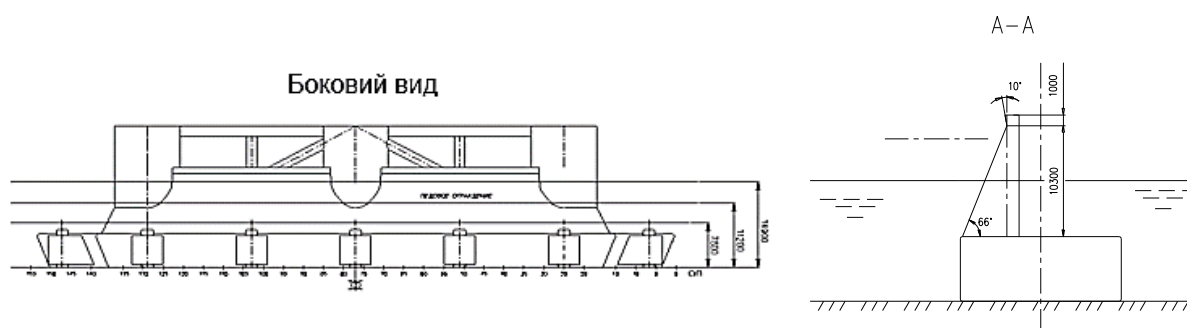


Рисунок 14 — Конструктивна схема льодової захисту на платформі ЛСП-1

Таблиця 6 — Дані для розрахунку льодових навантажень.

Параметри	Значення
Гравітаційна стала g , м/с ²	9,81
Щільність води ρ_w , кг/м ³	1025
Щільність повітря ρ_a , кг/м ³	1,225
Максимальна швидкість вітру V_w , м/с	26
Максимальна глибина постановки платформи d , м	12
Параметри льоду	
Коефіцієнт тертя μ	0,20
Щільність льоду ρ_i , кг/м ³	900
Міцність льоду на вигин σ_f , кПа	500
Модуль пружності E , ГПа	5
Коефіцієнт Пуассона ν	0,3
Товщина льоду h , м	1,0
Параметри платформи	
Ширина платформи	
бортом B_b , м	76,0
носом B_n , м	62,0
Кут нахилу грані α , град	66
Висота похилої частини t , м	8,2
Тороси	
глибина кіля h_k , м	3,75
Висота вітрила h_s , м	1,33
Ширина B_s , м	10
Товщина консолідованого шару h_c , м	0,9
Кут внутрішнього тертя кіля ω , град	30
Нашаруваний лід	
Товщина нашарованого льоду h_f , м	1,0
Коефіцієнт пористості e	0,3
Міцність на стиск нашарованого льоду R_c , МПа	1,8
Міцність на вигин нашарованого льоду R_f , МПа	0,5

Продовження таблиці 6.

Швидкість дрейфу льоду V , м/с	1,9
Льодові поля	
Довжина і ширина льодового поля L , м	2000
Товщина льодового поля h_n , м	0,3

Для максимально можливої товщини льоду 1,0 м були проведені розрахунки льодових навантажень за розглянутими вище методиками.

У всіх нормативних документах розглядають визначення льодових навантажень на споруду на основі статистичних даних про фізико-механічні властивості льоду, гідрометеорологічні та льодові умови в районі споруди в період часу з невеликими льодовими впливами [466]. Деякі методики визначення льодового навантаження мають рекомендаційний характер (APIRP 2N, ISO19906), інші методики носять регламентуючий характер (авторська методика К.Н. Шхінека). Часто при розрахунках не враховується реальна поведінка льодового покриття або завищуються коефіцієнти, що залежать від ставлення площі споруди, яка контактує з льодом і самого розміру льодового утворення. Так само недоліками є: до уваги не береться місце розташування споруди (геологія дна); наводиться методика розрахунку на одну опору споруди, для багатоопорної пропонується це навантаження множити на кількість опор, тоді, як поведінка льодового утворення з багатоопорною спорудою і вплив на неї буде іншим.

Результати розрахунків льодового навантаження від наповзання льоду за описаними методиками з використанням прогнозованих значень товщини льоду, які були отримані вище, представлені в таблицях 7 – 10.

