

С.І. РОГАЧКО

**ЛЬОДОВІ НАВАНТАЖЕННЯ ТА
ВПЛИВИ НА ГІДРОТЕХНІЧНІ СПОРУДИ**



Одеса 2025

УДК 627.51

Р59 С.І. Рогачко. Льодові навантаження і впливи на гідротехнічні споруди - Одеса: Одеський національний морський університет 2025 р. - 208с.

У підручнику розглянуто типи льодових утворень на річках, озерах, водосховищах і морях, що становлять найбільшу небезпеку для проєктованих гідротехнічних споруд різного призначення та опор мостів, а також методи досліджень їхніх фізико-механічних характеристик.

Особливу увагу приділено розробленню методів розрахунку льодових навантажень від дрейфуючих крижаних полів, торосів та локального льодового тиску. Підручник призначений для студентів гідротехнічних факультетів ВНЗ, а також для аспірантів, які досліджують льодові навантаження на різні типи морських та річкових гідротехнічних споруд.

Рецензенти:

Гришин А.В., професор кафедри Машинознавства й прикладної механіки Одеського національного морського університету, професор, д.т.н.

Волк П.П., доктор технічних наук, професор, Національний університет водного господарства та природокористування.

УДК 627.51Р59

ISBN 978-617-7195-38-1

Рогачко С.І., 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. ОСОБЛИВОСТІ УТВОРЕННЯ ЛЬОДУ НА ПРІСНОВОДНИХ І МОРСЬКИХ АКВАТОРІЯХ	8
1.1. Річковий лід.....	9
1.2. Морський лід.....	15
2. ОСНОВНІ ТИПИ ЛЬODOВИХ УТВО-РЕНЬ	24
2.1. Обмерзання.....	24
2.2. Рівні крижані поля.....	34
2.3. Тороси.....	37
2.4. Айсберги.....	42
3. ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИ-СТИКИ ЛЬODOВИХ УТВОРЕНЬ	48
3.1. Крижані поля.....	48
3.1.1. Будова льоду.....	48
3.1.2. Солоність льоду.....	62
3.1.3. Пористість та щільність льоду.....	64
3.1.4. Температура льоду.....	67
3.1.5. Міцнісні властивості льоду.....	70
3.1.6. Метричні характеристики рівних крижаних полів.....	78
3.2. Торосисті утворення.....	82
3.2.1. Метричні характеристики торосів.....	83

3.2.2. Інтегральна міцність торосистих утворень.....	91
3.2.3. Дослідження властивостей міцності зразків льоду з різною пористістю в лабораторних умовах.....	95
3.2.4. Дослідження міцнісних властивостей консолідованої частини моделей торосів в натурних умовах.....	96
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛЬДОВИХ ВПЛИВІВ.....	102
4.1. Лабораторні дослідження.....	103
4.2. Великомасштабні експериментальні дослідження силового впливу крижаних полів і полів торошіння.....	107
4.2.1. Метод створення поля торошіння.....	108
4.2.2. Методика проведення великомасштабних них дослідів.....	113
4.3. Експериментальні дослідження локального льодового тиску.....	118
4.3.1. Методика проведення дослідів.....	118
5. МЕТОДИ РОЗРАХУНКІВ ЛЬДОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	123
5.1. Навантаження від обмерзання.....	123
5.1.1. Навантаження від атмосферного обмерзання.....	123
5.1.2. Навантаження від бризгового обмерзання.....	128
5.2. Льодові навантаження від рівних крижаних полів.....	135
5.2.1. Визначення розрахункових значень	

характеристик міцності крижаних полів136
5.2.2. Льодові навантаження на споруди з вертикальною передньою гранню.....	...141
5.2.3. Льодові навантаження на споруди конічної форми та з похилою лицьовою поверхнею.....	...148
5.2.4. Льодові навантаження від суцільного кри жаного покриву при його температурному розширенні.....	...154
5.3 Методи розрахунку льодових навантажень від то росистих утворень.....	...158
5.4. Метод розрахунку локального льодового тиску. ...	167
5.5. Врахування стираючого впливу дрейфуючих льодових утворень.....	...171
5.6. Призначення відмітки низу верхньої будови морських нафтогазопромислових гідротехнічних нічних споруд176
5.7. Захист підводних комунікацій від силового го впливу кільової частини торосів180
5.8. Конструктивні елементи для зниження льодо- вих навантажень на гідротехнічні споруди. льодових навантажень на гідротехнічні споруди187
ВИСНОВОК.....	...192
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	...194

ВСТУП

Основоположником вчення про всі види льодів на нашій планеті є видатний російський учений М.В. Ломоносов, який у своїх працях заклав основи льодознавства. Ця наука складається з двох основних розділів - льодознавства водойм і льодознавства материків. У першому з них вивчається виникнення, розвиток, руйнування і зникнення морських, озерних і річкових льодів. Другий розділ представляє гляціологія, присвячена історичному заледенінню та мерзлотознавству.

Льодотехніка, як наука, впливає з льодознавства і пов'язана безпосередньо з практичною діяльністю людини щодо використання льоду і крижаних покривів, захисту інженерних споруд і плавучих об'єктів від силового впливу льодових утворень, будівництва з льоду, плавання в кризі, прогнозування льодових ситуацій. Дослідженнями властивостей льоду і розробками методів боротьби з льодовими утвореннями займалися такі видатні російські вчені, як Д.І. Менделєєв, адмірала С.О. Макаров О.В., Колчак, академік О.М. Крилов.

Гідротехнічні споруди, що зводяться на річках і морях, у процесі їх експлуатації піддаються силовому впливу

різних типів льодових утворень. Достовірне визначення льодових навантажень на проєктовані гідротехнічні споруди з урахуванням різних розрахункових сценаріїв зумовлює їхню безаварійну роботу протягом усього терміну служби. Величина і характер льодових навантажень на гідротехнічні споруди залежать від типів льодових утворень, їхніх розмірів і характеристик міцності. З позицій річкового гідротехнічного будівництва найбільший практичний інтерес представляє прісний лід, що формується на річках, лиманах і озерах, а для морської гідротехніки, що включає будівництво морських портів і споруд на континентальному шельфі - морський лід бухт, заток, проток та морів.

Мета цього підручника полягає в тому, щоб більш детально ознайомити майбутніх фахівців у галузі гідротехнічного будівництва з різними типами льодових утворень, їхніми метричними і міцнісними характеристиками, а також з існуючими відомими методами розрахунку льодових навантажень на річкові та морські гідротехнічні споруди, включно з опорами мостів.

Поставленої мети було досягнуто завдяки аналізу результатів досліджень багатьох вчених та автора у цій галузі, які проводились в різних країнах світу.

1. ОСОБЛИВОСТІ УТВОРЕННЯ ЛЬОДУ НА ПРІСНОВОДНИХ І МОРСЬКИХ АКВАТОРІЯХ

У колишньому Радянському Союзі вивченням фізичних властивостей різних типів льодів займалися фахівці географічного факультету Московського державного університету ім. М.В. Ломоносова, Арктичного та Антарктичного науково-дослідного інституту і інших науково-дослідних академічних і галузевих установ. Згідно з класифікацією льодів, запропонованою І.С. Піщанським /35/, вони поділяються на сім класів.

1. Атмосферні льоди - сніг, іній, град і ожеледь.
2. Поверхневі льоди - утворюються на акваторіях океанів, морів, озер, водосховищ, річок і невеликих водойм у зимові періоди.
3. Внутрішньоводні льоди - первинні крижані кристали, що утворюються в товщі води і на дні водойм.
4. Материкові льоди - льодовики, льоди багаторічної мерзлоти, поховані льоди.
5. Мерзлота, що утворюється в літосфері.
6. Поховані льоди - приховані від денної поверхні товстим шаром ґрунтових відкладень.
7. Штучні льоди - створені людиною, за допомогою різних технологій.

Найбільший інтерес, відповідно до мети цього підручника, становлять поверхневі льоди акваторій, яким і приділено основну увагу.

Лід це одна з форм агрегатного стану води, що являє собою тверде кристалічне тіло. Процеси формування морського і річкового льодів суттєво відрізняються, оскільки в морській воді, як відомо, міститься значна кількість різних солей. Крім цього, акваторії морів схильні до коливань вільної поверхні за постійної зміни рівня води та вітрових хвиль, що істотно ускладнює процеси утворення морського льоду.

1.1 Річковий лід

Утворення крижаного покриву в прісних водоймах залежить від температури замерзання води, температури її найбільшої щільності та від прихованого тепла льодоутворення. Прісна вода річок, озер, водосховищ і прісноводних лиманів містить дуже мало солей і, з цієї причини, її фізичні властивості практично не відрізняються від властивостей дистильованої води, що замерзає, як відомо, за температури 0°C і досягає найбільшої щільності за температури 4°C . Осіння віддача тепла водою з її поверхні

відбувається завдяки контакту з холодними повітряними масами. Із втратою тепла збільшується щільність поверхневих шарів води, які опускаються до глибин, де температура води дорівнює початковій температурі поверхневого шару. Таким чином, починається процес конвекції (перенесення температури), який за певний час досягає донної поверхні за умови, що температура придонного шару води вища за 4°C. Подальше охолодження води відбувається після того, як увесь об'єм тієї чи іншої водойми досягне максимальної щільності. Після цього циркуляція потоку донного тепла до поверхні стає мінімальною, оскільки він характеризується лише молекулярною теплопровідністю води. Тому надалі поверхневий шар води швидко охолоджується і замерзає за температури повітря нижче 0°C. На початкову фазу льодоутворення, на прісноводних акваторіях, впливає наявність вітрового хвилювання на поверхні води та течій. Надалі зростання крижаного покриву відбувається знизу з уповільненням у часі через невелику теплопровідність льоду. Зростання товщини льоду істотно сповільнюється за наявності снігового покриву на його поверхні. Такі основні особливості замерзання прісної води. Прісно-водні льоди поділяються на річкові й озерні, а та-

кож льоду невеликих водойм. Вони існують тільки в зимові періоди року.

Відповідно до роботи /35/, поверхневі прісно-водні льоди прийнято поділяти на такі типи:

а) *поверхневий водний лід* - лід із чистої води без домішок інших видів льоду, що утворилися раніше, за умови зниження температури поверхневого шару до точки замерзання, він складається зі стовпчастих кристалів різної товщини;

б) *поверхневий водно-сніговий лід* - лід зі снігу, що випав на поверхню води або знаходиться на крижаному покриві й насичений водою, він має кристалічну структуру з великою кількістю пор;

в) *поверхневий водно-шугувий лід* - лід, що утворюється під час замерзання води, яка містить шугу, він менш прозорий, порівняно з водним льодом, і має неправильну структуру.

На акваторії прісноводних водойм протягом зимових періодів виникає ціла низка льодових утворень, яким притаманні свої особливості.

Забереги - прибережні смуги льоду, що облямовують береги річок, озер і водосховищ на початку льодоставу за вільних від льоду акваторій. Фахівці розрізняють первинні

забереги, що утворюються безпосередньо біля берегів, наносні забереги під час примерзання льоду та шуги в період льодоходу, а також залишкові забереги навесні під час танення льоду. Їхня площа на озерах і водосховищах може збільшуватися завдяки дрейфуючим крижинам, що притискаються до берега вітрами.

Крижана перемичка - ділянка крижаного покриву на річці, що виникає в місцях змикання заберегів і під час зупинки та змерзання окремих крижин і шуги.

Шуга - внутрішньоводний лід у вигляді крижаних пластинок і їхніх зерен, що перебуває в глибині води або спливає на поверхню.

Крижана каша - являє собою масу дрібнороздробленого льоду з включеннями сніжури, сала і шуги в просторах між великими за площею крижинами і біля берегів у разі шурхоту льоду.

Закраїна - відкрита акваторія вздовж берегів, що виникає перед розкриттям крижаного покриву в період танення льоду і відходу його від берегів при підвищенні рівня води.

Битий лід - крижини неправильної форми і розмірів, що утворюються під час руйнувань заберегів і розкриття річок у процесі льодоходу.

Крижані поля - частини зруйнованого крижаного покриву, розміри яких на річках, озерах і водосховищах коливаються від 0,1 до 2 км.

Льодохід - дрейф по річці різних типів льодових утворень в осінні та весняні періоди часу. Слід зазначити, що в південних регіонах України після різких відлиг і в зимові періоди можуть спостерігатися льодоходи.

Навали льоду - нагромадження льодових утворень біля берегів річок, озер, водосховищ і біля річкових гідротехнічних споруд під впливом спільної дії вітрів і течій.

Зажор - скупчення шуги й окремих крижин у руслі річки, що зменшує живий переріз річок і призводить до підвищення рівня води. Зажор складається з "голови" (ділянка на місці його первісного утворення) і "хвоста" (ділянка в його краю).

Затор - нагромадження поверхневого льоду в руслі річки, що супроводжується істотним зменшенням живого перерізу річки та відповідним підвищенням рівня води в річці вище затора за течією.

Зазвичай суцільним крижаним покривом покриваються акваторії озер, заток і бухт, а також рівнинні річки. Руйнування суцільних крижаних покривів призводить до

утворення рівних крижаних полів, які в період дрейфу (льодоходу) річками чинять найбільший силовий вплив на річкові гідротехнічні споруди та опори мостів. Взаємодіючи між собою, крижини руйнуються, утворюючи річкові неконсолідовані тороси.

Відомі випадки, коли після розкриття річок дрейфуючий лід спричиняв руйнування гідротехнічних споруд і створював штучні підпори води, що спричиняли повені цілої низки населених пунктів, цінних земельних угідь, автомобільних доріг і важливих промислових об'єктів.

Найбільший практичний інтерес для річкового гідротехнічного будівництва представляють дрейфуючі по річці або на акваторії водосховищ і озер рівні крижані поля. Їхня взаємодія з річковими гідротехнічними спорудами та опорами мостів призводить до значних льодових навантажень, які необхідно враховувати під час проектування таких об'єктів.

1.2. Морський лід

Солоноводними льодами вкриваються акваторії морів, океанів, а також бухт, заток, морських лиманів і солоних озер. Процес замерзання морської води дещо відрізняється завдяки її солоності. Дослідження сольового складу морської води було здійснено ще в позаминулому столітті. У результаті було виявлено сталість сольового складу вод світового океану. Практично всі природні хімічні елементи розчинені в морській воді в різних кількостях. У таблиці 1.1 наведено основні хімічні сполуки в грамах на 1000 г води і у відсотках до загальної кількості солей /14/.

Таблиця 1.1

Основні хімічні сполуки в морській воді

Хімічні елементи	Хімічні сполуки	В грамах на 1000г	У % до загальної кількості солей
1	2	3	4
Хлористий натрій NaCl	Хлориди	27,2	77,8
Хлористий магній MgCl ₂		3,8	10,9
Сірчаноокислий магній Mg ₂ SO ₄	Сульфати	1,7	4,7
Сірчаноокислий кальцій CaSO ₄		1,2	3,6
Сірчаноокислий калій K ₂ SO ₄		0,9	2,5
Вуглекислий кальцій CaCO ₃	Карбонати	0,1	0,3
Бромистий магній	Броміди	0,1	0,2

MgBr ₂			
Σ		35,0	100

Відношення маси солей (вираженої в грамах), що містяться в певному об'ємі води, до маси цього об'єму називають її солоністю. За одиницю солоності води - проміле (1⁰/₀₀), було прийнято 1/1000 цього співвідношення або 1г солей, розчинених у 1000г морської води. Враховуючи ту обставину, що середня солоність вод світового океану дорівнює приблизно 35⁰/₀₀, температура замерзання морської води, як і температура її максимальної щільності, залежать від солоності (див. таблицю 1.2 /14/). Аналіз, представлених у таблиці даних, показує, що при зміні солоності води від 0 до 40⁰/₀₀, зміна температури замерзання відбувається на меншу величину, ніж зміна температури найбільшої щільності.

Таблиця 1.2

Залежність температури замерзання морської
води від солоності

S% Солоність	0	5	10	15	20	24,695	25	30	35	40
-----------------	---	---	----	----	----	--------	----	----	----	----

τ° температура замерзання	0	-0,3	-0,5	-0,8	-1,1	-1,332	-1,35	-1,6	-1,9	-2,2
Θ° температура найбільшої густини	3,98	2,9	1,9	0,8	0,3	-1,332	-1,4	-2,5	-3,5	-4,5

На графіку рис.1.1 /14/ представлено закон зміни цих параметрів, які перетинаються в точці відповідної солоності $24,695^{0/00}$.

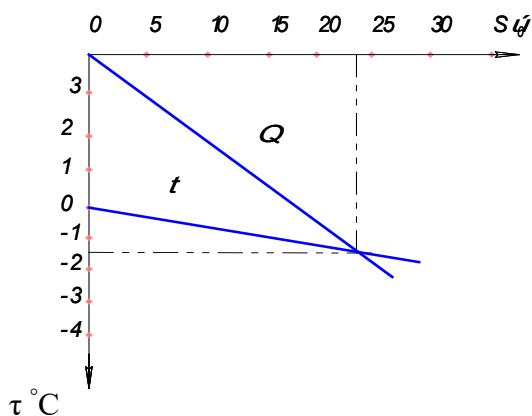


Рис.1.1 Залежність температури найбільшої щільності τ і температури замерзання θ від солоності води S ‰.

Із графіка випливає, що щільність морської води такої солоності, на відміну від менш солоної, буде збільшуватися до моменту її замерзання /14/. Саме тому, після зниження температури повітря до негативних значень, на поверхні прісних водойм лід з'являється швидше, ніж на

поверхні морів за інших рівних умов. Це є першою основною причиною пізніших термінів льодоставу на морських акваторіях. Друга причина полягає в тому, що солоній воді притаманна нижча температура замерзання. Крім цього, у процесі замерзання тільки мізерно мала кількість солей, які містяться в морській воді, переходить у лід, що є третьою причиною, пов'язаною з особливістю процесу льодоутворення на акваторіях морів, бухт, проток і заток.

Слід зазначити, що і прісна, і солоня вода замерзають швидше при штильових умовах за відсутності течій. Тому крижаний покрив встановлюється швидше в затоках і бухтах, а також у протоках між островами. Процес льодоставу прискорюється за опадів у вигляді снігу, на танення якого витрачається додаткова кількість тепла. Наявність вітрового хвилювання і течій уповільнюють утворення крижаного покриву на морських і океанських акваторіях.