Таблиця 7 — Льодові навантаження (горизонтальні) від наповзання льоду
(платформа бортом)

Товщина льоду, м	Льодове навантаження, МН			
	Авторська методика К.Н. Шхінека	API RP 2N	ISO19906 (вигин пружної балки)	ISO19906 (теорія пластичності)
0,0301	1,84	1,559	0,206	0,43
0,0399	2,43	2,078	0,295	0,577
0,0404	2,47	2,105	0,3	0,584
0,1012	6,2	5,537	1,05	1,606
0,1195	7,32	6,657	1,3337	1,937
0,1410	8,65	8,033	1,708	2,338
0,1420	8,71	8,098	1,726	2,357
0,1482	9,09	8,509	1,841	2,475
0,1615	9,92	9,41	2,102	2,732

Таблиця 8 — Льодові навантаження (вертикальні) від наповзання льоду
(платформа бортом)

Товщина льоду, м	Льодове навантаження, МН			
	Авторська методика К.Н. Шхінека	API RP 2N	ISO19906 (вигин пружної балки)	ISO19906 (теорія пластичності)
0,0301	0,738	0,29	0,059	0,154
0,0399	0,979	0,407	0,082	0,209
0,0404	0,992	0,407	0,083	0,212
0,1012	2,49	1,459	0,29	0,581
0,1195	2,94	1,975	0,37	0,7
0,1410	3,482	2,587	0,47	0,844
0,1420	3,504	2,587	0,48	0,851
0,1482	3,658	2,93	0,511	0,894
0,1615	3,989	3,31	0,582	0,986

Таблиця 9 — Льодові навантаження (горизонтальні) від наповзання льоду
(платформа носом)

Товщина льоду, м	Льодове навантаження, МН			
	Авторська методика К.М. Шхінека	API RP 2N	ISO19906 (вигин пружної балки)	ISO19906 (теорія пластичності)
0,0301	1,283	1,267	0,168	0,347
0,0399	1,702	1,689	0,242	0,47
0,0404	1,723	1,711	0,246	0,476
0,1012	4,337	4,495	0,86	1,312
0,1195	5,129	5,402	1,095	1,583
0,1410	6,062	6,515	1,4	1,912
0,1420	6,105	6,568	1,415	1,922
0,1482	6,375	6,9	1,509	2,025
0,1615	6,954	7,628	1,718	2,236

Таблиця 10 — Льодові навантаження (вертикальні) від наповзання льоду
(платформа носом)

Товщина льоду, м	Льодове навантаження, МН			
	Авторська методика К.М. Шхінека	API RP 2N	ISO19906 (вигин пружної балки)	ISO19906 (теорія пластичності)
0,0301	0,156	0,256	0,047	0,126
0,0399	0,685	0,357	0,067	0,17
0,0404	0,693	0,362	0,068	0,172
0,1012	1,746	1,276	0,238	0,474
0,1195	2,064	1,667	0,303	0,572
0,1410	2,44	2,223	0,387	0,69
0,1420	2,457	2,25	0,382	0,696
0,1482	2,566	2,429	0,418	0,731
0,1615	2,799	2,839	0,476	0,807

Порівняння отриманих результатів: в таблицях 11 – 14 наводиться порівняння навантажень від реальних товщин льоду з навантаженнями, отриманими із застосуванням прогнозованих товщини льоду.

Таблиця 11 — Порівняння значень льодових навантажень (горизонтальні, платформа носом) від реальної і прогнозованої товщини льоду

Авторська методика К.Н. Шхінека	API RP 2N	ISO19906 (вигин пружної балки)	ISO19906 (теорія пластичності)
0,312%	0,316%	0%	0,288%
-0,235%	-0,296%	0%	-0,213%
0,987%	0,994%	1,626%	1,050%
1,176%	1,290%	1,628%	1,372%
-0,429%	-0,463%	-0,639%	-0,505%
0,726%	0,814%	1,071%	0,785%
1,425%	1,614%	2,120%	1,301%
-1,224%	-1,406%	-1,789%	-1,383%
0,935%	1,088%	1,397%	0%

Таблиця 12 — Порівняння значень льодових навантажень (вертикальні, платформа носом) від реальної і прогнозованої товщини льоду

Авторська методика К.Н. Шхінека	API RP 2N	ISO19906 (вигин пружної балки)	ISO19906 (теорія пластичності)
3,205%	0,391%	2,128%	0,794%
-0,292%	-0,281%	0%	-0,588%
0,866%	1,107%	1,471%	0,581%
1,203%	1,842%	1,681%	1,266%
-0,436%	-0,990%	-0,660%	-0,524%
0,738%	1,260%	1,034%	0,725%
1,425%	2,467%	-0,262%	1,580%
-1,208%	-2,203%	-1,675%	-1,368%
0,929%	1,690%	1,471%	0%

Таблиця 13 — Порівняння значень льодових навантажень (вертикальні,
платформа бортом) від реальної і прогнозованої товщини льоду

Авторська методика К.Н. Шхінека	API RP 2N	ISO19906 (вигин пружної балки)	ISO19906 (теорія пластичності)
0,543%	0,385%	0,485%	1,395%
-0,453%	-0,241%	-0,678%	-0,173%
1,174%	1,045%	1%	1,027%
1,258%	1,463%	1,429%	1,308%
-0,478%	-0,255%	-1,072%	-0,516%
0,694%	1,083%	0,820%	0,813%
1,378%	1,877%	1,854%	1,612%
-1,298%	-1,128%	-2,064%	-1,414%
0,938%	1,392%	1,427%	1,061%

Таблиця 14 — Порівняння значень льодових навантажень (вертикальні,
платформа бортом) від реальної і прогнозованої товщини льоду

Авторська методика К.Н. Шхінека	API RP 2N	ISO19906 (вигин пружної балки)	ISO19906 (теорія пластичності)
0,271%	0,686%	3,390%	0%
-0,306%	0,123%	0%	0%
1,008%	1,572%	1,205%	1,415%
1,124%	2,960%	1,379%	1,377%
-0,612%	0,529%	-0,811%	-0,429%
0,804%	2,653%	0,213%	0,711%
1,427%	3,900%	2,292%	1,528%
-1,230%	-0,756%	-1,761%	-1,342%
0,928%	3,249%	1,375%	1,014%

Як видно з таблиць, розрахунок льодових навантажень з використанням прогнозованої товщини льоду дає досить точні значення льодових навантажень в порівнянні з навантаженнями, розрахованими з використанням реальної

товщину льоду. Похибка не перевищує 5%, що дозволяє в подальшому використовувати прогнозовані значення товщини льоду для розрахунку льодових навантажень.

Розглянемо загальні припущення, що враховуються при проектуванні платформ для родовищ Азовського моря:

1. Глибина моря в перспективних і діючих місцях видобутку вуглеводнів 8 – 12 м.
2. Цілорічний видобуток.
3. Верхній шар слабкого мулистого ґрунту становить: на західному узбережжі 4 – 5 м, середня частина моря – 7 м.
4. Екстремальна висота хвилі 3% забезпеченості, період повторюваності 1 раз в 100 років – 4,3 м.
5. Екстремальний прилив з наганянням 3,34 м.
6. Відсутність стійкого припая.
7. Товщина льоду в зимовий період. З огляду на максимальні значення товщини льоду, згідно льодових спостережень з грудня 2007 року по березень 2017 року (рисунок 15), була спрогнозована максимальна товщина льоду на наступний період із застосуванням нейронних мереж, яка становить 0,298 м.

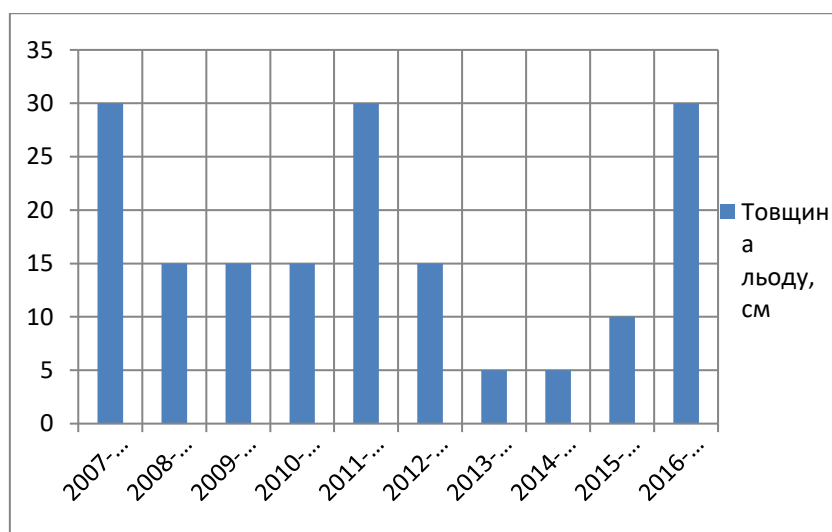


Рисунок 15 — Розподіл товщини льоду з грудня 2007 – 2017

***Аналіз і застосування зарубіжного досвіду створення та експлуатації
морських бурових установок в умовах мілководдя.***

Для розвідки і видобутку вуглеводневої сировини в умовах мілководдя зарубіжними нафтовими компаніями найчастіше використовувалися такі типи споруд [451]:

1. Грунтові острова.
2. Льодові острова.
3. Самопідйомні бурові платформи.
4. Льодостійкі стаціонарні бурові платформи.