При досягненні температури води точки замерзання, на її поверхні починають утворюватися крижані кристали завдовжки до 20÷30мм, завширшки 3÷10мм і завтовшки близько 1мм, які називаються крижаними голками. Далі голки змерзаються між собою, утворюючи на поверхні води плями матового кольору, звані крижаним салом. Згодом з них утворюється млинцевий лід діаметром 0,3 ÷ 0,9 м.

Дана первинна форма льоду є вельми нестійкою і легко руйнується при хвилюванні. Згодом, за досить низьких температур, млинцевий лід змерзається в єдиний, відносно гладкий покрив, збільшуючись за товщиною знизу внаслідок утворення там нових кристалів.

Залежно від віку, морський лід розрізняють за стадіями розвитку на такі типи. Так, до початкових видів льоду належать:

крижані голки - кристали льоду у вигляді голок або пластинок, що утворюються на поверхні води або в її товщі;

крижане сало - скупчення на поверхні води змерзлих крижаних голок або у вигляді плям, або тонкого суцільного шару;

сніжура - в'язка маса, яка утворюється в період рясного снігопаду на охолоджену поверхню води.

До молодих належать ніласові льоди.

Млинцевий лід - льодове утворення круглої форми діаметром від кількох сантиметрів до 3 ÷ 4 м і товщиною до 0,1 м. Даний тип льоду утворюється при слабкому хвилюванні або штилі з крижаного сала, шуги і сніжури.

Склянка - тонкий прозорий лід у вигляді блискучої крихкої форми, що утворюється з крижаних кристалів або з крижаного сала на спокійній розпрісненій воді.

Нілас - тонкий еластичний лід товщиною до 0,1 м. Він легко згинається на хвилях і за невеликих стиснень нашаровується, а за кольором поділяється на темний і світлий.

Темний нілас більш пухкий, має вологу від розсолу матову без снігу поверхню, утворюється з крижаного сала, його товщина перебуває в межах 30÷50мм.

Світлий нілас - матовий непрозорий лід завтовшки до 0,1 м, утворюється в результаті зростання товщини або нашарування темного ніласу під час змерзання шуги та снігу.

Сірі льоди - товщиною від 0,10 до 0,30 м - утворюються з ніласу і склянки під час зростання їхньої товщини і з млинцевого льоду під час його змерзання. Вони є перехідною стадією до утворення білого льоду і представлені двома типами льоду: сірий молодик; сіро-білий молодик.

Сірий молодик менш еластичний, ніж нілас, ламається на хвилях, під час стиснення нашаровується, його товщина коливається від 0,1 до 0,15 м. Сіро-білий молодик, на відміну від білого льоду, під час стиснення трощиться (ла-

мається на шматки, які нагромаджуються один на одного). Товщина цього типу льоду перебуває в межах від 0,15 до 0,30 м.

Білий лід - подальша стадія наростання сірих льодів. У неарктичних морях такий тип льоду є граничним за віком ("дорослий лід") і його товщина коливається від 0,3 до 0,7 м.

Однорічний лід - утворюється в далекосхідних і арктичних морях з початку льодоставу і до початку весняного танення. Товщина таких льодів може досягати до 2 м. Саме цей лід являє собою найбільший інтерес для морських інженерів-гідротехніків у частині розрахунку льодових навантажень на стаціонарні морські гідротехнічні споруди різних типів.

Дворічний лід - до кінця другої зими його товщина досягає 2 і більше метрів.

Багаторічний лід - (арктичний пак), що проіснував понад два роки, його товщина сягає 2,5 і більше метрів.

Слід зазначити, що два останні типи льоду можуть формуватися й існувати тільки на акваторіях арктичних і антарктичних морів. Нині не існує науково обґрунтованих методів розрахунку льодових навантажень на морські гідротехнічні споруди від таких типів льодів.

У цьому параграфі наведено основні типи льодів, що становлять інтерес для морських гідротехніків під час проектування, будівництва та експлуатації морських гідротехнічних споруд різних конструктивних типів і функціонального призначення. Детальнішу міжнародну номенклатуру морських льодів і символіку їхнього позначення на морських льодових картах розробили фахівці Арктичного й Антарктичного науково-дослідного інституту (м. Санкт-Петербург) /29/. Ця символіка використовується льодовими розвідниками, які працюють з бортів літаків або вертольотів. На борту кожного сучасного криголама в даний час є вертоліт, який необхідний для здійснення оперативних льодових розвідок, за результатами яких судноводії прокладають оптимальні курси руху караванів суден.

2. ОСНОВНІ ТИПИ ЛЬДОВИХ УТВОРЕНЬ

2.1 Обледеніння

У процесі проектування всіх типів і класів гідротехнічних споруд (а також промислових і цивільних будівель і споруд, ліній електропередач, веж і веж зв'язку, естакад і мостів) необхідно враховувати таке природне явище, як обмерзання. Під час обмерзання всі зовнішні конструктивні елементи перерахованих вище споруд покриваються шаром льоду (див. рис. 2.1, 2.2, 2.3).

Рис. 2.1. Обледеніння берегозахисної споруди в районі Лузанівки (м. Одеса)



Рис. 2.2. Обледеніння берегозахисної споруди в районі Великого Фонтанського мису (м. Одеса)



Рис. 2.3. Обледеніння огорожувальної споруди в Одеському порту

Обмерзання відбувається внаслідок охолодження поверхонь конструкцій споруд та інших об'єктів (навіть тих, що переміщуються) до негативних температур і кристалізації на них води. Фахівці відзначають різні типи обмерзань /1, 13, 34/. Так, якщо на поверхню конструктивних елементів вода потрапляє з атмосфери, то обмерзання називають атмосферним, якщо з моря, то морським, а якщо одночасно і з моря і з атмосфери, то змішаним. Слід зазначити, що частинки води можуть потрапляти на споруди не тільки з

моря, а також із річок, озер і водосховищ за певних гідрометеорологічних умов.

Атмосферному обмерзанню притаманні такі види льоду:

- кристалічна та зерниста паморозь;
- ожеледь;
- відкладення мокрого та замерзлого згодом снігу;
- ожеледиця.

Кристалічна паморозь утворюється під час сублімації пари (перехід речовини з газоподібного стану в твердий, минаючи рідкий стан, і навпаки) на тонких конструкціях (наприклад, дротах) у вигляді кристаликів льоду листовидної форми, а зерниста паморозь утворюється під час замерзання крапель туману на якихось поверхнях. Атмосферна ожеледь утворюється під час замерзання крапель дощу або мряки, відкладення мокрого або замерзлого снігу (у випадках його примерзання до будь-яких поверхонь). Ожеледиця утворюється під час замерзання розталого снігу. Морське обмерзання, так само як і будь-яке водне, розрізняють трьох видів /35/:

- бризгове;
- наплескове;
- внутрішньоводне.

Бризгове обмерзання відбувається під впливом вітрових хвиль, що утворюються на водних поверхнях за негативних температур повітря. При цьому відбувається формування шару льоду з крапель води. Фахівці-гляціологи поділяють таку ожеледь на динамічну та вітрову. Динамічна ожеледь формується внаслідок замерзання частинок води, які зриваються з гребенів хвиль, що чинять силовий вплив безпосередньо на гідротехнічні споруди. Вітрова ожеледь завдячує частинкам води, які зриває з гребенів хвиль вітер перед спорудою.

Наплескове обмерзання утворюється при відкладенні льоду в процесі течії води безпосередньо по конструктивних елементах споруд у зонах змінного рівня води і вище. Фахівці розрізняють хвильову, нагонну, приливну і шугову ожеледь.

Хвильова ожеледь утворюється внаслідок запліскування гребенями хвиль частини води на поверхню споруд під час їхнього силового впливу. Завдяки такому явищу збільшуються поперечні розміри конструктивних елементів споруд, що призводить до відповідного збільшення хвильових навантажень на споруди в цілому.

Нагонна ожеледь виникає під час різких коливань рівня води, спричинених змінно-нагінними діями вітрів і паводками. При цьому шар льоду на спорудах утворюється в зоні змінного рівня води, як на морях, так і на прісноводних водоймах.

Приливна ожеледь формується під час замерзання морської води в приливних морях (де відбуваються суттєві щодобові коливання рівнів морів і океанів під впливом Сонця та Місяця). Слід зазначити, що це явище спостерігається в зимові періоди року за негативних температур повітря на приливних, гідроакумуючих і гідроелектростанціях, а також на інших гідротехнічних спорудах, що входять до складу гідровузлів.

Внутрішньовідне обмерзання відбувається на конструкційних елементах гідротехнічних споруд, що знаходяться нижче рівня води. Фахівці розрізняють крижану "подушку" і донний лід. Крижана "подушка" виникає на підводній поверхні гідротехнічних споруд, а також нижче ватерлінії на суднах під час їхнього руху через тонкі рівні крижані поля, вкриті шаром снігу. Що стосується донного льоду, то він утворюється під час обтікання конструктивних елементів споруд, суден, підводних трубопроводів і

комунікацій, включаючи й інші об'єкти, які омиваються переохолодженими потоками води.

Гляціологи також розрізняють два види змішаного обмерзання:

- змішаний наліп (у разі примерзання снігу, що випав на надводні поверхні, просоченого морською водою);

- змішана ожеледь (у разі замерзання суміші морської води й атмосферної вологи у вигляді дощу, мряки або туману).

Як відомо, вода в різних водоймах характеризується відповідною солоністю. З цієї причини, залежно від солоності води, розрізняють: морське обмерзання (за солоності води понад 24,7 ‰); солонувате (за солоності води в діапазоні 2÷24,7 ‰); прісноводне (за солоності води менше ніж 2 ‰). Крім цього, обмерзання за видом ділять на просте і складне. У тих випадках, коли на спорудах відкладається тільки один вид льоду, то обмерзання вважається простим, а коли декілька, то складним. У процесі складного обмерзання відбувається напашування кількох видів льоду на спорудах. Наприклад, при атмосферному обмерзанні складні відкладення льоду не що інше, як поєднання: зернистої паморозі й ожеледиці; кристалічної паморозі й оже-

ледиці; низка шарів ожеледиці й зернистої паморозі, що чергуються.

Таким чином, з розглянутих у цьому параграфі типів ожеледиці, найбільший інтерес для проєктувальників-гідротехніків становлять атмосферне і бризкове обмерзання. Повторюваність обмерзання характеризує частоту впливу льоду на елементи конструкцій споруд. Вона виражається у відсотках, як відношення числа випадків з обмерзанням до загального числа днів за розглянутий період і в нормативних документах подається у вигляді карт з ізолініями повторюваності. Так, на рис. 2.4 представлена така карта північної частини Росії.

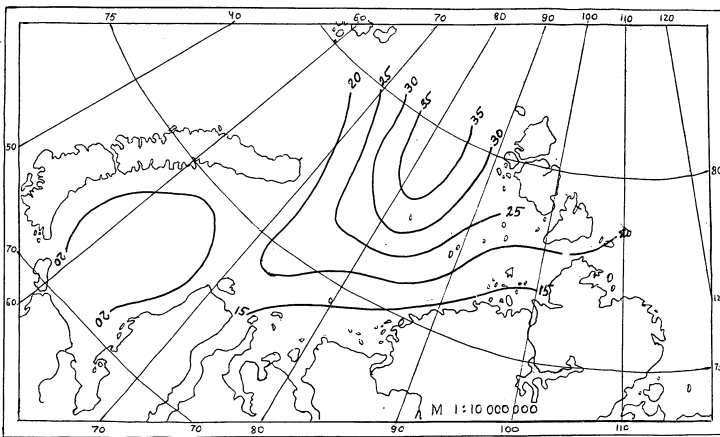


Рис.2.4. Повторюваність атмосферного обмерзання, %

Тривалість одного випадку обмерзання характеризує тривалість безперервного впливу на споруду. Сумарна тривалість відображає загальну тривалість обмерзання в годинах. На підставі аналізу даних багаторічних натурних спостережень В.В. Пановим /35/ було складено відповідні карти кліматичного районування. На рис. 2.5 і 2.6 наведено такі карти для Карського моря.

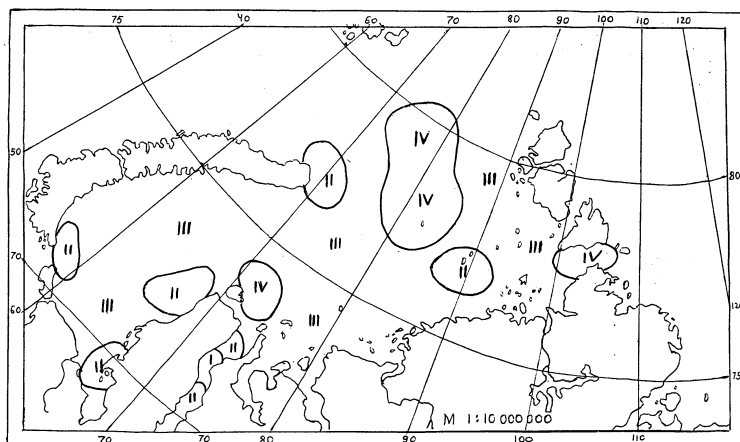
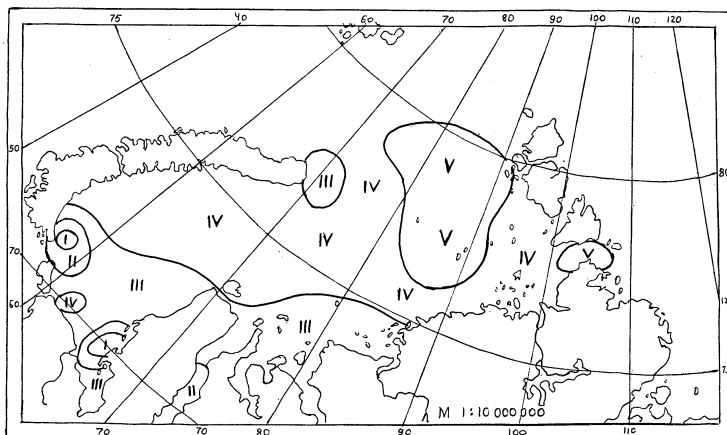


Рис.2.5. Райони безперервної тривалості обмерзання



Рмс. 2.6. Райони сумарної тривалості обмерзання

Таблиця 2.1 містить вихідні дані районування північної частини Росії.

Таблиця 2.1

Райони максимальних значень тривалості обмерзання повторюваністю один раз на 10 років

Номер району	Тривалість обмерзання, год			
	Безперервна		Сумарна	
	ΔT , год	$T_H - T_B$, год	ΔT , год	$T_H - T_B$, год
I	≤ 200	0 - 223	≤ 400	0 - 369
II	210 - 400	180 - 392	410 - 800	530 - 790
III	410 - 600	396 - 604	810 - 1200	820 - 1190
IV	610 - 800	596 - 807	1210 - 1600	1260 - 1632
V	> 800	714 - 1510	> 1600	1380 - 2473

Примітка: ΔT – градації тривалості обмерзання в даному районі; T_n – T_v – нижня і верхня довірчі межі тривалості 99 % забезпеченості.

Саме цим типам обмерзання найчастіше піддаються в процесі експлуатації всі типи гідротехнічних споруд. Відповідні методи врахування цього природного явища під час проектування гідротехнічних, а також промислових і цивільних споруд містяться відповідно в рекомендаціях нормо-мативних документів Росії /50/ і України /15/.

2.2 Рівні крижані поля

Практичний інтерес для річкового гідротехнічного будівництва представляють рівні крижані поля, що дрейфують річкою або на акваторії водосховищ і озер. Планові розміри рівних крижаних полів на річках пов'язані насамперед із шириною річок і їхньою звивистістю. Але, в будь-якому разі, вони значно менші за розміри рівних крижаних полів, що спостерігаються в морях. Рівні крижані поля в річкових умовах утворюються в процесі розкриття річок у весняні періоди. У південних регіонах виняток становлять зимові льодоходи, які спричиняються різкими і тривалими відлигами. Нерідко такі природні явища супроводжуються

зажорами і заторами, що призводять до локальних короткочасних підвищень рівня води.

Під час розрахунків льодових навантажень на річкові гідротехнічні споруди необхідно враховувати максимальні планові розміри і товщину розрахункового рівного льодового поля, яке може з'явитися протягом терміну служби проекрованої споруди в заданому річковому створі. Не менш важливим параметром є і міцнісні характеристики льоду, які, в свою чергу, залежать від температури льоду і цілої низки інших чинників.

Формування рівних крижаних полів у морях істотно відрізняється від річкових умов. На морях уздовж берегової лінії утворюються припаї, ширина яких залежить насамперед від географічного положення моря, конфігурації берегів та топографії дна приурізних зон. Розрізняють активні та пасивні льодовикові припаї. Активні припаї утворюються кілька разів протягом одного зимового періоду на відносно прямолінійних ділянках морських узбереж біля приглиблених берегів. Пасивні ж припаї, після їх утворення, руйнуються лише наприкінці зимового сезону. Цьому сприяє звивиста конфігурація берегових ліній, наявність заток і бухт, а також відносне мілководдя, де можливе примерзання льоду до поверхні дна. Товщина

льоду в пасивних припаях завжди більша за товщину льодів, що дрейфують, які спочатку утворилися в активних припаях.

Відірвавшись від берега під впливом зовнішніх сил (вітру, течій, довгоперіодних хвиль), активний припай руйнується на окремі рівні крижані поля, які, перебуваючи згодом у стані дрейфу, продовжують нарощувати свою товщину, підпадаючи під вплив негативних температур повітря. До кінця зимового сезону товщина таких рівних крижаних полів в умовах Арктики й Антарктики може досягати 2 м. Це так званий однорічний лід, від впливу якого, відповідно до рекомендацій нормативних документів /50, 12/, і визначаються льодові навантаження на різні типи морських гідротехнічних споруд. На початку літнього періоду року відбувається відрив і пасивних припаїв, які в цілому ряді арктичних морів за короткий літній період не встигають повністю розтанути. Завдяки цій обставині, в наступний зимовий період утворюється так званий паковий лід.

Проте навіть у морях Арктики й Антарктики протягом тривалих зимових періодів частина акваторій буває вільною від дрейфуючих льодів. Льодова ситуація на морях мінлива в часі й залежить від багатьох природних чинників. Вона оцінюється кількома характеристиками. До першої з них належить ступінь покриття акваторії льодом. Її оцінку здійснюють у балах за десятибальною шкалою. Відсутність льоду на спостережуваній акваторії (чиста вода) відповідає 0 балам, а повне її покриття льодовими утвореннями - 10 балам. До другої характеристики належать типи льодових утворень, до третьої - їхні розміри, а до четвертої - параметри міцності льодових утворень. Загалом льодова ситуація залежить від суворості того чи іншого зимового сезону, який визначається сумою негативних градусо-днів.

Як показують дані гідрометеорологічних спостережень, навіть у південних регіонах України в суворі зими рідкісної повторюваності на акваторіях морів і на річках з'являється лід, товщина якого може сягати до 0,7 м. Ця обставина значно ускладнює судноплавство і безперебійну роботу портів. Вона має також враховуватися і під час проектування морських і річкових гідротехнічних споруд у цих регіонах.

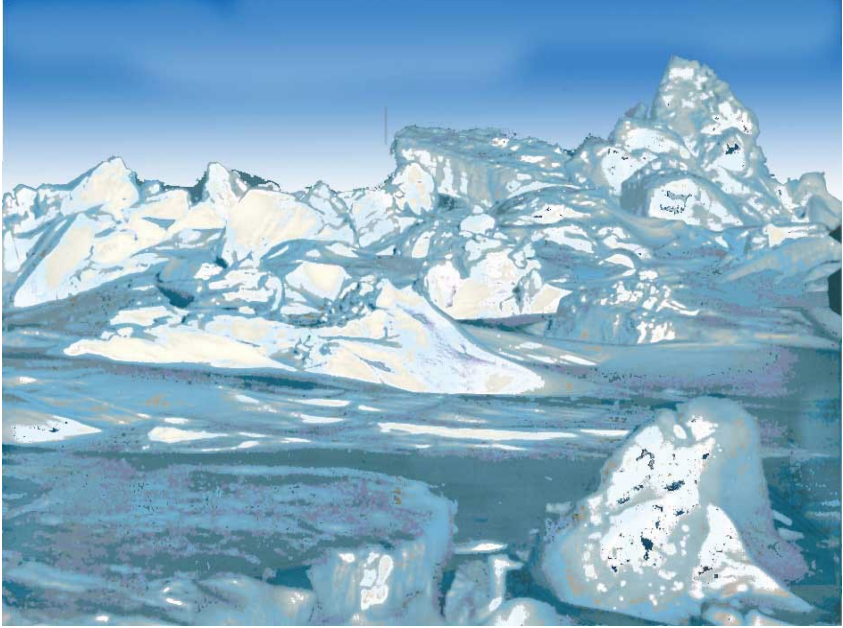
2.3. Тороси

Дрейфуючі крижані поля під дією зовнішніх сил (вітру, морських течій) за певних географічних умов (наприклад, за умови зменшення ширини акваторії на шляху дрейфу), взаємодіючи між собою, частково руйнуючись на уламки, спричиняють процес торосоутворення. Завдяки цьому процесу, формується такий тип дрейфуючих льодових утворень у вигляді поодиноких торосів та полів торошіння. При цьому між уламками рівних полів, що складають тороси, утворюються порожнечі. Утворений торос або поле торошіння за період свого існування, перебуваючи під впливом зовнішніх природних факторів, постійно трансформуються. Так, під дією сил гравітації і плавучості відбувається переущільнення уламків льоду, що складають торос, тобто зменшення пористості торосів. Приповерхневі течії води постійно видозмінюють кильову частину торосів. Негативні температури повітря формують консолідовану (змерзлу) середню частину торосу, товщина якої збільшується в часі.

Як поодинокі тороси, так і поля торошіння складаються з трьох частин (див. рис. 2.7). Надводна частина торосу (вітрило) заввишки h_s висотою підноситься над поверхнею рівних крижаних полів, що оточують тороси. Уламки надводної частини торосу змерзаються за контактними площами відразу ж після формування торосів. У се-

редній частині торосу, безпосередньо після закінчення процесу його утворення, відбувається змерзання уламків льоду і замерзання води, що заповнює порожнечі між ними. Згодом, після певного часу, формується консолідована середня частина торосистого утворення завтовшки h_m . І, нарешті, підводна (кільова) частина торосу заввишки h_k перебуває як у частково консолідованому, так і в неконсолідованому стані по її висоті. Кіль торосу примикає до середньої консолідованої частини, і за певних температурних умов відбувається подальше часткове смерзання уламків по товщині кіля. Причому, ступінь смерзання істотно слабшає з глибиною. Під впливом течій води, яка має позитивну температуру, відбувається постійний процес зменшення початкових розмірів уламків льоду, що складають підводну частину торосу, а, відповідно, і загальної висоти кільової частини.

а) надводна частина поля торошіння в Охотському морі



б) схема поля торошення

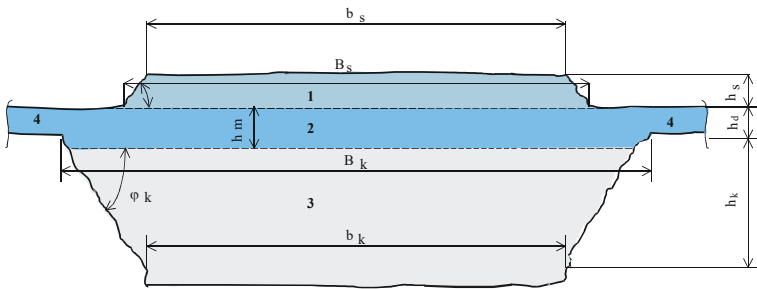


Рис. 2.7. Торосисте утворення

1 - вітрило; 2 - середня консолідована частина; 3 -
кіль; 4 - рівне крижане поле

Таким чином, у новоутворених торосах відбуваються процеси, які призводять до зміни в часі їхніх основних параметрів. З цієї причини будь-яке торосисте утворення не може розглядатися як якась структура, що остаточно сформувалася.

Після рівних крижаних полів тороси становлять найбільшу небезпеку для морських гідротехнічних споруд, що зводяться в умовах відкритого моря. Слід також зазначити, що часто дрейфуючі тороси під час підходу до берега під впливом притискних вітрів сідають на міліну, виорюючи своєю кільовою частиною борони в донних ґрунтах. Після посадки на міліну вони якісно змінюються і називаються стамухами (див. Номенклатуру морських льодів /28/). Але і після цього, за певного збігу природних обставин (різкого підвищення рівня моря, дії довгих хвиль і штормових вітрів із берега), стамухи, як показали натурні спостереження, можуть зніматися з міліни і продовжувати дрейфувати у відкритому морі. При цьому вони можуть чинити силовий вплив на підводні морські гідротехнічні споруди, а також на підводні трубопроводи і комунікації,

які будуть зустрічатися на шляху їхнього дрейфу на глибинах води, порівнянних із розмірами кільової частини торосів. З цієї причини під час проектування таких споруд і комунікацій необхідно передбачати їхній захист від силового впливу кільової частини торосів /43/. Наявність стамух уздовж узбереж сприяє закріпленню льодових пасивних припаїв.

Виходячи з викладеного вище, у кожному конкретному районі будівництва в якості розрахункового, має розглядатися торос із такими характеристиками, які, за умови їхнього використання в розрахункових залежностях, призведуть до льодового навантаження заданої забезпеченості на морські гідротехнічні споруди, що проєктуються. В свою чергу, розрахункові характеристики торосів необхідно призначати на підставі аналізу результатів інженерних вишукувань, проведених у районі майбутнього будівництва. Такі вишукування, відповідно до вимог відомчих норм, слід проводити протягом кількох зимових періодів /11/ у районах майбутнього будівництва. Під час призначення розрахункових характеристик торосів необхідно враховувати дані гідрометеорологічних спостережень у кожному конкретному регіоні.

2.4 Айсберги

Айсберги належать до такого виду дрейфуючих льодових утворень, протистояти впливу яких не можуть ні плавучі, ні стаціонарні морські гідротехнічні споруди. Нині відсутні методи розрахунку силового впливу айсбергів на морські гідротехнічні споруди.

Своїм існуванням айсберги зобов'язані краям материкових або острівних заледенінь. Ці заледеніння повільно розтікаються від центру до периферії, і їхні краї поступово переміщуються в бік моря. Під дією сил тяжіння і плавучості відбуваються відриви брил льоду, утворюючи тип дрейфуючого льодового утворення, званий айсбергом. Відповідно до Номенклатури морських льодів /28/ айсбергом називається масивний шматок льоду різної форми, що відколовся від льодовика і виступає над рівнем моря більш як на 5 м., який може перебувати або в стані дрейфу, або сидіти на мілині. Як показують результати натурних спостережень, айсберги мають різноманітні форми. З цієї причини гляціологи їх класифікують за двома основними ознаками - походженням та формою. За походженням айсберги поділяються на шельфові та материкові. За формою вони бувають столоподібними, куполоподібними і такими,

що руйнуються (див. рис. 2.8 /14/). Айсберги таких форм зустрічаються як у північних, так і південних широтах.

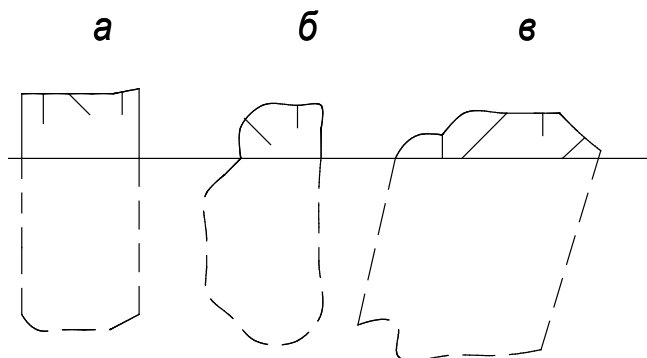


Рис. 2.8. Форми айсбергів: а - столоподібний; б - куполоподібний; в - такий, що руйнується.

На рис. 2.9 представлений загальний вигляд айсберга (фото автора з борту рятувального судна "Фобос" у період роботи комплексної науково-дослідної експедиції в районі Штокманівського родовища в 1992 р.) у Баренцовому морі неподалік від Землі Франца-Йосипа. Щоб обстежити цей айсберг, на його надводну частину було висаджено учасників експедиції, які відібрали проби льоду для виготовлення зразків з метою їх випробувань на міцність.

Площа його надводної частини перевищувала площу футбольного поля, а висота над рівнем моря сягала 15 м. Слід зазначити, що, згідно з даними натурних спостере-

жень, надводна частина айсберга становить приблизно одну шосту частину від його загальної висоти.



Рис. 2.9. Столоподібний айсберг

В експедиції 1991 р. на судні "Нафтогаз-7" приблизно в тих самих широтах автору вдалося сфотографувати куполоподібний айсберг (див. рис. 2.10).

а)



б)



Мал. 2.10. Куполоподібний айсберг
(вид із різних точок а; б)

У північних широтах великі айсберги досягають довжини понад 200 м і підносяться над рівнем моря до 25 м. Один з гігантських айсбергів у південних широтах був виявлений з борту дизель-електрохода "Обь". Довжина цього айсбер-

га становила 160 км, ширина - 72 км, а висота надводної частини дорівнювала приблизно 40 м. Очевидно, що такому гіганту не може протистояти жодна інженерна конструкція. Слід зазначити, що в недалекому минулому поблизу берегів Австралії було зафіксовано айсберг, що значно перевищує розміри попереднього.

На сьогоднішній день існують різні пропозиції щодо запобігання зіткнення айсбергів або їх уламків з морськими нафтогазопромисловими гідротехнічними спорудами на глибинах води, що перевищують розміри їх кильових частин /42/. Айсберги та їхні уламки фіксуються за допомогою суднових локаторів. При загрозі підходу айсбергів до гідротехнічних споруд, можна змінювати їхні траєкторії за допомогою потужних криголамів або буксирів, що обслуговують морські промисли. Такий метод зараз використовується в Канаді при появі айсбергів на морських трасах для забезпечення безпечного судноплавства. Друга пропозиція полягає в руйнуванні айсбергів вибуховим способом /41, 42/ під час підходу до споруд на уламки, які будуть не здатні чинити істотне льодове навантаження. Щоб реалізувати таку пропозицію, необхідно провести дорогі наукові експерименти в натурних умовах з метою

розроблення оперативного та ефективного методу руйнування цих природних утворень.

Слід відзначити, що в районах світового океану, де можлива поява айсбергів, облаштування морських родовищ проводять, використовуючи підводні комплекси на глибинах води, недоступних для їхніх кільових частин. На тих ділянках дна, де глибини води будуть порівнянними з кільовою частиною айсбергів або їхніх уламків, слід передбачати конструктивні заходи захисту підводних трубопроводів і комунікацій від руйнувань.

3. ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЬДОВИХ УТВОРЕНЬ

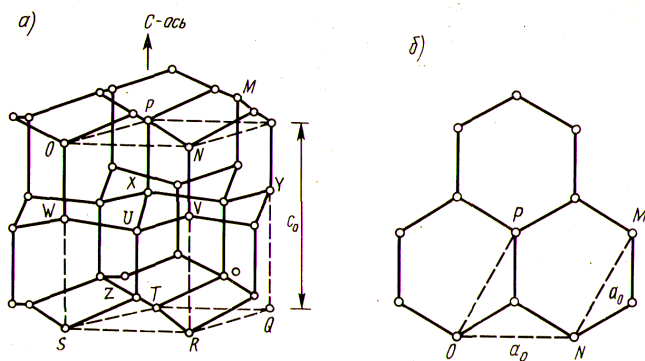
3.1 Крижані поля

Під час проектування гідротехнічних споруд різного призначення і конструктивних типів, які в процесі експлуатації зазнають силового впливу рівних льодових полів, необхідно володіти інформацією про їхні фізико-механічні характеристики. До фізичних характеристик належать: структурна будова льоду; солоність льоду; пористість та щільність льоду; температура льоду за товщиною крижаного поля; розрахункові метричні характеристики. До міцнісних (механічних) характеристик льоду фахівці відносять: міцність льоду на стиснення, вигин, розтягнення; статичний та динамічний модулі деформації; коефіцієнт Пуассона.

3.1.1 Будова льоду

Лід має кристалічну структуру, яка визначається будовою його молекул. У них, як і в молекулі води, атом кисню розташовується у вершині рівнобедреного трикут-

ника, а два атоми водню знаходяться в основі цього трикутника. У кожному кристалі льоду один атом кисню розташовується в центрі тяжіння чотирьох сусідніх атомів кисню, розташованих у кутах тетраедра. Таке розташування атомів кисню утворює кристалічну структуру, що належить до гексагональної симетрії: рис. 3.1, рис. 3.2. /46/. Молекули льоду розташовуються в щільно упакованих паралельних площинах, які називаються базисними. Перпендикулярну базисній площині вісь називають С-віссю (див. рис. 3.1). Вона є єдиною головною гексагональною віссю симетрії, а також і оптичною віссю кристала, тому що промінь світла, який падає цією віссю, проходить крізь кристал без подвійного променезаломлення.



Мал. 3.1 Розташування атомів у льоду
а - вид перпендикулярно С-осі; б - вид уздовж С-осі

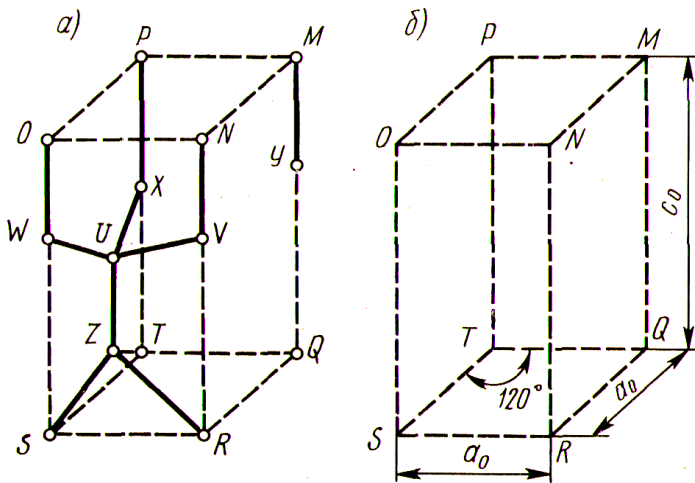


Рис.3.2. Одинична комірка (а), просторова решітка (б)

Кожна з молекул льоду пов'язана з трьома молекулами, які перебувають із нею в одному шарі, і лише з однією молекулою із сусіднього шару рис. 3.1б. З цієї причини ковзання по базисних площинах відбувається значно легше, ніж по інших площинах. Поведінка монокристала льоду, під час прикладання сили, схожа на упаковку пружних пластинок, з'єднаних в'язкою речовиною. При зсуві по базисній площині відбувається пластична деформація, а при зсуві перпендикулярно базисним площинам кристали

знають пружнопластичних деформацій до моменту повного руйнування.

Однорічний морський крижаний покрив складається з кількох характерних шарів: верхнього водно-снігового; нижнього конжеляційного /16/. Останній шар, за стабільних умов утворення льоду, поділяють на три зони. Верхній зоні притаманна дрібнокристалічна будова з хаотичним напрямком С-осей. У середній (зоні кристалічного відбору) відбувається переорієнтація С-осей кристалів. В основній нижній зоні С-осі розташовані горизонтально, а кристали мають вигляд вертикальних волокон.

У процесі вивчення льоду, як природного матеріалу, дослідники застосовують різні типи класифікації. Класифікація за структурними ознаками (розмір, орієнтування і форма кристалів) /55/ і генетична класифікація морських льодів /56, 5/ диференціюють льоди за умовами їхнього утворення. Усі ці класифікації не позбавлені конкретних недоліків. У Росії для практичних цілей використовується класифікація, запропонована Н.В. Черепановим /55/. Вона враховує основні генетичні та структурні ознаки:

- поділ водойм за сольовим складом на прісні, розпріснені й солоні;

гідрометеорологічний режим водойм перед кристалізацією води та в період росту льоду;

- особливості росту кристалів льоду;

-морфологію кристалів (форма росту і розміри кристалів, досконалість граней та їхнє орієнтування, характеристика включень);

- час існування крижаного покриву і процеси метаморфічного перетворення льоду.

Н.В. Черепанов поділяє льоди природних водойм за умовами льодоутворення і солоності на чотири основні групи. Група А охоплює льоди, які утворюються в прісних або сильно розпріснених водоймах ($S < 2^0/00$). До групи Б належать льоди, що утворюються в розпріснених водоймах ($S = 2\div 24,7^0/00$). До групи В належать морські льоди (за солоності води $S > 24,7^0/00$). Група Г включає льоди, що утворилися в результаті метаморфічних перетворень тривало існуючого крижаного покриву, який зазнав термічних і динамічних впливів.