Розглянемо можливість застосування цих типів споруд стосовно шельфу Азовського моря.

1. Грунтові острова. Основне навантаження, яке сприймається — льодове. Але власна вага ґрунтових островів значно впливає на основу цієї споруди. Це навантаження перевищує льодове практично в три рази. Основні аварії, пов'язані з ґрунтовими островами: руйнування і ерозія насипу острова. З огляду на слабкий і «повзучий» ґрунт Азовського моря, створення ґрунтового острова буде складним інженерним завданням, і матиме високі економічні витрати.

2. Льодові острова. Утворюються шляхом пошарового потовщення природного льодового покриву. Однак, створення таких платформ в Азовському морі неможливо через відсутність цілорічного льоду.

3. Самопідйомні плавучі бурові платформи. Для слабких ґрунтів використовують платформи з опорними матами. Використання СПБУ на глибинах до 30 м становить всього 2% від загального числа СПБУ, що показує що застосування цього типу платформ можливе, але недоцільне.

4. Льодостійкі стаціонарні платформи. З огляду на особливості слабого ґрунту даної ділянки, розглядаються стаціонарні платформи з пальовою основою. Особливий інтерес представляють льодостійкі гравітаційні платформи, здатні витримувати як вітрові, хвильові так і високі льодові навантаження. Залежно від глибини моря, можуть бути 4х типів: основою служить кесон;

412

Таблиця 15 — Дані для розрахунку льодових навантажень для Азово-Чорноморського басейну

Параметри	Значення
Гравітаційна стала g , м/с ²	9,81
Щільність води ρ_w , кг/м ³	1025
Щільність повітря ρ_a , кг/м ³	1,225
Максимальна швидкість вітру V_w , м/с	26
Максимальна глибина постановки платформи d , м	12
Параметри льоду	
Коефіцієнт тертя μ	0,20
Щільність льоду ρ_i , кг/м ³	900
Міцність льоду на вигин σ_f , кПа	500
Модуль пружності E , ГПа	5
Коефіцієнт Пуассона ν	0,3
Товщина льоду h , м	0,298
Параметри ЛСП-1	
Ширина платформи	
бортом B_b , м	70,0
носом B_n , м	63,0
Кут нахилу грані α , град	66
СМОЛП	
Ширина платформи на рівні 8 м, м	43
Ширина на рівні 12 м, м	41,8
Кут нахилу грані α , град	56,3

Для розрахунку льодових навантажень використовуємо формули (15) – (44) для бурових платформ з похилою основою. Отримані навантаження наведено в таблицях 16 – 18.

Таблиця 16 — Горизонтальна льодове навантаження на ЛСП-1 при товщині
льоду 0,298 м. Постановка платформи бортом

	ISO 19906		Методика К.Н. Шхінека
	Теорія пластичності	Вигин пружної балки	
Глибина постановки 8 м, кут нахилу грані до горизонту $\beta = 66^\circ$			
Горизонт.	6,39 МН	4,65 МН	16,1 МН
Глибина постановки 10 м, кут нахилу грані до горизонту $\beta = 66^\circ$			
Горизонт.	8,95 МН	7,33 МН	18,24 МН
Глибина постановки 12 м, кут нахилу грані до горизонту $\beta = 66^\circ$			
Горизонт.	11,57 МН	10,84 МН	19,44 МН

Таблиця 17 — Горизонтальна льодове навантаження на ЛСП-1 при товщині
льоду 0,298 м. Постановка платформи носом

	ISO 19906		Методика К.Н. Шхінека
	Теорія пластичності	Вигин пружної балки	
Глибина постановки 8 м, кут нахилу грані до горизонту $\beta = 66^\circ$			
Горизонт.	4,67 МН	3,77 МН	12,36 МН
Глибина постановки 10 м, кут нахилу грані до горизонту $\beta = 66^\circ$			
Горизонт.	6,32 МН	5,04 МН	13,46 МН
Глибина постановки 12 м, кут нахилу грані до горизонту $\beta = 66^\circ$			
Горизонт.	9,14 МН	8,67 МН	16,02 МН

Таблиця 18 — Горизонтальна льодове навантаження на СМОЛП при товщині
льоду 0,298 м

Глибина моря	ISO 19906		Методика К.Н. Шхінека
	Теорія пластичності	Вигин пружною балки	
8 м, 10 м*	17,74 МН		31,18 МН
12 м	9,05 МН	5 МН	22,47 МН

Згідно ПРМРС величина льодового пояса обчислюється за формулою:

$$l = \Delta_{100} + 2\alpha_1 h_{c100}, \quad (45)$$

де Δ_{100} — максимальний розмах зміни рівня моря щодо середнього рівня, м, можливий 1 раз в 100 років; α_1 — коефіцієнт запасу $\alpha_1 = 1,1$; $h_{c100} = 1,0$ м — товщина консолідованого шару тороса, можлива 1 раз в 100 років (за відсутності торосів товщина рівного або нашарованого льоду), м.

$$l = 3,34 + 2 \cdot 1,1 \cdot 1 = 5,54 \text{ м.}$$

Льодове навантаження прикладене до кожної з платформ на рівнях 12 м, 10 м и 8 м у вигляді горизонтальної та вертикальної погонного навантаження, кН/м. Вертикальна складова глобальної льодового навантаження від рівного або нашарованого льоду на опору конічної форми визначається за формулою:

$$F_{\text{верт}} = \frac{F_{\text{гор}}}{\text{tg}(\beta + \text{arctg} f)}. \quad (46)$$

З огляду на довжини розподілу навантажень на рівнях кожної з платформ, отримаємо:

- для горизонтальних погонних навантажень:

$$g_{\text{гор}} = \frac{F_{\text{гор}}}{L}; \quad (47)$$

- для вертикальних погонних навантажень:

$$g_{\text{верт}} = \frac{F_{\text{верт}}}{L}, \quad (48)$$

L — довжина льодової огорожі, яка сприймає навантаження уздовж ДП установки і поперек ДП установки.

В таблицях 19 та 20 наведені результати розрахунку льодових навантажень.

Таблиця 19 — Розрахунок величин погонних навантажень для ЛСП-1

	Борт			Ніс		
Рівень прикладання, м	12	10	8	12	10	8
$F_{\text{гор}}, \text{кН}$	19440	19440	19440	16020	16020	16020
$F_{\text{верт}}, \text{кН}$	7092	7092	7092	6343	6343	6343
$L, \text{м}$	69	71	73	58	59,5	61
$g_{\text{гор}}, \text{кН/м}$	281,74	273,80	266,30	276,21	269,24	262,62
$g_{\text{верт}}, \text{кН/м}$	102,78	99,89	97,15	109,36	106,61	103,98

Таблиця 20 — Розрахунок величин погонних навантажень для СМОЛП

Рівень прикладання, м	12	8; 10
$F_{\text{гор}}, \text{кН}$	22470	31180
$F_{\text{верт}}, \text{кН}$	9160	9160
$L, \text{м}$	41,6	43
$g_{\text{гор}}, \text{кН/м}$	540,1	725,1
$g_{\text{верт}}, \text{кН/м}$	220,2	213,0

Виходячи з обчислених навантажень, можна зробити висновок, що прототип ЛСП-1 піддається меншим льодовим навантаженням, ніж прототип

СМОЛП. Для подальшого розглядання та надання рекомендацій при проектуванні будемо розглядати льодостіку платформу типу ЛСП-1.

Вибір оптимальних конструктивних параметрів льодостійкої стаціонарної платформи для Азовського моря на початкових стадіях проектування.

У роботі [468, 469] для умов Азовського моря визначено критерій оптимізації конструктивних параметрів, який передбачає рівність льодового і вітро-хвильового навантажень і показана можливість вибору оптимальних конструктивних параметрів платформ такого типу. Розглянемо запропоновану методику для розглянутої платформи типу ЛСП-1.