Характеристики основних типів росту кристалів, залежно від градієнта температури на поверхні, що розділяє воду та лід, подано в таблиці 3.1 /55/ і проілюстровано на рис. 3.3 /55/.

Таблиця 3.1

Характеристика основних типів росту кристалів льоду

Тип зросту кристалів	Гradient температури	Швидкість зросту кристалів	Фронт кристалізації	Поверхня розподілу лід-вода
Перший	Великий	Мала	Плоский	Гладка
Другий	Малий	Середня	Вузька зона	Шерохвата
Третій	Відсутній або негативний	Велика	Широка зона	Ажурний шар

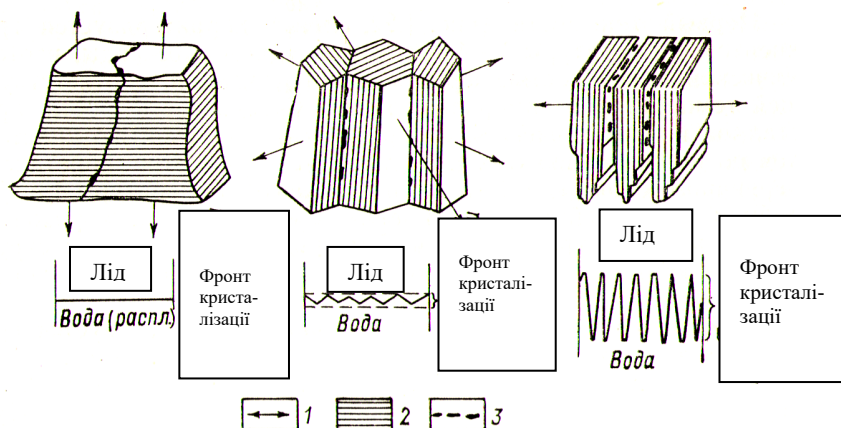


Рис. 3.3. Типи росту кристалів льоду

1 - С-вісь; 2 - базисні площини; 3 - вклучення.

Перший тип росту (рис. 3.3) відповідає gradientу температури від 0 до 4 К/м у шарі води, безпосередньо що примикає до крижаного покриву. При цьому фронт кристалізації характеризується ізотермічною поверхнею і температурою

замерзання води. У таких умовах кристали розвиваються у напрямку С-осі. Далі, при середньому діаметрі кристалів первинного льоду $2 \div 3$ мм і градієнті температури $1,5$ К/м, відбувається повне переорієнтування кристалів на горизонтах $10 \div 15$ мм. Перебудова структури від хаотично орієнтованих кристалів до впорядкованих закінчується на горизонтах $25 \div 40$ мм при градієнті $0,4$ К/м.

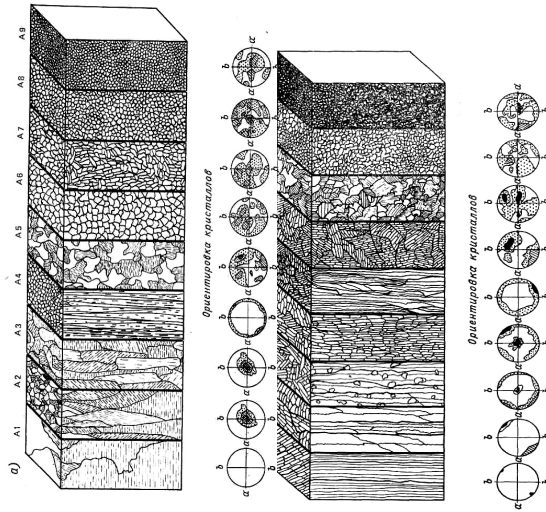
Другий тип росту кристалів (рис. 3.3) відповідає градієнтам температури, що дорівнюють кільком десятим або сотим градуса на 1м, і вузькій зоні кристалізації. На нижній поверхні формується шорсткість, спричинена нерівномірною швидкістю росту різноорієнтованих кристалів у вигляді загострених пірамід, призм і голок.

Третій тип росту кристалів (рис. 3.3) утворюється за відсутності градієнта температури в прилеглому переохоложеному шарі води. Цей тип росту кристалів характеризується найбільшою швидкістю відведення теплоти кристалізації. При цьому скелетні кристали ростуть широким фронтом у напрямку базисної площини. Такі умови можуть виникати тільки в морських водоймах за інтенсивного вертикального перемішування води.

У тих випадках, коли орієнтований ріст кристалів порушується з якихось динамічних причин (занесенням у прильодовий шар ядер кристалізації у вигляді зерен внутрішньоводного льоду, шуги та снігу за умови пору-

шення температурної стратифікації води), то формуються різні типи льоду зі складною ізотермічною формою кристалів та характерним невпорядкованим їхнім оптичним орієнтуванням.

Класифікація прісноводних і солоних (морських) льодів за М.В. Черепановим показана на рис. 3.4 /4/. Особливість цієї класифікації полягає в тому, що типи льоду в кожній її групі розташовано "за зростаючим індексом, відповідним збільшенню динамічності водойми, порушенню її термічного режиму, підвищенню ролі внутрішньоводного льоду". На цьому ж рисунку наведені схематичні зображення типів льодів у горизонтальній і вертикальній площинах, а також типові стереограми оптичного орієнтування кристалів (а) і (б).



Мал. 3.4. Основні типи прісноводних (а) і морських (б) льодів

Згідно зі структурно-генетичною класифікацією льодів Н.В.Черепанова /55/ розрізняють такі нижче типи льодів прісних водойм:

тип А1 - поширений на невеликих озерах, лагунах, невеликих незарегульованих водосховищах з великим запасом тепла в нижніх щільних шарах води;

тип А2 - широко поширений на великих відкритих озерах, водосховищах, великих річках після тривалого вітрового перемішування, що супроводжувалося значною втратою тепла;

тип А3 - здебільшого утворюється на зарегульованих річках, водосховищах, великих озерах, для яких характерні ритмічне порушення температурних умов прильодового шару та тривалі незамерзаючі ділянки води, що зберігаються тривалий час;

тип А4 - утворюється на всіх прісних водоймах, які до моменту льодоутворення втрачають повністю запас тепла (поширений у гірлах річок, що впадають в арктичні моря);

тип А5 - умови для утворення цього типу льоду створюються на зарегульованих річках, водосховищах, великих озерах зі складними гідрологічними режимами, що характеризуються безперервним порушенням температурної стратифікації (розподіл по вертикалі шарів води різної густини і температури);

тип А6 - утворюється на річках зі швидкою течією, де тривалий час зберігаються ополонки;

тип А7 - характерний для глибоководних ділянок річок із наявністю відкритих ділянок води, утворюється з кристалів внутрішньоводного льоду;

тип А8 - утворюється під час змерзання щільних скупчень шуги і сніжури восени за інтенсивного вітрового

перемішуванні поверхневих шарів води (на річках зі швидкою течією);

тип А9 - утворюється при змерзанні снігу, просоченого водою.

Структура льодів групи Б залишається поки що маловивченою, і докладна їхня типізація на сьогодні відсутня.

Морські льоди, що належать до групи В, Н.В. Черепанов розділив також на дев'ять типів:

тип В1 - утворюється в стійкому прильодному шарі в припаї поза зоною поширення материкових річкових вод;

тип В2 - широко поширений в Арктиці (великі дрейфуючі рівні крижані поля) і в Антарктиці (припайні льоди);

тип В3 - утворюється при порушенні стабільного росту кристалів та інтенсивному надходженні до фронту кристалізації елементів внутрішньоводного льоду, характерний для дрейфуючих і припайних льодів Арктики;

тип В4 - дещо відрізняється від типу В3, зустрічається теж там;

тип В5 - утворюється при інтенсивному замерзанні морської води в зимовий період за наявності на поверхні великої кількості центрів кристалізації;

тип В6 - з'являється на морських акваторіях із гідрологічним режимом, що різко змінюється (великий діапазон зміни швидкостей і напрямів течій, різке коливання температури води, солоності окраїнних морів, проток і районів, прилеглих до гирл річок);

тип В7 - формується в разі сильного вітрового перемішування мілководних ділянок моря, що супроводжується інтенсивним утворенням шуги з внутрішньоводного і донного льодів;

тип В8 - утворюється під час змерзання зерен снігу з дрібними зернами внутрішньоводного льоду, спостерігається у всіх морях, а в Антарктиці становить 30÷40% усього об'єму льодів;

тип В9 - утворюється в процесі інфільтрації (просочування) морської води, що виступає на поверхню льоду під вагою сніжно-крижаного покриву (в Антарктиці становить 30÷40% усього об'єму льодів).

Таким чином, вивчення кристалічної структури льоду має важливе практичне значення. Характеристики міцності кристалічних тіл залежать від будови, розмірів і форми

кристалів, їх взаємної орієнтації та наявності сторонніх включень. З цієї причини, дослідження льоду, як матеріалу, дає змогу отримати якісні та кількісні характеристики, які пов'язують структурні особливості льоду і його характеристики міцності. Комплексні дослідження крижаного покриву дають змогу встановити основні закономірності умов льодоутворення залежно від клімату, гідрологічних особливостей конкретної водойми, а також виявити основні закономірності метаморфізму (процесу зміни структури крижаного покриву в часі).

Характеристика структури льоду складається з оцінки низки особливостей його будови: кристалічності (співвідношення між кристалічним і некристалічним матеріалом); зернистості (абсолютної величини кристалів, що утворюють дану породу в крижаному покриві); структурного малюнка (візерунок, що характеризує форму, відносні розміри та взаємне розташування кристалів); просторового орієнтування кристалів відносно поверхні намерзання (води); оптичної константи льоду. Виходячи з особливостей будови прісноводних і морських льодів, Н.В. Черепановим /56/ і була запропонована вищенаведена обґрунтована структура класифікації.

Текстура льоду має на увазі сукупність зовнішніх ознак, які зумовлені присутністю в льоду повітряних, солевих, органічних і мінеральних включень, характером їхнього розподілу, формою і кількістю включень, що визначають колір, прозорість, пористість, шаруватість і волокнистість льоду.

Наявність повітряних включень зменшує питому вагу льоду і впливає на його міцнісні та термічні властивості. За умовами походження повітряні включення поділяють на два типи. Первинні включення виникають одночасно з льодом, унаслідок вмержання бульбашок повітря з води, під час її замерзання, а також під час виділення бульбашок газів із дна водоймищ і часткового захоплення атмосферного повітря. Вторинні проникають у лід після його формування з атмосфери по тріщинах і порах.

Різні солі в морській воді істотно впливають на процеси кристалізації під час зародження і зростання кристалів. У сольових включеннях льоду міститься деяка кількість розсолу, який послаблює міжкристалічні зв'язки, зменшуючи міцнісні характеристики морських льодів.

3.1.2 Солоність льоду

Відомо, що кількість солей у морській воді у світовому океані становить 30÷35‰. Їхній вплив на властивості морської води і льоду дуже істотний. Так лід, що утворився з морської води, складається з трьох компонентів: прісного льоду; твердих солей; розсолу, що містить розчинені солі. Його солоність залежить від величини і швидкості зниження температури, солоності води, з якої утворився лід, і від віку льоду. Чим швидше знижується температура, тим більшу солоність матиме лід. У таких випадках солоність льоду може досягати до 20 ‰. Коли утворення морського льоду відбувається за плавного зниження температури, солоність льоду не перевищує 4 ‰. У процесі існування льоду його солоність може змінюватися як за складом, так і за кількістю солей. Солоність льоду - це вага в грамах усіх твердих солей, які містяться в одному кілограмі льоду. Слід зазначити, що солі в морському льоду знаходяться у вигляді концентрованого розсолу. Кількість розсолу, що міститься в одиниці ваги льоду, пропорційна його солоності. Концентрація розсолу залежить від температури. Приклад розподілу солоності за товщиною льоду за даними натурних досліджень (Weeks and Assur, 1967 р.) наведено на рис. 3.5.

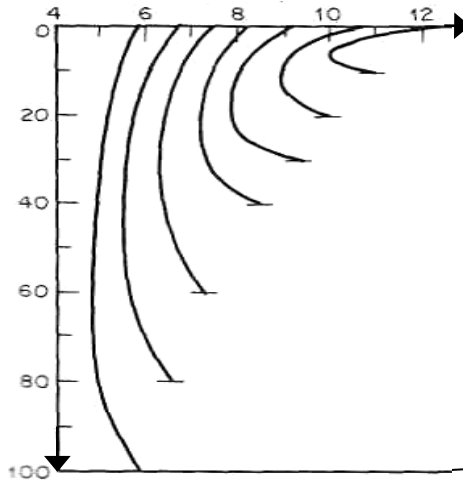


Рис. 3.5. Розподіл солоності по товщині льоду

Під час льодоутворення солоність льоду найбільша, але з часом вона починає зменшуватися в міру витікання розсолу. Кожній температурі відповідає певна концентрація і склад розсолу в льоду. Тому кількість розсолу на одиницю ваги льоду пропорційна солоності, але його концентрація строго відповідає певній температурі. На підставі багаточисленних досліджень, які проводилися в природних умовах із натурними льодами, була встановлена залежність величини солоності льоду від температури повітря в період утворення льоду (див. таблицю 3.2).

Таблиця 3.2

Залежність солоності льоду від температури повітря

у період утворення льоду

Температура, С°	-16	-23	-30	-40
Солоність, ‰	5,64	8,01	8,77	10,16

З урахуванням того, що по товщині льоду є градієнт температур (на поверхні льоду температура завжди нижча, ніж на контакті з водою), то солоність льоду з товщиною зменшується.

3.1.3 Пористість і щільність льоду

Пористість льоду - це відношення загального обсягу бульбашок і порожнин повітря в льоду до загального обсягу чистого льоду, виражене у відсотках. Як було встановлено, щільність чистого прісного льоду, позбавленого бульбашок повітря, становить $0,9176 \text{ г/см}^3$ за температури 0°C і $0,9377 \text{ г/см}^3$ за температури -25°C . За рахунок вмісту бульбашок повітря, щільність льоду завжди менша щільності води.

М.М. Зубов обчислив щільність льоду залежно від його пористості /17/ (див. таблицю 3.3).

Таблиця 3.3

Залежність щільності льоду від пористості

Пористість, %	89	78	67	56	46	35	24	13	2
---------------	----	----	----	----	----	----	----	----	---

Щільність, г/см ³	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
---------------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

На підставі численних досліджень було встановлено, що щільність прісного льоду дорівнює $0,9169 \pm 0,0005$ г/см³. Вивчення щільності морських льодів виявили низку залежностей її від солоності та вмісту повітря, віку льоду і від умов його утворення. Так, чим більша солоність льоду, тим більша його щільність, а кількість повітря зменшує цей параметр. Відповідно до результатів досліджень Арнольда-Аляб'єва В.І. /2/ у зразках однорічного льоду Карського моря вміст повітря коливався від 30 до 150 см³ у кілограмі льоду.

Що стосується впливу умов утворення на щільність льоду, то вони такі: чим повільніший процес замерзання, тим щільнішим, з меншою солоністю, буде лід; чим більшим буде морське хвилювання в процесі формування льоду, тим більше повітря потрапить у його пори.

М.М. Зубов /17/ встановив також залежність щільності морського льоду від температури і солоності (див. таблицю 3.4)

Таблиця 3.4

Залежність густини льоду від температури та солоності

Со- лоніс ть, ‰	Температура (в градусах °С)						
	- 2	- 4	- 6	- 8	- 10	- 15	- 20
2	0,924	0,922	0,920	0,921	0,921	0,922	0,923
4	0,927	0,925	0,924	0,923	0,923	0,923	0,925
6	0,932	0,928	0,926	0,926	0,926	0,925	0,926
8	0,935	0,932	0,928	0,928	0,928	0,928	0,929
10	0,939	0,935	0,931	0,929	0,929	0,929	0,930
15	0,953	0,944	0,939	0,937	0,935	0,934	0,935

При визначенні щільності льоду ρ експериментальним шляхом, використовується наступна залежність/4/:

$$\rho = \frac{\rho_{\text{ч}}}{1 + \frac{V_{\text{возд}}}{V_{\text{в}}}} \quad (3.1)$$

де: $\rho_{\text{ч}}$ – щільність чистого льоду;

$V_{\text{возд}}$ – об'єм повітря, що виділилося з льоду, приведений до початкових умов приведений до початкових умов ($T=0^{\circ}\text{C}$, $P=1,01 \times 10^5 \text{Па}$);

$V_{\text{в}}$ - об'єм талої води, отриманої в результаті танення зразка льоду.

Щільність чистого льоду $\rho_{\text{ч}}$, теоретично обчислена за розмірами елементарного осередку кристала за $T=0^{\circ}\text{C}$ і $P=1,01 \times 10^5 \text{ Па}$, дорівнює $916,8 \text{ кг/м}^3$. Оскільки щільність

води і льоду відрізняються незначно, то поверхня рівних крижаних полів завжди трохи підноситься над поверхнею води.