Отримані оцінки і співвідношення дозволяють в загальному вигляді обчислити залежності максимальних величин льодового і вітро-хвильового навантажень на ЛСП в залежності від кута нахилу грані до горизонту β . Перетин цих залежностей відповідає оптимальній величині конусного розширення опори ЛСП. Нижче наведені апроксимаційні співвідношення для таких розрахунків.

$$\begin{aligned} P_{\text{л}} &= (2 \cdot 10^{-5} D_{\text{л}} + 0,0006) \beta^2 + (0,001 D_{\text{л}} + 0,0293) \beta + (0,0002 D_{\text{л}}^2 - \\ &- 0,0144 D_{\text{л}} + 0,0488), \\ D_{\text{л}} &= D_1 + \Delta / \operatorname{tg} \beta, \\ P_{\text{в}} &= 0,3796 D_{\text{е}} + 1,4247. \end{aligned} \quad (49)$$

$$\text{де } D_{\text{е}} = \frac{D_1 \Delta}{H} + D_2 \left(\frac{H - \Delta}{H} \right) + \frac{2 \Delta^2}{H \operatorname{tg} \beta} \text{ — еквівалентний діаметр опори з}$$

конусним розширенням, $D_2 = D_1 + \frac{2 \Delta}{\operatorname{tg} \beta}$;

D_1 — діаметр опори без конусної частини, м;

$D_{\text{л}} = \frac{D_1 + D_2}{2}$ — діаметр опори в місці впливу льоду, м;

Δ — висота опори, м;

H — глибина моря в місці установки платформи, м;

β — кут нахилу твірної конуса до горизонталі, град.

Для визначення висоти опор, обчислимо кліренс БП на основі декількох різних критеріїв:

$$1. H_{1k} = H_n + \eta + 0,1h_{\max}, \quad (50)$$

де η — висота гребня найбільшої хвилі, тобто хвилі 0,1% забезпеченості

$$\eta = \bar{h} \left[\frac{4}{\pi} \left(\ln \frac{100}{n} \right) \left(1 + \frac{h^*}{\sqrt{2\pi}} \right) \right]^{0,5(1-h^*)}, \quad (51)$$

де $h^* = \frac{\bar{h}}{H}$, n — забезпечення (%);

H — глибина моря, м;

H_n — максимальна величина нагона, можлива один раз в 100 років, м;

$h_{\max}$ — максимальна висота хвилі, для розглянутого району, м;

$\bar{h}$ — середня висота хвилі, м.

$$2. H_{2k} = \Delta_{100} + 1,2 \left(\frac{D}{\lambda_{100}} \right)^{0,25} \cdot h_{100} + 1,5, \quad (52)$$

де Δ_{100} — максимальна амплітуда зміни рівня моря, можлива 1 раз в 100 років, м;

h_{100} , λ_{100} — максимальна висота і довжина хвилі, можлива один раз в 100 років, ($\lambda_{100} = 43$ м), м;

D — діаметр опори, м.

$$3. H_{3k} = 4h_{\max} + \Delta_{100} + 0,5, \quad (53)$$

де $h_{\max}$ — товщина нашарованого льоду, можлива один раз в 100 років.

Глибина постановки 8 м:

$$1. H_{1k} = H_n + \eta + 0,1h_{\max}.$$

$$h^* = \frac{\bar{h}}{H} = \frac{1,5}{8} = 0,19;$$

$$\eta = \bar{h} \left[\frac{4}{\pi} \left(\ln \frac{100}{n} \right) \left(1 + \frac{h^*}{\sqrt{2\pi}} \right) \right]^{0,5(1-h^*)} = 1,5 \left[\frac{4}{3,14} \left(\ln \frac{100}{0,1} \right) \left(1 + \frac{0,19}{\sqrt{2 \cdot 3,14}} \right) \right]^{0,5(1-0,19)} =$$

$$= 3,75;$$

$$H_{1k} = 2 + 3,75 + 0,1 \cdot 3 = 6,05 \text{ м};$$

$$2. H_{2k} = \Delta_{100} + 1,2 \left(\frac{D}{\lambda_{100}} \right)^{0,25} \cdot h_{100} + 1,5.$$

$$H_{2k} = \Delta_{100} + 1,2 \left(\frac{D}{\lambda_{100}} \right)^{0,25} \cdot h_{100} + 1,5 = 1 + 1,2 \left(\frac{76,74}{43} \right)^{0,25} \cdot 3 + 1,5 = 7 \text{ м};$$

$$3. H_{3k} = 4h_{\max} + \Delta_{100} + 0,5.$$

$$H_{3k} = 4 \cdot 0,298 + 1 + 0,5 = 2,69 \text{ м}.$$

Глибина постановки 10 м:

$$1. H_{1k} = H_n + \eta + 0,1h_{\max}.$$

$$h^* = \frac{\bar{h}}{H} = \frac{1,5}{10} = 0,15;$$

$$\eta = \bar{h} \left[\frac{4}{\pi} \left(\ln \frac{100}{n} \right) \left(1 + \frac{h^*}{\sqrt{2\pi}} \right) \right]^{0,5(1-h^*)} = 1,5 \left[\frac{4}{3,14} \left(\ln \frac{100}{0,1} \right) \left(1 + \frac{0,15}{\sqrt{2 \cdot 3,14}} \right) \right]^{0,5(1-0,15)} =$$

$$= 3,92;$$

$$H_{1k} = 2 + 3,92 + 0,1 \cdot 3 = 6,22 \text{ м};$$

$$2. H_{2k} = \Delta_{100} + 1,2 \left(\frac{D}{\lambda_{100}} \right)^{0,25} \cdot h_{100} + 1,5.$$

$$H_{2k} = \Delta_{100} + 1,2 \left(\frac{D}{\lambda_{100}} \right)^{0,25} \cdot h_{100} + 1,5 = 1 + 1,2 \left(\frac{76,74}{43} \right)^{0,25} \cdot 3 + 1,5 = 7 \text{ м};$$

$$3. H_{3k} = 4h_{\max} + \Delta_{100} + 0,5.$$

$$H_{3k} = 4 \cdot 0,298 + 1 + 0,5 = 2,69 \text{ м.}$$

Глибина постановки 12 м:

$$1. H_{1k} = H_n + \eta + 0,1h_{\max}.$$

$$h^* = \frac{\bar{h}}{H} = \frac{1,5}{12} = 0,125;$$

$$\eta = \bar{h} \left[\frac{4}{\pi} \left(\ln \frac{100}{n} \right) \left(1 + \frac{h^*}{\sqrt{2\pi}} \right) \right]^{0,5(1-h^*)} = 1,5 \left[\frac{4}{3,14} \left(\ln \frac{100}{0,1} \right) \left(1 + \frac{0,125}{\sqrt{2 \cdot 3,14}} \right) \right]^{0,5(1-0,125)} =$$

$$= 3,96;$$

$$H_{1k} = 2 + 3,96 + 0,1 \cdot 3 = 6,26 \text{ м.}$$

$$2. H_{2k} = \Delta_{100} + 1,2 \left(\frac{D}{\lambda_{100}} \right)^{0,25} \cdot h_{100} + 1,5.$$

$$H_{2k} = \Delta_{100} + 1,2 \left(\frac{D}{\lambda_{100}} \right)^{0,25} \cdot h_{100} + 1,5 = 1 + 1,2 \left(\frac{76,74}{43} \right)^{0,25} \cdot 3 + 1,5 = 7 \text{ м;}$$

$$3. H_{3k} = 4h_{\max} + \Delta_{100} + 0,5.$$

$$H_{3k} = 4 \cdot 0,298 + 1 + 0,5 = 2,69 \text{ м.}$$

Таким чином, кліренс споруди типу ЛСП-1 для розглянутих умов дорівнює 7,0 м.

Отримані оцінки і співвідношення (49) дозволяють в загальному вигляді обчислити залежності максимальних величин льодового і вітро-хвильового навантажень на споруди типу ЛСП-1 в залежності від кута β . У таблицях 21, 22 представлені розрахунки льодових навантажень для споруди типу ЛСП-1 для різних глибин постановки з урахуванням отриманого кута β .

Таблиця 21 — Розрахунок льодових навантажень на споруди типу ЛСП-1 для різних глибин постановки, з урахуванням розрахованих кута β . Постановка споруди типу ЛСП-1 боком

Напрямок дії навантаження	ISO 19906 (теорія пластичності)	ISO 19906 (вигин пружної балки)	Авторська методика К.Н. Шхінека
Глибина постановки 8 м, кут нахилу грані до горизонту $\beta = 75,4^\circ$			
Горизонт.	3,97	2,94	11,58

Продовження таблиці 21.

Верт.	3,2	1,69	4,03
Глибина постановки 10 м, кут нахилу грані до горизонту $\beta = 76,3^\circ$			
Горизонт.	6,18	4,90	13,67
Верт.	3,62	2,05	4,74
Глибина постановки 12 м, кут нахилу грані до горизонту $\beta = 77^\circ$			
Горизонт.	10,69	10,47	13,82
Верт.	4,79	3,09	3,55

Таблиця 22 — Розрахунок льодових навантажень на споруди типу ЛСП-1 для різних глибин постановки, з урахуванням розрахованих кута β . Постановка споруди типу ЛСП-1 носом.