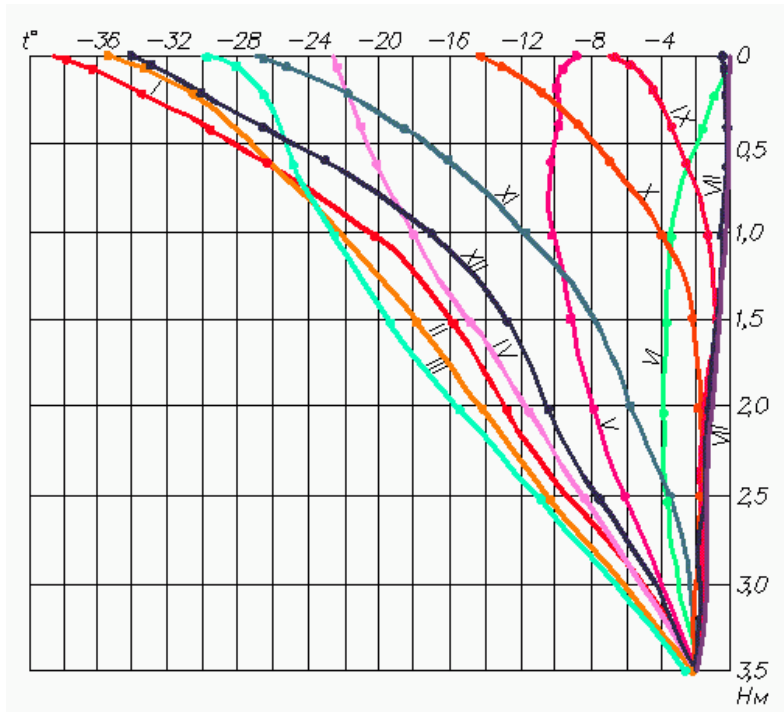
3.1.4. Температура льоду

Відомим є той факт, що характеристики міцності всіх типів льодів і рівних крижаних полів, зокрема, істотно залежать від температури, що змінюється за товщиною. Так, у разі відсутності снігового покриву на крижаних полях, температура поверхневих шарів наближається до температури повітря. Температура нижніх шарів рівних крижаних полів приблизно дорівнює 0°C . Різними дослідниками було вивчено різноманіття типів зміни температури за товщиною

рівних крижаних полів у натурних умовах (Ф. Нансен, Ф. Мальмгрен, Б.А. Савельєв, Г.М. Яковлєв, І.Г. Петров, Ю.Л. Назінцев). У результаті було встановлено низку закономірностей зміни температур у крижаних покриттях за товщиною залежно від температур повітря, а також річний хід середньомісячних температур льоду на різних горизонтах. При цьому аналізувався як вплив снігового покриву на поверхні крижаних полів, так і його відсутність. У разі відсутності снігового покриву температура верхніх шарів

льоду прагне до температури повітря. За наявності снігового покриву, через його малу теплопровідність, температура поверхневого шару льоду завжди вища за температуру повітря. Протягом року в крижаному покриві фахівці відзначають три температурні періоди: зимовий; весняно-літній; осінній.

Аналізуючи дані польових досліджень Ф. Мальгрена /27/, В.В. Шулейкін /58/ встановив, що середня температура льоду не дорівнює його середньоарифметичній температурі, і вивів закон зміни амплітуди і фаз під час поширення температурної хвилі в крижаному покриві. На рис. 3.6 наведено розподіл середньомісячних температур у рівному крижаному полі за його товщиною в Арктиці.



Мал. 3.6. Розподіл середньомісячних температур у крижаних полях Арктики

Під час розрахунків льодових навантажень на проєктовані гідротехнічні споруди інженери-гідротехніки мають розглядати розрахункові рівні льодові поля, на яких відсутній сніговий покрив.

3.1.5 Міцнісні властивості льоду

Під час розрахунків льодових навантажень на гідротехнічні споруди необхідно мати дані про фізико-

механічні властивості льоду в районах майбутнього будівництва. До основних характеристик належать міцність льоду на стиск та на вигин. Перший параметр використовується в розрахункових залежностях під час визначення горизонтальної складової льодового навантаження на споруди вертикального профілю, а другий - під час визначення горизонтальної та вертикальної складових льодового навантаження тільки на споруди похилого профілю. З цієї причини, у разі слабкої вивченості району будівництва, перед проектуванням споруд проводять вишукування з дослідження характеристик міцності льоду протягом кількох зимових періодів. Так, наприклад, під час проектування морських нафтогазопромислових гідротехнічних споруд на шельфі морів, що замерзають, відповідно до відомчих норм /11/, що регулюють порядок проведення інженерних вишукувань, льодові вишукування мають проводитися впродовж щонайменше п'яти зимових періодів. Вивчення міцнісних характеристик льоду здійснюється за спеціальними розробленими методиками з урахуванням рекомендацій, які були запропоновані міжнародною групою дослідників, що спеціалізуються в цій галузі /63, 64, 81/.

При випробуваннях зразків льоду на одновісне стиснення повинна дотримуватися ціла низка рекомендацій.

Зразки льоду виготовляють із проб, відібраних із рівних крижаних полів у вигляді кернів або призм, відповідно або циліндричної, або призматичної форми. Товщина рівних крижаних полів, які обирають для відбору проб льоду, має бути не меншою за $0,6h_d$, де h_d - розрахункова товщина рівного крижаного поля в районі майбутнього будівництва. Ширина або діаметр зразків можуть перебувати в діапазоні від 0,07 до 0,15 м, а висота в $2 \div 2,5$ раза більша за розмір поперечного перерізу. Необхідно, щоб поперечний розмір зразка не менш ніж у 10 разів перевищував поперечний розмір кристала, який слід визначати за результатами кристалографічних досліджень. За відсутності даних про розміри кристалів поперечний переріз зразка приймається рівним 150×150 мм. Зразки льоду мають бути орієнтовані паралельно площині намерзання рівного крижаного поля. Виготовлення зразків льоду необхідно проводити безпосередньо після доставки проб льоду в польову лабораторію. При цьому час доставки проб, як і виготовлення зразків, має бути мінімальним. Зазвичай проби льоду транспортуються в поліетиленових мішках, щоб уникнути на них прямого впливу сонячного світла. Виготовлення зразків слід здійснювати з максимальною точністю з використан-

ням відповідних інструментів і шаблонів з урахуванням товщини крижаного поля. Зразки льоду індексуються залежно від шару (верхнього, середнього та нижнього) і порядкового номера. Вимоги щодо відбору проб льоду, виготовлення зразків, їхньої підготовки до випробувань, а також до обладнання, проведення випробувань і обробки результатів наведено в Додатку 4 СНиП 2.06.04-82* /50/.

Після виготовлення зразків проводиться вимірювання їхніх розмірів і зважування на лабораторних вагах для визначення щільності льоду. У процесі випробувань зразків льоду на одновісне стиснення реєструється зусилля руйнування льоду силовим датчиком, а датчиком переміщень фіксується зміна висоти зразка в часі.

За допомогою елементарної залежності за результатами випробувань визначають міцність льоду на стиск:

$$R_c = F/S, \quad (3.2)$$

де: R_c – міцність зразка льоду на одновісне стиснення, МПа;

F – руйнівне зусилля в МН;

S – площа поперечного перерізу зразка в m^2 .

В результаті численних дослідів /47/ було встановлено, що міцність зразків льоду на одновісний стиск, орієнтованих перпендикулярно до площини намерзання

льоду, завжди більша за міцність зразків, орієнтованих паралельно до площини намерзання. Ці два параметри пов'язані між собою наступною нижче емпіричною залежністю:

$$R_c = \frac{R_c^\perp}{1,65} \quad (3.3)$$

Дослідження згинальної міцності крижаних полів можна здійснювати на дрібномасштабних зразках (див. рис. 3.7), які попередньо виготовляють із проб льоду, випиляних на всю товщину досліджуваного крижаного поля. При цьому можуть бути використані дві схеми. Відповідно до першої схеми, балка-зразок із поперечним розміром у вигляді прямокутника (приблизно $0,15 \times 0,1$ м) і довжиною $0,7 \div 0,9$ м встановлюється на дві опори (див. рис. 3.7).

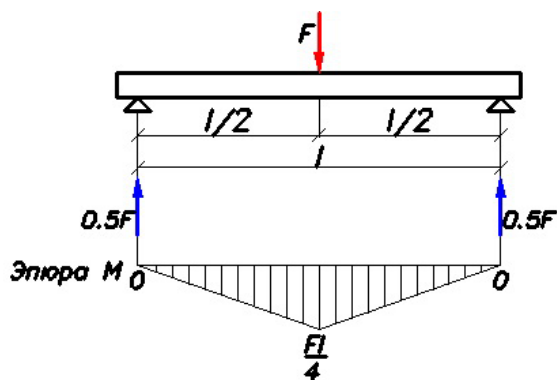
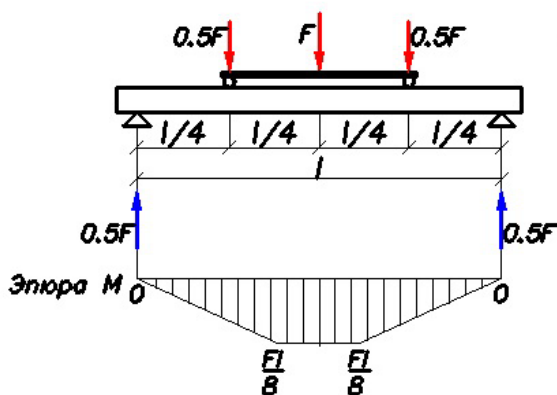


Рис. 3.7 Найпростіша схема випробувань дрібномасштабної балки на вигин

Руйнівна сила F прикладається по центру між опорами. Епюра згинального моменту матиме трикутний вигляд, і злам випробовуваної балки завжди відбуватиметься в точці прикладання сили. Недоліком такої схеми є зумовленість місця зламу балки, тобто балка буде ламатися не в найслабшому перерізі по її довжині, а завжди посередині.

Більш достовірні результати виходять, коли руйнівне зусилля передається через жорстку пластину, встановлену на балку через два шарніри (наприклад, через дві металеві трубки, див. рис. 3.8).

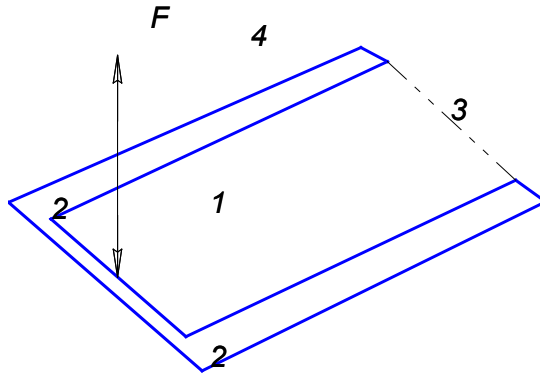


Мал. 3.8. Схема випробувань дрібномасштабних балок на вигин

У таких випадках балки руйнуються в найслабших перетинах між шарнірами, де згинальний момент буде постійним. Ці методи дослідження згинальної міцності льоду доволі прості й не потребують значних трудовитрат. Недоліками цих методів випробувань є той факт, що результати виходять дещо завищеними порівняно з випробуваннями консольних балок у рівних крижаних полях.

Як показала практика досліджень згинальної міцності в польових умовах, найточнішим методом є визначення згинальної міцності на великомасштабних консольних балках. Такі випробування проводять зазвичай або в пасивних припаях, або в умовах відкритого моря з бортів спеціалізованих суден. Проведення таких випробувань вимагає застосування спеціальної техніки і громіздкого експериментального устаткування. Схему консольної балки, випиленої на всю товщину крижаного поля, перед випробуваннями представлено на рис. 3.9. Залежно від конструкції експериментальної установки, руйнівне зусилля F може бути спрямоване або вгору, або вниз. Руйнування таких балок відбувається в їхній кореневій частині шляхом зламу. Товщина балок призначається виходячи з товщини льоду і,

зазвичай, становить близько шести товщин досліджуваного крижаного поля.



Мал. 3.9. Схема випробувань консольних балок у крижаному полі
1 - консольна балка; 2 - пропили; 3 - лінія зламу; 4 - рівне крижане поле

У процесі таких дослідів фіксують розміри балок і руйнівні моменти, за допомогою яких визначають зрештою згинальну міцність рівних крижаних полів. Далі, за відомою класичною залежністю визначається згинальна міцність льоду:

$$R_f = \frac{M}{W} = \frac{6M}{bh^2} \quad (3.4)$$

де M – добуток руйнівного зусилля F на довжину консольної балки (величина руйнівного моменту);

W – момент опору поперечного прямокутного прямокутного перерізу балки в місці зламу;

h – товщина льоду;

b – ширина балки.

Проте слід зазначити ще одну обставину, яка впливає на величину згинальної міцності під час випробувань консольних балок у натурних умовах. Оскільки рівні крижані поля мають градієнт температури за товщиною, то під час вигину балки зусиллям згори донизу (у цьому разі розтягується верхня поверхня балки) в зимові періоди року, вигинна міцність буде вищою за міцності за тих самих умов випробувань, якщо напрямок зусилля буде направлений догори. І в тому і в іншому випадках, для отримання більш достовірних результатів, величину сили зламу консольних балок слід коригувати виштовхувальною силою відповідно до закону Архімеда.

Завдяки результатам численних комплексних польових досліджень міцнісних властивостей рівних крижаних полів /50/, було встановлено емпіричну залежність між міцністю на вигин і міцністю зразків льоду на одновісний стиск:

$$R_f \approx 0,5 \cdot R_c. \quad (3.5)$$

Використання цієї залежності на практиці, відповідно до рекомендацій СНиП 2.06.04-82* /50/, дає змогу під час

проведення вишукувань у районах майбутнього будівництва обходиться лише результатами випробувань зразків льоду на одновісний стиск. Ця обставина істотно заощаджує час і кошти при проектуванні споруд у малодосліджених регіонах.

3.1.6 Метричні характеристики рівних крижаних полів

До основних метричних характеристик рівних крижаних полів належать їхні планові розміри та товщина. Планові розміри рівних крижаних полів залежать від кількох чинників. Насамперед, це тип припаю, в якому утворився рівний лід. Важливу роль відіграють міцнісні властивості і товщина рівного льоду на момент його відриву від берегів, а також стан схвильованої поверхні моря. Відомо, що руйнування припаю, що відірвався, на окремі крижини відбувається під впливом вітрових хвиль, зокрема й довгоперіодних. З цієї причини спостереження за розмірами крижин у районі майбутнього будівництва є одним із важливих завдань, яке необхідно вирішувати в процесі вишукувань. Сучасні методи моніторингу стану навколишнього середовища з космосу дають змогу регулярно одержувати таку інформацію в будь-якому районі замерзаючих морів.

Вперше для цієї мети на північно-східному узбережжі о. Сахалін використовувалися радіолокаційні станції, встановлені на березі.

Зростання товщини льоду протягом зимового періоду відбувається безперервно. На підставі даних натурних спостережень низка дослідників запропонували свої залежності з розрахунку товщини льоду з певним ступенем точності в тому чи іншому кліматичному регіоні. До однієї з перших таких залежностей належить пропозиція Стефана, яка базується на тому, що тепловий потік, який проходить через шар льоду, відповідає умові рівняння Фур'є:

$$\rho \lambda_1 dh = k\theta dt/h \quad (3.6)$$

де: ρ - щільність льоду;

λ_1 - прихована теплота плавлення;

k - коефіцієнт теплопровідності;

θ - температура повітря;

t - час замерзання в добах;

h - товщина льоду.

Вирішивши це рівняння, Стефан отримав просту і зручну, для використання в інженерній практиці, залежність розрахункової товщини льоду в сантиметрах від ве-

личини градусо-днів морозу (θt) в тому чи іншому кліматичному регіоні:

$$h = 3,4\sqrt{\theta t} \quad (3.7)$$

Слід зазначити, що ця залежність може бути успішно застосована в процесі проектування льодостійких гідротехнічних споруд при призначенні розрахункової товщини льоду, що піддаватимуться силовій дії рівних крижаних полів, що дрейфують, як на річках і озерах, так і в морях. При цьому необхідно використовувати низку спостережень за температурами повітря найближчої до місця будівництва метеостанції.

Відомим вченим Н.Н.Зубовим, який досліджував арктичні льоди [17], було запропоновано емпіричну залежність для розрахунку товщини льоду залежно від числа градусо-днів морозу:

$$h_i = -25 + \sqrt{(25 + h_b) + 8\theta t} \quad (3.8)$$

або

$$h_i^2 + 50h_i = 8\theta t \quad (3.9)$$

де $h_i = h_b + \Delta h$ (h_b – початкова товщина льоду; Δh – приріст товщини льоду).

Ці залежності дають змогу визначати товщину льоду, що наростає від моменту утворення, або приращення

льоду, що вже утворився. Чим більша початкова товщина, тим повільніше йде подальший процес зростання його товщини. Слід зазначити, що ці залежності справедливі за відсутності снігового покриву на льодових полях.

Точніше розрахункову товщину льоду можна призначити і на підставі багаторічної низки натурних спостережень за товщинами льоду безпосередньо в районах майбутнього будівництва. Таким чином, розрахункова товщина рівного крижаного поля є найважливішим параметром під час оцінювання величини льодових впливів на проєктовані річкові та морські гідротехнічні споруди (як портові, так і нафтогазопромислові), оскільки сила впливу рівних крижаних полів на гідротехнічні споруди лінійно залежить від розрахункової товщини льоду. Зниження цього параметра може призвести до аварії об'єкта, що проєктується, а завищення - до невиправданих капітальних вкладень.

3.2. Торосисті утворення

Практичний інтерес у світі морських гідротехніків до цього дивовижного природного утворення зріс під час проєктування морських нафтогазопромислових гідротех-

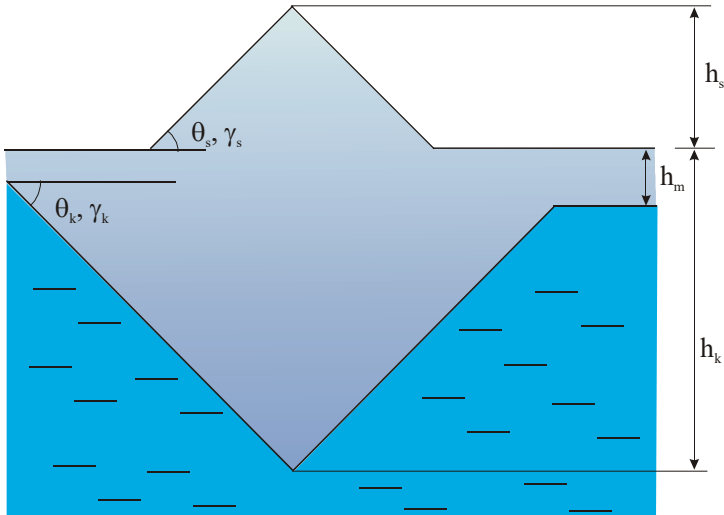
нічних споруд для облаштування родовищ вуглеводнів у замерзаючих морях. Перш ніж розробляти методи розрахунку льодових навантажень від дрейфуючих торосів на споруди континентального шельфу, дослідникам необхідно було одержати уявлення про будову й фізичні властивості як окремих торосів, так і полів торосіння.

Перші льодостійкі морські нафтогазопромислові гідротехнічні споруди були запроектовані та побудовані зарубіжними фахівцями, які заздалегідь всебічно і цілеспрямовано вивчали всі природні умови в районах майбутнього будівництва.