Напрямок дії навантаження	ISO 19906 (теорія пластичності)	ISO 19906 (вигин пружної балки)	Авторська методика К.Н. Шхінека
Глибина постановки 8 м, кут нахилу грані до горизонту $\beta = 75,4^\circ$			
Горизонт.	3,32	2,45	8,27
Верт.	2,7	1,48	2,12
Глибина постановки 10 м, кут нахилу грані до горизонту $\beta = 76,3^\circ$			
Горизонт.	5,1	4,06	8,83
Верт.	3,01	1,69	2,26
Глибина постановки 12 м, кут нахилу грані до горизонту $\beta = 77^\circ$			
Горизонт.	9,69	8,61	11,21
Верт.	3,98	2,54	2,88

У таблиці 23 представлені розрахунки погонних навантажень для отриманих значень навантажень з урахуванням кута нахилу утворюючої до горизонту β .

Таблиця 23 — Розрахунок величин погонних навантажень для споруди типу ЛСП-1

	Борт			Ніс		
Рівень прикладання, м	12	10	8	12	10	8
$F_{гор}$, кН	13820	13820	13820	11210	11210	11210
$F_{верт}$, кН	4740	4740	4740	2880	2880	2880
L , м	72,26	74,2	76,24	59,06	61	63,04
$g_{гор}$, кН/м	191,25	186,25	181,26	189,81	183,77	177,82
$g_{верт}$, кН/м	65,60	63,88	62,17	48,76	47,21	45,69

Порівнявши значення навантажень на конструкцію типу ЛСП-1 в таблицях 16, 17, 19, 21, 22 і 23 відповідно, можна зробити висновок, що вибраний кут нахилу твірної опори до горизонту дозволяє зменшити льодове навантаження.

З урахуванням обраного кута нахилу твірної опори до горизонту та визначених льодових та вітро-хвильових навантажень, визначимо нову товщину зовнішньої обшивки опорних колон в районі діючої ватерлінії.

Рівень напруження в одній колоні з товщиною зовнішньої обшивки $s16$ мм до визначення нового кута нахилу твірної опори до горизонту згідно з [470] становила:

$$\sigma = \left(\frac{P_{в.к.}}{6} + F_{гор} + F_{верт} + F_{вітро-хв} \right) \cdot \frac{1}{\pi D s},$$

де $P_{в.к.} = 10,1$ МН — вага верхнього корпусу ЛСП-1;

$F_{гор}, F_{верт}$ — льодове навантаження, МН;

$F_{вітро-хв}$ — вітро-хвильове навантаження, МН;

$D = 9,8$ — діаметр колони, м;

$s = 0,016$ — товщиною зовнішньої обшивки колони, м.

$$\sigma = \left(\frac{10,1}{6} + 19,44 + 7,09 + 10,5 \right) \cdot \frac{1}{3,14 \cdot 9,8 \cdot 0,016} = 78 \text{ МН/м}^2.$$

Приймаючи, що розрахунковий рівень напруження в одній колоні буде постійним, то визначим товщину зовнішньої обшивки колони після зміни кута нахилу твірної опори до горизонту:

$$s_{нов} = \frac{\left(\frac{P_{в.к.}}{6} + F_{гор} + F_{верт} + F_{вітро-хв} \right)}{\pi D \sigma} = \frac{23,5}{3,14 \cdot 9,8 \cdot 78,6} = 0,010 \text{ м.}$$

Для оцінки металоємності порівняємо вагу шістьох колон до і після зміни кута нахилу твірної опори до горизонту:

$$1) s = 0,016 \text{ м, } P = 6\pi D s \gamma l = 6 \cdot 3,14 \cdot 9,8 \cdot 0,016 \cdot 78,5 \cdot 18,5 = 4290 \text{ т;}$$

$$2) s = 0,010 \text{ м, } P = 6\pi D s \gamma l = 6 \cdot 3,14 \cdot 9,8 \cdot 0,010 \cdot 78,5 \cdot 18,5 = 2681 \text{ т;}$$

$\gamma = 78,5$ — щільність сталі, т/м³;

$l = 18,5$ — довжина однієї колони, м.

Таким чином, зміна кута нахилу твірної опори до горизонту та зменшення навантажень на ЛСП-1, дозволяє зменшити товщину зовнішньої обшивки опорних колон і їх вагу на 1579 т, що значно змінить вартість майбутньої платформи.