3.2.1 Метричні характеристики торосів

У процесі інженерних вишукувань у другій половині минулого століття проводили вивчення льодової обстановки і льодових утворень, що становлять реальну небезпеку для споруд, що проєктуються у різних замерзаючих морях. Обробка й аналіз даних натурних спостережень дали змогу встановити, що до основних метричних характеристик торосів (див. мал. 3.10), які необхідно враховувати під час розрахунку льодового навантаження на споруди, належать:

- а) товщина уламків льоду, що утворюють торос h_r , м;
- б) довжина уламків льоду, що складають торос l_r , м;
- в) висота надводної частини (вітрила) торосу h_s , м;
- г) товщина середньої консолідованої (змерзлої) частини торосу h_m , м;
- д) висота підводної частини (кіля) торосу h_k , м;
- е) пористість торосу p - відношення об'єму пустот до загального об'єму, виражене у відсотках, % ($p = V_p/V \cdot 100\%$).



Мал. 3.10. Ідеалізована схема будови одинокого торосу

Усі ці параметри залежать насамперед від кліматичних умов, розмірів рівних крижаних полів і процесу формування торосів, на які, своєю чергою, істотний вплив справляє географічне місце розташування району майбутнього будівництва. Важливим фактором, що впливає на обсяг пустот і стан торосу, є вік льодового утворення. Нині гідротехніки основну увагу приділяють однорічним торосам, які формуються й існують протягом тільки одного зимового сезону.

Першими дослідниками торосистих утворень в арктичних морях були канадські та американські вчені. У процесі цих досліджень було розроблено й апробовано відповідні методи вивчення торосистих утворень у натурних умовах. Поряд із досвідом проведення таких досліджень, як в умовах відкритого моря, так і на припаях, було вивчено механізми торосоутворення й отримано деякі закономірності у співвідношеннях розмірів частин торосистих утворень. Це дало змогу обчислювати розміри частин торосу в момент торосоутворення з урахуванням параметрів рівних крижаних полів, пористості торосу, міцності

і товщини льоду. Розміри торосів /73/, залежать від товщини рівних крижаних полів, з яких вони формуються. Відношення висоти торосу до товщини уламків льоду значно зростає зі збільшенням товщини крижаних полів, що беруть участь у процесі торошіння. При досягненні висоти вітрила і кіля своїх граничних значень відбувається подальше утворення полів торошіння. Особливу значущість мають дослідження морфології надводної частини торосів (Tucker W.B., Govoni J.W./81/). Ці вчені, на підставі результатів польових досліджень 30 торосів, що знаходились на відстані 30÷200 км від узбережжя Аляски, встановили емпіричну залежність висоти надводної частини торосу від середньої товщини уламків, що складають торос:

$$h_s = 3,69 \sqrt{h_r}, \quad (3.10)$$

де: h_s – висота надводної частини торосу;

h_r – товщина уламків льоду, що складають торос.

Таким чином, при прагненні товщини уламків до 0 висота надводної частини також стає нульовою. Крім цього, було встановлено, що для льоду завтовшки від 0,2 до 0,3 м відношення висоти надводної частини до товщини уламків коливалося від 6 до 15, а за товщини льоду до 1 м - від 2 до 5, що якнайкраще узгоджується з такою залежністю:

$$h_s = 4,23 \sqrt{h_r}, \quad (3.11)$$

Крім цього дослідники додатково вивели цілу низку емпіричних залежностей: ширини торосу від середньої товщини уламків льоду, що складають тіло торосу; висоти надводної частини торосу від ширини; площі поперечного перерізу надводної частини торосу від товщини уламків; площі уламків від їхньої товщини. Результати цих робіт /74, 82/ дали змогу отримати уявлення про розміри натурних торосів за допомогою вивчення тільки їхньої надводної частини (вітрила).

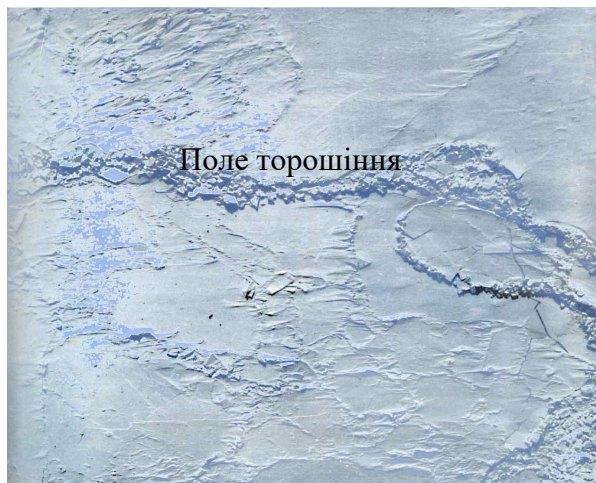
Чималий внесок у вивчення натурних торосів зробили дослідники Фінляндії, які більшість своїх робіт проводили як в умовах Балтійського моря, так і на шельфі замерзаючих морів Росії. Дослідження торосистих утворень в Охотському морі було розпочато спільними експедиціями радянських і японських вчених. Було також встановлено, що точна величина відношення розмірів кіля до вітрила залежить від щільності крижаних уламків і пористості тіла торосу. Крім топографічної зйомки надводної частини торосів, застосовувалося водолазне обстеження з картографуванням кілів торосистих утворень. Визначення пористості частин обстежуваних торосів здійснювалося за до-

помогою наскрізного буріння вертикальних свердловин по всій висоті. Ці дослідження дали змогу встановити, що середнє значення пористості вітрила, в обстежених торосах, дорівнювало 19%, а кіля 29%.

У колишньому Радянському Союзі в 1982 року, за участю автора, уперше було організовано та проведено комплексну науково-дослідну експедицію для вивчення льодової обстановки та льодових утворень в Охотському морі в районі розвіданих родовищ вуглеводнів на східному шельфі о. Сахалін. Під час роботи цієї експедиції з борту криголама "Єрмак" досліджувалися як рівні крижані поля, так і окремі тороси та поля торошіння /33/.

Технічні можливості цього криголама дали змогу обирати важкодоступні місця для проведення натурних досліджень, наприклад, на стиках рівних крижаних полів з поодинокими торосами та полями торошіння. Саме в цих місцях досліджувалися метричні характеристики надводних (вітрильних частин) торосистих утворень за допомогою фототеодолітної зйомки. На рис. 3.11 представлені фотографії торосистих гряд в Охотському морі, зафіксовані з борту літака - льодового розвідника і з борту криголама "Єрмак" у березні 1982 р.

а) аерофотографія поля торошіння



б) надводна частина поля торошіння



Рис. 3.11. Поля торошіння в Охотському морі

Як видно зі знімків, довжини торосистих гряд (полів торошіння) можуть сягати кількох сотень метрів, їхня ширина перевищує кілька десятків метрів, а висота надводної частини дрейфуючих торосів може становити понад 5 м. При цьому, як показали численні результати натурних спо-

стережень, виконаних як у Радянському Союзі, так і за кордоном, кільова (підводна) частина торосів дорівнює приблизно $5 \div 6$ висотам надводної (вітрильної) їхньої частини.

Обробка польових матеріалів фототеодолітної зйомки, виконаної в Охотському морі з борту криголама "Ермак" /33/ біля північно-східного узбережжя о. Сахалін, дала змогу отримати дані про висоту надводної частини торосів, їхній формі та розмірах уламків льоду, що складають тороси.

На підставі аналізу результатів натурних спостережень (в Охотському, Карському і Баренцевому морях), було встановлено, що:

а) товщина середньої консолідованої частини торосу перебуває в певному співвідношенні з товщиною рівного крижаного поля, що оточує торосисті утворення $h_m \cong (1,5 \div 2)h_d$;

б) висота підводної частини торосу залежить від висоти вітрила $h_k \cong 5h_s - h_m$;

в) товщина уламків льоду, що складають тіло торосу на момент, коли торосу або полю торосіння притаманні максимальні значення метричних і міцнісних характеристик, перебуває в приблизному співвідношенні з товщиною рівного крижаного поля, що оточує торос $h_r \cong 0,8h_d$.

Завдяки розробленню та впровадженню методу термічного буріння фахівцями інституту "Сахалін-НІПморнафта" було отримано цінну інформацію про торосисті утворення і, зокрема, про пористість їхньої надводної, середньої та підводної частин. Відповідно до результатів польових досліджень, середня пористість надводної частини торосів становила близько 20%, а кильової - 30%.

Очевидно, що вплив таких складних природних утворень на морські гідротехнічні споруди, підводні трубопроводи і комунікації призведе до виникнення значних льодових навантажень. Ці навантаження можуть стати причиною аварій морських нафтогазопромислових гідротехнічних споруд, що тягнуть за собою важкі екологічні наслідки в цілих регіонах. Тому завдання інженерів-гідротехніків полягають у тому, щоб у процесі проектування таких споруд провести розрахунки льодових навантажень на них за різних сценаріїв, що враховують цілу низку супутніх природних чинників. До них слід віднести коливання рівня води, швидкість і напрямок дрейфу торосів від спільного впливу вітру і течій, а також метричні і міцнісні характеристики розрахункового торосистого утворення в районі майбутнього будівництва.

3.2.2 Інтегральна міцність торосистих утворень

Розрахунки льодових навантажень на гідротехнічні споруди, що проектуються на навантаження від дрейфуючих торосистих утворень вимагають інформації про їхню міцність. Таким параметром є інтегральна міцність. Інтегральна міцність торосів залежить від міцності уламків рівних крижаних полів, що складають тороси, і від кількості пустот (пористості) між цими уламками.

Як уже зазначалося вище, торосисті утворення складаються з трьох частин, які перебувають у різних умовах. Так, пори між змерзлими уламками льоду надводної частини торосів заповнені повітрям. Перебуваючи під прямим впливом сонця, з часом ці уламки крижаних полів втрачають розсіл. Їхня температура після утворення торосу стає значно нижчою, ніж температура уламків середньої і кільової частин торосу, стаючи рівною температурі повітря. Проте, міцність зразків льоду на одновісне стиснення з вітрила торосів нижча порівняно з аналогічною міцністю зразків із середньої консолідованої частини або з рівних крижаних полів, що оточують тороси.

У процесі торосоутворення, пори між уламками льоду в середній і кільовій частинах торосів, заповнюють-

ся водою. Причому в середній частині торосів відбувається інтенсивне замерзання води між уламками. У кільовій частині ж торосів вода в порах промерзає лише частково. У другій експедиції в Охотському морі на криголами "Ермак" були відібрані проби льоду з кільової частини торосу /20/. З цих проб були виготовлені й випробувані на одинісний тиск зразки льоду. Порівняння результатів дослідів показало, що міцність цих зразків була в $3 \div 4$ рази нижчою за міцність зразків, виготовлених з рівного льодового поля, що оточує торос. Таким чином, інтегральна міцність кожної з частин торосистих утворень суттєво відрізняється. Ця відмінність залежить від міцності уламків льоду і від пористості кожної з частин, яка за результатами натурних досліджень виявилася різною по висоті торосів. З цієї причини вивченню інтегральної міцності торосів була приділена увага багатьох вчених.

В натурних умовах вивчали інтегральну міцність моделей надводної частини торосів, які створювали з уламків льоду в спеціальній опалубці кубічної форми. Пористість кожного зі зразків попередньо фіксували. Руйнування зразків-фрагментів надводної частини моделі торосу здійснювалося за допомогою спеціальної експериментальної установки /19/ (див. рис. 3.12).



Рис. 3.12. Випробування зразків льоду з надводної частини моделі торосу

Після руйнування фрагментів надводної частини торосів визначали міцність зразків на одновісне стиснення, виготовлених з уламків льоду, що формують торос. Такий підхід до оцінки інтегральної міцності частин торосистого

утворення через міцність уламків льоду на одноосьове стиснення, дав змогу доволі просто визначати цей важливий параметр в натурних умовах під час проведення інженерних вишукувань у районах майбутнього будівництва. Величина інтегральної міцності використовується для оцінки льодового навантаження на морські гідротехнічні споруди в процесі їх проєктування.

3.2.3 Дослідження міцнісних властивостей зразків льоду з різною пористістю в лабораторних умовах

У лабораторних умовах технічного центру Фінляндії VTT спільно з російськими дослідниками вивчався вплив пористості на міцність зразків льоду на одновісне стиснення. Виявлення такої закономірності було можливе лише експериментальним шляхом [76, 77, 78]. Як показав аналіз результатів дослідів зі зразками льоду, у яких пористість не перевищувала 3%, їхня міцність незначною мірою відрізнялася від міцності зразків льоду із природною пористістю в цьому ж діапазоні. Ця відмінність перебувала в межах точності вимірювань. Слід зазначити,

що такий відсоток пористості притаманний саме середній консолідованій частині торосів, сформованих у морі, де наявність пір між уламками льоду пов'язана тільки з вмістом повітря або розсолу. Результати випробувань зразків на одновісне стиснення з пористістю від 0% до 15% не розходилися з даними роботи /68/, в якій шведські дослідники у співпраці з колегами з Гельсінського Технічного Університету вивчали вплив природної пористості льоду на його міцність за одновісного стиснення під час експедиції на криголамах в Ботнічній затоці Балтійського моря.

3.2.4 Дослідження міцнісних властивостей консолідованої частини моделей торосів в натурних умовах

Дослідження властивостей міцності середньої консолідованої частини торосу проводили на одному з прісноводних озер ближнього Підмосков'я. З метою створення моделі консолідованої частини поля торосіння, з різною пористістю, у рівному крижаному покриві прісноводного озера випилювали квадратну ділянку з плановими розмірами 1,3x1,3 м (рис. 3.13). Випилянну крижину розрізали на окремі блоки льоду, які витягали на поверхню крижано-

го покриву і потім руйнували на окремі уламки льоду різних розмірів (рис. 3.14). Після очищення поверхні майни від снігу і дрібних осколків льоду, її об'єм заповнювали уламки льоду, які розміщувалися в хаотичному порядку. Далі відбувалося змерзання уламків льоду і повне промерзання міжуламкового, заповненого водою, простору під впливом негативних температур у природних умовах. Таким чином, у крижаному покриві озера створювали моделі консолідованої частини полів торошіння з пористістю близькою до 0%.

Під час виготовлення моделей торосів із планованою пористістю майна випилювалася не на повну товщину крижаного покриву (рис. 3.15). Подальше заповнення майни відбувалося насухо. При цьому між уламками льоду шарово укладали водонепроникні, заповнені повітрям запечатані пакети з водонепроникного паперу розміром 7x7x10 см. Після укладання уламків льоду і пакетів у майну здійснювалося їх попереднє змочування переохолодженою водою для повного змерзання льоду з пакетами (рис. 3.16). Потім, у днищі майни пробивався отвір, вода заповнювала порожнечі між уламками льоду і пакетами. Таким методом створювалися моделі консолідованої частини

полів торшіння з різною пористістю від 0% до 22%. Моделі такого типу створювалися на початку січня місяця, коли товщина крижаного покриву озера досягала 0,5 м. При цьому період їх проморожування становив приблизно 1,5 місяця до початку проведення експериментів.



Рис.3.13. Майна для формування середньої частини торосу з нульовою пористістю



Рис. 3.14 Руйнування блоків льоду на уламки.



Рис. 3.15. Формування середньої частини торосу із заданою пористістю



Рис. 3.16. Влаштування середньої частини моделі торосу із заданою пористістю

Паралельно з цим досліджували міцність зразків льоду на одновісний тиск, виготовлених із проб природного крижаного покриття озера.

Виходячи з аналізу експериментів на прісноводному озері /59, 60, 76, 77, 78/, було встановлено, що характеристики міцності середньої (консолідованої) частини торосів

і рівного крижаного поля, яке оточує торос, за відносно невеликої пористості (що не перевищує 3%) в натурних умовах, з інженерної точки зору, практично однакові.

Результати експериментальних досліджень, виконаних на о. Сахалін, у лабораторних умовах у Фінляндії, на прісноводному озері, а також інших дослідників /68, 70/ було узагальнено. Це дозволило отримати емпіричну залежність коефіцієнта, що враховує зниження інтегральної міцності всіх частин торосистого утворення від збільшення пористості (рис. 3.17).

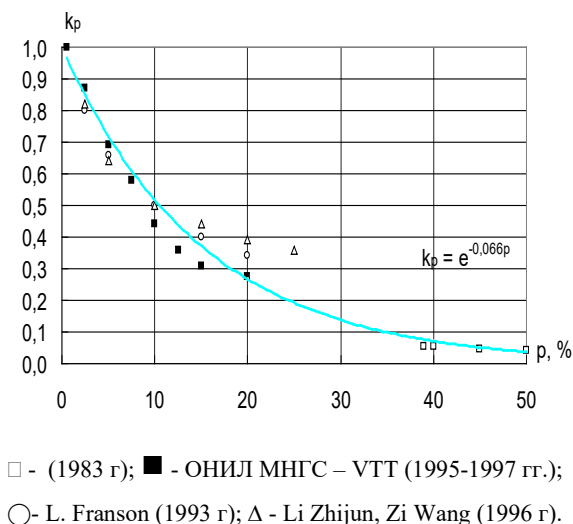


Рис. 3.17. Залежність коефіцієнта, що знижує інтегральну міцність торосів від пористості

Апроксимація дослідних даних привела до такого виразу:

$$k_p = e^{-0,066p}, \quad (3.12)$$

де p – пористість тієї чи іншої частини торосу в процентному відношенні.

Коефіцієнт k_p враховує відношення інтегральної міцності тієї чи іншої частини торосу до міцності уламків льоду з цієї частини на одновісний тиск.

Таким чином, виходячи з емпіричної залежності (3.12) для кожної з частин торосу можна записати:

$$k_p = R_s/R_{cs} = R_m/R_{cm} = R_k/R_{ck}. \quad (3.13)$$

де R_s – інтегральна міцність надводної частини торосу;

R_{cs} – міцність зразків льоду на одновісне стиснення з уламків льоду надводної частини торосу;

R_m – інтегральна міцність середньої, консолідованої частини торосу;

R_{cm} – міцність зразків льоду на одновісне стиснення із середньої частини торосу;

R_k – інтегральна міцність кільової частини торосу;

R_{ck} – міцність зразків на одновісне стиснення з уламків підводної частини торосу.

Слід зазначити, що ця емпірична залежність (3.20) справедлива для тих випадків, коли пористість торосистого утворення перебуває в межах $0\% < p < 50\%$.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛЬДОВИХ ВПЛИВІВ

Льодові навантаження на гідротехнічні споруди значно перевищують навантаження від вітрових хвиль. З цієї причини під час проектування огорожувальних і морських нафтогазопромислових гідротехнічних споруд (МНГС), що експлуатуватимуться в умовах відкритого моря, розрахункам льодових навантажень приділяється особлива увага. Чинні у світі нормативні документи з розрахунку льодових навантажень не враховують усього розмаїття розрахункових сценаріїв, що можуть реалізуватися в процесі терміну служби споруд на континентальному шельфі, різних конструктивних типів. Різноманітність конструктивних форм опорних частин морських кригостійких платформ, а також типів крижаних утворень потребують проведення спеціальних експериментальних досліджень, як у лабораторних умовах, так і великомасштабних в натурних умовах у процесі проектування. Така практика наукового супроводу проєктів давно існує в кораблебудуванні.

4.1 Лабораторні дослідження

Вперше такого роду дослідження були проведені в царській Росії на початку минулого століття під час проектування першого криголама "Єрмак". Такими експериментами керував знаменитий російський корабель академік Крилов О.М., який на підставі аналізу дослідів виявив найоптимальнішу форму корпусу майбутнього криголама. Дослідження також показали, що для проведення модельних льодових експериментів необхідно створювати модельний лід, характеристики міцності якого були б значно нижчими, ніж у натурного льоду. З цієї причини модельований лід створювався з розчину кухонної солі NaCl.

У Радянському Союзі, в Ленінграді, в Арктичному й Антарктичному НДІ, у 1955 році було створено дослідний льодовий басейн, де проводили експериментальні дослідження взаємодії крижаних утворень із моделями проєктованих суден (див. рис. 4.1). Значно пізніше в цьому басейні було розпочато аналогічні дослідження з моделями плаваючих та стаціонарних морських нафтогазопромислових гідротехнічних споруд. Перерахунок результатів модельних експериментів на натуру вимагав розроблення відповідних критеріїв подібності (модельован-

ня), які були розроблені академіком Ю.А. Шиманським і професором Л.М. Ногідом. Основними критеріями, яких слід дотримуватися в лабораторних умовах, є:

$$\text{- Фруда } Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (4.1)$$

де v – характерна швидкість процесу, м/с;

L - характерна довжина, м;

$$\text{- Коши } Ch = \rho \left(\frac{v^2}{E} \right) \quad (4.2)$$

де ρ – щільність середовища, г/см³;

E – модуль пружності середовища, МПа.

Дотримання цих критеріїв призводить до таких співвідношень між натурними і модельними характеристиками:

$$\frac{h_{dn}}{h_{dm}} = \lambda, \quad (4.3)$$

де h_{dn} - товщина натурального льоду, м;

h_{dm} - товщина модельного льоду, м.

$$\frac{v_n}{v_m} = \sqrt{\lambda}, \quad (4.4)$$

де v_n - швидкість руху натурального льоду, м/с;

v_m - швидкість руху модельного льоду або моделі, м/с.

$$\frac{R_{fn}}{R_{fm}} = \frac{R_{cn}}{R_{cm}} = \frac{E_n}{E_m} = \lambda, \quad (4.5)$$

де R_{fn} , R_{cn} , E_n - відповідно міцність на вигин, одновісний стиск і модуль пружності натурального льоду;

R_{fm} , R_{cm} , E_m - відповідно міцність на вигин, одновісний стиск і модуль пружності модельного льоду.

У міру збільшення кількості льодових басейнів у різних країнах, виникла необхідність стандартизації методів проведення в них випробувань. З учасників Міжнародної конференції льодових басейнів було утворено льодовий комітет, який здійснював координацію льодових досліджень, розробив стандарти для визначення фізико-механічних властивостей натурального і модельованого льодів та відповідні методики.

Льодовий басейн був також побудований і в ЦНДІ ім. О.М.Крилова в Санкт-Петербурзі (див. фото на рис. 4.2).



Рис. 4.1. Льодовий басейн ААНДІ



Рис. 4.2. Льодовий басейн ЦНДІ ім. О.М.Крилова в Санкт-Петербурзі

У таких льодових басейнах можна проводити лабораторні дослідження не тільки проєктованих суден, а й гідротехнічних споруд різного призначення і конструктивних типів на предмет вивчення силового впливу дрейфуючих крижаних утворень. І в першому, і в другому випадках такі дослідження проводяться в процесі наукового супроводу реальних проєктів. Основною перевагою таких експериментів є керованість температурними режимами і зручністю проведення дослідів в комфортних умовах порівняно з експериментами в натурних умовах.

4.2 Великомасштабні експериментальні дослідження силового впливу крижаних полів і полів торошіння

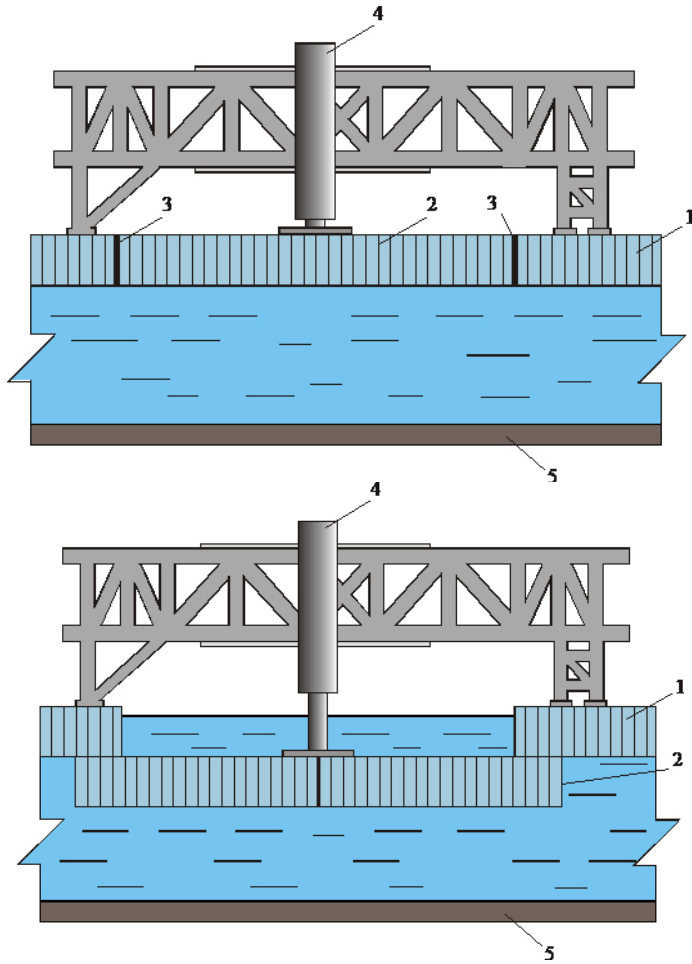
Великомасштабні дослідження силового впливу крижаних утворень на моделі опор гідротехнічних споруд проводилися в натурних умовах у процесі розроблення відповідних методів розрахунку льодових навантажень. У колишньому Радянському Союзі такі дослідження були розпочаті вперше фахівцями сектору льодових досліджень Галузевої науково-дослідної лабораторії морських нафтогазових промислових гідротехнічних споруд імені М.М. Джунковського Московського інженерно-будівельного ін-

ституту в затоках Охотського моря в північній частині о. Сахалін.

4.2.1 Метод створення поля торошіння

Великомасштабні експерименти по взаємодії моделей рівних крижаних полів і полів торошіння з моделями циліндричних опор споруд континентального шельфу проводили в рівному природному крижаному полі на акваторії порту Москальво, що в бухті Байкал Сахалінської затоки Охотського моря. У природному рівному крижаному покриві влаштовували штучні крижані басейни. Спочатку на поверхні крижаного покриву випилювалися прямокутні крижини з плановими розмірами 6x8 м. За допомогою спеціальної установки /23/, яка була забезпечена вертикальним гідроциліндром, випиляна крижина затоплювалася під нижню кромку крижаного покриву і поверталася по горизонту приблизно на 45°. Далі крижина звільнялася від вертикального зусилля і під впливом виштовхувальної сили притискала до нижньої площини крижаного покриву.

Таким чином, у природному рівному крижаному полі створювали штучні басейни з глибиною, що залежала від товщини природного крижаного покриву (рис. 4.3).



Мал. 4.3. Влаштування льодових басейнів у натурному рівному крижаному полі

- 1 - рівне крижане поле; 2 - випиляна в полі крижина;
- 3 - пропили; 4 - експериментальна установка з вертикальним гідроциліндром; 5 - дно.

Оскільки такі басейни готувалися наприкінці лютого, то товщина льоду в цей період року в умовах північної частини острова Сахаліну зазвичай перевищувала 1 м. Щоб приступити до виготовлення моделі поля торошіння в таких басейнах, необхідно було мати у своєму розпорядженні достатню кількість уламків льоду рівного крижаного поля. Товщина рівних крижаних полів, а отже й уламків льоду, перебувала в межах від 0,06 м до 0,12 м. Під впливом негативних температур повітря, яка в нічні години знижувалася іноді до -35°C , для формування рівного льоду в льодовому басейні заданої товщини було потрібно приблизно близько 36 годин.

Наморожене таким чином у басейні рівне крижане поле руйнувалося на уламки з плановими розмірами приблизно 0,5х0,5 м. Потім уламки льоду витягали з басейну, складали по його периметру басейну і витримували в повітряному середовищі з метою їхнього зміцнення. Слід зазначити, що за такої технології виготовлення уламків льоду майбутнього поля торошіння, в них відбуваються аналогічні структурні зміни, що і під час формування надводної частини торосу в натурних умовах.

Після того як по периметру басейну накопичувалася достатня кількість льодових пластин, приступали до створення моделі поля торошіння. Попередньо льодовий басейн перегороджували металевою сіткою для утворення двох рівних за площею відсіків із розмірами 3х4 м. Один із

відсіків хаотично заповнювався уламками льоду на всю глибину басейну (до поверхні затопленої крижини). При цьому розміри уламків льоду за довжиною змінювалися в середньому від 100 до 400 мм. Надводну частину моделі поля торосіння, після її формування, поливали водою. Тим самим створювалися аналогічні умови процесу формування торосів у природі. Далі модель торосу піддавалася впливу природного добового ходу негативних температур, притаманного для зимового періоду північної частини о. Сахалін. Одночасно в суміжному другому відсіку льодового басейну відбувалося намерзання рівного крижаного поля рис. 4.4.

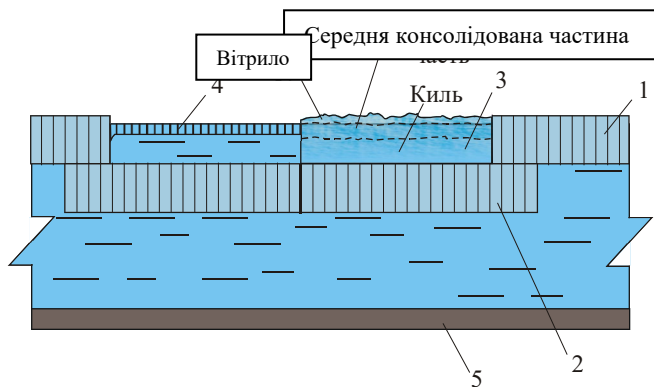


Рис. 4.4. Створення моделі поля торосіння і рівного крижаного поля в штучному льодовому басейні

1 - природний крижаний покрив; 2 - затоплена крижина; 3 - модель поля торосіння ; 3 - модель поля торосіння; 4 - рівне крижане поле; 5 - дно.

Залежно від характеру добового ходу температур повітря, процес формування поля торошіння і рівного крижаного поля в одному басейні тривав у середньому в проміжку від 36 до 72 годин. Під час цього процесу здійснювався контроль над тим, щоб товщина рівного крижаного поля не перевищувала товщини уламків льоду поля торошіння, а товщина середньої консолідованої змерзлої частини торосу не перевищувала 1,5 товщини рівного крижаного поля. Останнє співвідношення, як показали натурні спостереження /18, 19, 51/, притаманне торосам Охотського моря. Швидкість намерзання, у разі необхідності, регулювали застосуванням теплоізоляційного матеріалу, який укладали на той чи інший вид моделі льодового утворення в штучному басейні. Цей метод створення моделі поля торошіння був захищений авторським свідоцтвом СРСР /44/. Впровадження цього методу в натурних умовах було здійснено в зимові періоди 1983÷1985 рр. /19, 20, 21/.

4.2.2 Методика проведення великомасштабних дослідів

Дослідження взаємодії полів торощіння з циліндричними перешкодами здійснювалося шляхом проведення великомасштабних експериментів у натурних умовах за такою методикою. Після приготування моделі поля торощіння і рівного крижаного поля в майні влаштовували два прорізи для того, щоб у них по черзі можна було розташувати модель циліндричної перешкоди. Моделі циліндричної форми виготовляли з металевих труб різних діаметрів із відповідним внутрішнім конструктивним посиленням. Спеціальна експериментальна установка /24/ насувалася на майну таким чином, щоб рухома ферма з кріпильною траверсою розташовувалася над прорізом. Схема експериментальної установки представлена на рис. 4.5.

Силова частина експериментальної установки була електрогідравлічною. Гідроциліндр був здатний розвивати зусилля 0,5МН (50 т.с.). До рухомої ферми на спеціальних фланцях по черзі кріпилися досліджувані моделі опорних частин споруд.

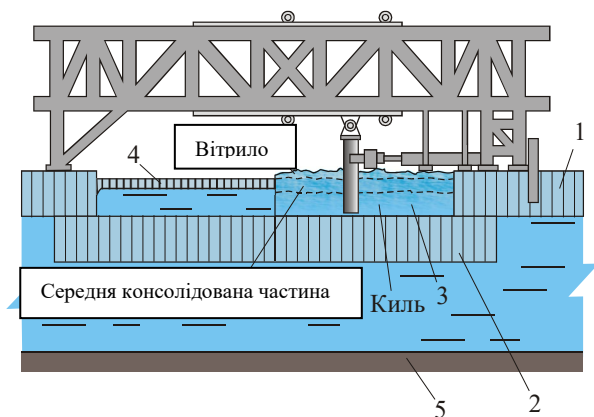


Рис. 4.5. Схема експериментальної установки

1 - природний крижаний покрив; 2 - затоплена крижина; 3 - модель поля торшіння; 4 - рівне крижане поле; 5 - дно.

Силовa частина експериментальної установки була електрогідравлічною. Гідроциліндр був здатний розвивати зусилля 0,5МН (50 т.с.). До рухомої ферми на спеціальних фланцях по черзі кріпилися досліджувані моделі опорних частин споруд. Реєстрація сумарного льодового навантаження на модель здійснювалася за допомогою силового датчика ДСТ-50. Пересування моделі в процесі дослідження фіксували за допомогою датчика переміщення, який кріпили на рухомій фермі. Реалізації датчика переміщень і льодового навантаження фіксувалися на осцилограмі світлопроменевого осцилографа в часі.

Досліди проводилися в певній послідовності. Спочатку експериментальну установку виставляли в необхідне

положення над частиною льодового басейну з рівним крижаним полем. Після встановлення силових датчиків та датчиків переміщення, моделлю циліндричної перешкоди прорізували рівне крижане поле. У процесі кожного дослідження фіксувалося льодове навантаження в часі. Далі експериментальну установку виставляли над моделлю поля торошіння. Після аналогічної підготовки проводили дослід із прорізанням поля торошіння моделлю циліндричної опори того самого діаметра з реєстрацією льодового навантаження. Слід зазначити, що в обох дослідях довжина прорізання і рівного крижаного поля, і поля торошіння в середньому не перевищувала 1 м. Після закінчення дослідів з непорушеної частини рівного крижаного поля відбирали проби льоду, з яких готували зразки, орієнтовані паралельно площині намерзання. Зразки льоду випробовували на одновісне стиснення.

Ця методика дала змогу згодом порівнювати дослідні значення льодового навантаження від рівного льодового поля з розрахунковим за рекомендаціями норм /50, 12/, а також дослідним шляхом отримувати значення коефіцієнта торосистості. При цьому льодове навантаження від поля торошіння, зафіксоване в досліді, відносили до дослідного навантаження від рівного крижаного поля на модель циліндричної перешкоди того ж самого діаметра.

У процесі експериментальних досліджень проводилося також оцінювання внеску кожної з частин поля то-

рошіння (вітрила, середньої консолідованої частини та кіля) в сумарне льодове навантаження на жорстку вертикальну циліндричну перешкоду, що неможливо здійснити в натурних умовах. Методика проведення таких дослідів полягала в тому, що модель поля торошіння прорізалася циліндричною перешкодою тричі. Перший раз прорізали поле торошіння відразу ж після його формування в майні, коли уламки льоду були в немерзлому стані. Другий раз після закінчення процесу формування змерзлої, консолідованої частини торосу. І, нарешті, втретє, після того, як біля поля торошіння попередньо руйнувалася і видалялася з поверхні надводна частина торосу. Як і в попередніх дослідях, у кожному з них реєстрували сумарне льодове навантаження, а також переміщення моделі в часі. Зіставлення зафіксованих у таких дослідях льодових навантажень дало змогу оцінити надалі внесок кожної з частин поля торошіння в сумарне льодове навантаження. На рис. 4.6 представлено фотографію експериментальної установки, за допомогою якої дослідним шляхом досліджувалося льодове навантаження на моделі циліндричних перешкод різних діаметрів при впливі на них рівних крижаних полів і полів торошіння.

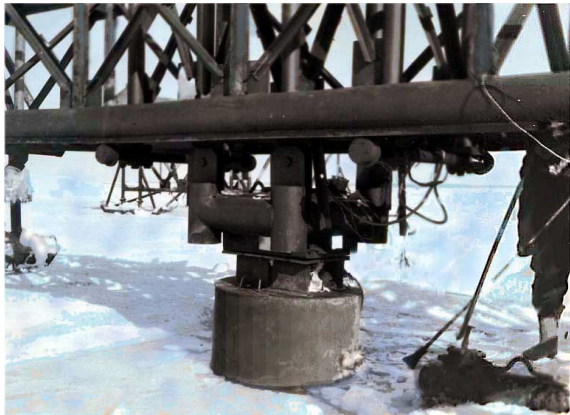


Рис. 4.6. Досліди з моделлю циліндричної прегради діаметром 1,02 м

Таким чином, результати великомасштабних дослідів у натурних умовах за допомогою спеціальних експериментальних установок дають змогу отримати відповіді на цілу низку запитань, що виникають у процесі проекту-

вання льодостійких гідротехнічних споруд. Слід зазначити, що такі експериментальні дослідження є досить дорогими, трудомісткими і цілком залежать від погодних умов.

4.3. Експериментальні дослідження локального льодового тиску

Розроблення рекомендацій щодо розрахунків локального тиску льоду потребувало проведення цілеспрямованих експериментів в натурних умовах. Ці дослідження проводилися протягом декількох зимових періодів за фінансової підтримки і безпосередньої участі доктора технічних наук Фінляндії Tuomo Karna /22, 32, 59, 60, 80/.

4.3.1 Методика проведення дослідів

Експерименти з дослідження локального тиску льоду проводилися в природних умовах на пресно-новодному озері протягом декількох зимових періодів. В якості льодових утворень використовувався натурний крижаний покрив озера та моделі консолідованої частини торосів із різною пористістю. Під час проведення дослідів з вдавненням жорсткого штампу в моделі консолідованої частини торосу з різною пористістю використовувалася пересувна експериментальна установка, оснащена вантажопідйомним

пристроєм. Загальний вигляд установки представлено на рис. 4.7.



Рис. 4.7. Загальний вигляд експериментальної установки

Експериментальна установка за допомогою металевих лиж могла легко пересуватися по льдовому покриву озера. Основним її призначенням було переміщення і фіксація у вихідне (початкове) положення гідравлічного циліндра (рис. 4.8).

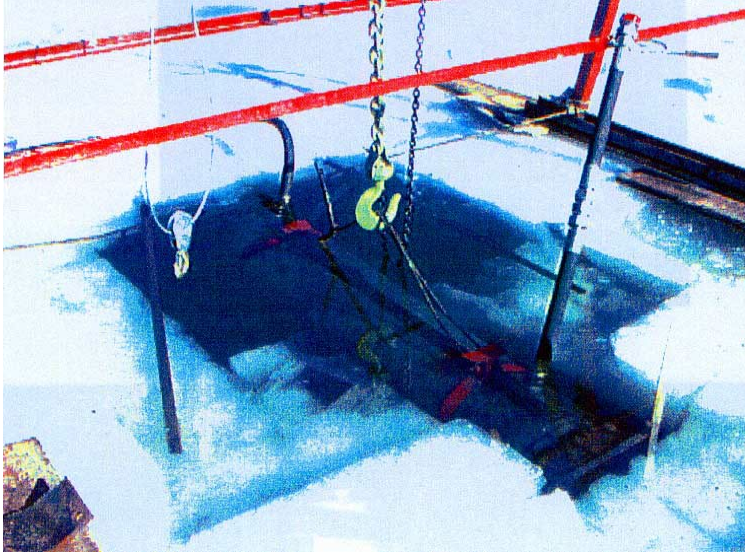


Рис.4.12. Встановлення гідроциліндра в робоче положення

Гідравлічний циліндр за допомогою системи гнучких шлангів високого тиску з'єднувався з електрогідравлічною станцією, розташованою на березі. Енергопостачання гідроприводу забезпечувалося пересувною електро-станцією. На штоку гідроциліндра послідовно кріпилися жорсткі штампи з різними розмірами (0,1×0,1 м; 0,25×0,15 м та 0,4×0,4 м), а на торці опорна плита посиленої жорсткості. Жорсткість штампів і опорної плити унеможлилювала їхні деформації в процесі дослідів.

Після досягнення повної консолідації моделі торосу і його промерзання на всю товщину крижаного покриву перед моделлю вирізали наскрізний отвір прямокутної форми для розташування в ньому гідроциліндра з жорстким штампом на штоку та опорної плити в торці циліндра (див. мал. 4.11 і 4.12). Площа тилової опорної плити приблизно в 2,5 раза перевищувала площу жорсткого штампа. Пересувну експериментальну установку з гідроциліндром виставляли над прорізом у потрібне, для кожного з дослідів, планове положення. Далі, за допомогою вантажопідйомного пристрою гідроциліндр, із зафіксованим на його штоку жорстким штампом і опорною плитою, занурювали у воду, корегували в необхідне планово-висотне положення. Попередній розпір гідроциліндра здійснювали так, щоб лицьова частина жорсткого штампа безпосередньо стикалася з моделлю торосу, а тилова опорна плита з торцем прорізу в рівному крижаному полі. Після закріплення датчика переміщення, попереднього ввімкнення виміральної апаратури, здійснювали запуск гідросистеми і жорсткий штамп на штоку гідроциліндра втілювали в модель консолідованої частини торосу. У процесі кожного з дослідів на осцилограмі світлопроменевого осциллографа фіксувалося льодове навантаження на штамп, а також його

переміщення в часі. Після дослідів по втіленню жорсткого штампа в моделі торосів і в природний крижаний покрив проводили серії випробувань зразків льоду на одновісне стиснення.

5. МЕТОДИ РОЗРАХУНКІВ ЛЬДОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ

5.1 Навантаження від обмерзання

5.1.1 Навантаження від атмосферного обмерзання

Базовим параметром для розрахунку нормативних навантажень від атмосферного обмерзання є нормативна товщина ожеледиці (b_n) щільністю $0,9\text{г/см}^3$, приведена до періоду повторення 10 років. За цим базовим показником складаються карти кліматичного районування, що містяться в СНиП 2.01.07-85 /50/. Так, наприклад, така карта для Карського моря представлена на рис. 5.1, а для Чорного й Азовського морів, відповідно до рекомендацій нормативного документа України /15/, - на рис. 5.2.

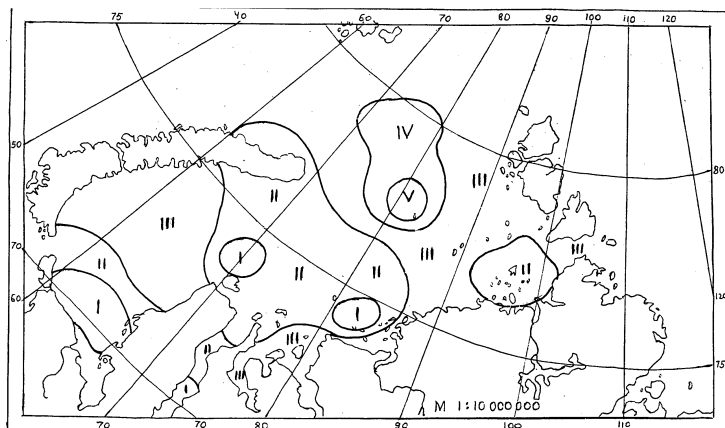


Рис.5.1. Райони нормативної товщини стінки ожеледиці

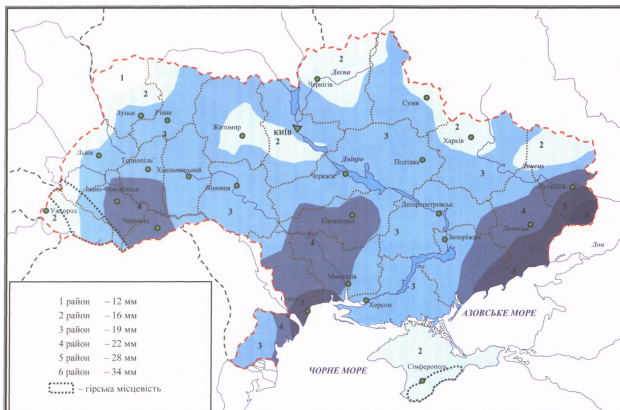


Рис. 5.2. Карта районування території України за характеристичним значенням товщини стінки ожеледиці

У таблиці 5.1 подано вихідні дані з довірчими інтервалами для нормованого показника за кожним районом.

Таблиця 5.1

Райони нормативної товщини стінки ожеледиці повторюваністю 1 раз на 10 років

Номер району	$b_{н}, \text{мм}$	$\Delta b_{н}, \text{мм}$	$b_{н} - b_{к}, \text{мм}$
I	≤ 5	—	3,1 – 6,9
II	10	7,5 – 12,4	7,2 – 12,7
III	15	12,2 – 17,8	11,6 – 18,3
IV	20	14,0 – 26,0	12,2 – 27,8
V	> 20	—	13,3 – 36,8

Примітки: $b_{н}$ – середнє значення показника нормативної товщини ожеледиці; $\Delta b_{н}$ – межі зміни товщини

стілки ожеледиці в кожному районі; $b_n - b_v$ – нижня і верхня довірчі межі нормативної товщини b_n .

У разі відсутності даних натурних спостережень безпосередньо в районі будівництва на морі допускається приймати нормативну товщину стінки ожеледиці такою, що дорівнює за результатами спостережень на найближчих районах суші. У разі обмерзання проводів, тросів, канатів та інших кругло-циліндричних елементів, орієнтованих горизонтально, діаметром менш як 0,2 м, навантаження від атмосферного обмерзання (у кг на погонний метр) визначається, відповідно до рекомендацій СНиП 2.01.07-85 /52/, за формулою:

$$P = \pi \times \gamma \times b (b_n + d)^* \quad (5.1)$$

де b_n – нормативна товщина стінки ожеледиці в мм, що визначається за синоптичною картою;

$$\gamma = 0,9 \text{Г/см}^3;$$

d – діаметр елемента в мм.

** Примітка. Навантаження на вертикальні елементи діаметром менше 0,2 м дозволяється збільшувати на 10%.*

Для інших елементів споруд навантаження визначається відповідно до такої залежності:

$$P = k \times \gamma \times b_n \quad (5.2)$$

де k – коефіцієнт охоплення (відношення площі елемента, покритої обмерзанням, до загальної площі);

$$\gamma = 0,9 \text{Г/см}^3;$$

b_n – визначається за картою на рис.5.1.

Значення коефіцієнта охоплення k представлені в таблиці 5.2

Таблиця 5.2

Значення коефіцієнта охоплення k для різних елементів конструкцій

Елементи конструкцій	Орієнтація елемента	Діаметр (ширина) елемента, см		
		20 – 50	50 - 100	більш 100
Труби, троси, канати, дроти,	горизонтальна	1,0	0,7	0,4
	вертикальна	1,0	0,8	0,6
Інші елементи	горизонтальна	0,9*	0,6	0,4
	вертикальна	1,0*	0,7	0,5

**Примітка. Для нециліндричних елементів шириною менше 20 см навантаження визначається за формулою 5.2 при значенні $k = 1$.*

Під час проектування морських нафтогазопромислових гідротехнічних споруд, які будуть експлуатуватися на континентальному шельфі, рекомендується розраховувати нормативні навантаження від атмосферного обмерзання,

починаючи з висоти 10 м над розрахунковим рівнем моря. Нижче зазначеного рівня визначають нормативні навантаження від бризкового обмерзання.

Розрахунок нормативних навантажень, створюваних атмосферним обмерзанням вище 10 м, проводиться за допомогою коригувальних коефіцієнтів, представлених у таблицях 5.3 і 5.4.

Таблиця 5.3

Коригувальні коефіцієнти перерахунку нормативної товщини ожеледиці на різних висотах

Висота, м	10	20	30	50	70	100
Коефіцієнт	1,0	1,2	1,3	1,5	1,8	2,2

Перерахунок нормативної товщини стінки ожеледиці b_n для кругло-циліндричних елементів конструкції споруд діаметром менше ніж 0,2 м здійснюється за допомогою коефіцієнтів, наведених у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4

Коефіцієнти перерахунку b_n на різні діаметри

Діаметр, см	0,5	1,0	2,0	3,0	5,0	10,0	15,0÷20,0
Коефіцієнт	1,2	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8	0,7

Тривалість дії таких навантажень на морські гідротехнічні споруди залежить від середньої кількості днів у році з відповідними атмосферними умовами в районі будівництва. Атмосферне обледеніння також впливає на процес і терміни будівництва таких споруд в умовах відкритого моря.

5.1.2 Навантаження від бризкового обмерзання

Повторюваність бризкового обмерзання характеризує частоту впливу льоду, що наріс на елементи конструкцій під час замерзання бризок, що утворюються під час взаємодії штормових хвиль з опорними частинами морських гідротехнічних споруд, та бризок, які зриваються вітром із вершин хвиль. Вона виражається у відсотках, як відношення кількості випадків з обмерзанням до загальної кількості днів за розглянутий період. Залежно від інтенсивності морського бризкового обмерзання для арктичних регіонів його повторюваність відображено на картах у вигляді ізоліній, представлених на рисунках 5.3, 5.4 і 5.5. Такі карти було складено на основі аналізу багаторічних спостережень і досліджень, виконаних в Арктиці вченими-фахівцями Арктичного та Антарктичного науково-

дослідного інституту Радянського Союзу на дрейфуючих станціях.

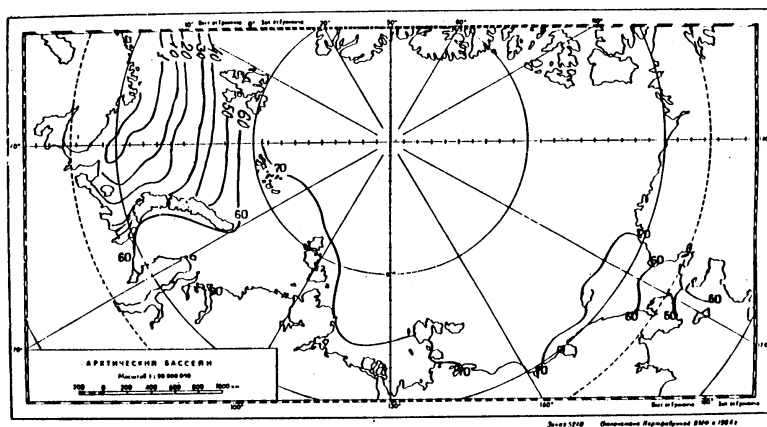


Рис. 5.3. Повторюваність повільного морського бризкового обмерзання

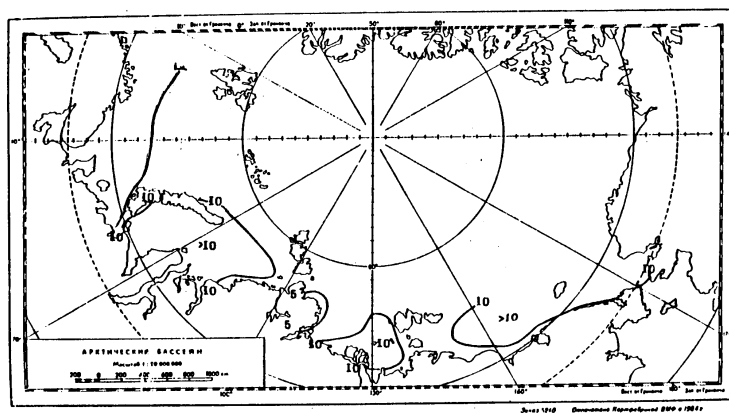


Рис. 5.4. Повторюваність швидкого морського бризкового обмерзання

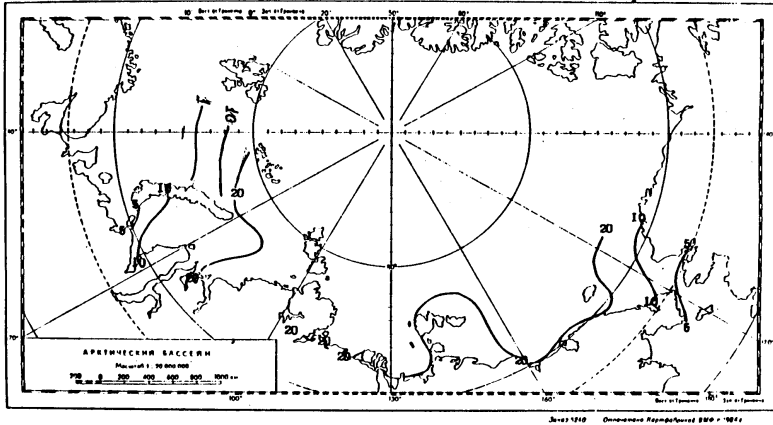


Рис. 5.5. Повторюваність дуже швидкого морського бризгового обмерзання

Тривалість одного випадку обмерзання характеризує тривалість у годинах безперервного впливу обмерзання на споруду. Узагальнення даних багаторічних спостережень дозволило В.В. Панову /34/ встановити тривалість одного випадку ступеня морського бризгового обмерзання у відсотках (див. таблицю 5.5).

Таблиця 5.5

Тривалість одного випадку ступеня морського бризкового морського обмерзання, %

Ступінь обмерзання	До 12 годин	Від 12 до 24 годин	від 24 до 36 годин	від 36 до 48 годин	від 48 до 72 годин	від 72 до 120 годин	більш 120 годин
1	2	3	4	5	6	7	8
Повільне	33	22	15	12	10	6	2
Швидке	47	20	15	10	5	2	1
Дуже швидке	70	25	5				

При цьому було встановлено, що максимальна тривалість повільного обмерзання, за даними натурних спостережень, становила 106 годин. Аналіз даних натурних спостережень дав змогу розробити такі градації обмерзання гідротехнічних споруд і відповідні їм поєднання температури повітря та швидкості вітру, вважаючи, що температура поверхневого шару води близька до температури замерзання і перебуває в межах $0 \div 2^{\circ}\text{C}$.

Повільне обмерзання відбувається за температури повітря $T_a \geq -3^{\circ}\text{C}$, швидкості вітру $V_a > 0$ м/с та при $T_a < -3^{\circ}\text{C}$ і $V_a \leq 10$ м/с.

Швидке обмерзання відбувається при $T_a < -3^{\circ}\text{C}$, $10 < V_a \leq 15$ м/с і при $-3^{\circ}\text{C} > T_a \geq -8^{\circ}\text{C}$, $V_a > 15$ м/с.

Дуже швидке обмерзання відбувається під час $T_a < -8^{\circ}\text{C}$ і $V_a > 15$ м/с.

Загальна маса льоду на всій поверхні надводної частини споруди, зверненої до вітрового потоку, на яку потрапляють бризки, становитиме:

$$I_s = \sum_1^s \beta W_z S_i t, \quad (5.3)$$

де: S_i – площа елемента поверхні надводної частини споруди, m^2 ;
 n – число елементів поверхні;
 t – час, год.

Коефіцієнт намерзання β визначається відношенням маси льоду, що нарів на одиниці поверхні в одиницю часу, до маси води, що потрапила на ту саму поверхню за той самий проміжок часу. Максимальна висота підйому крапель брижкової хмари пов'язана із середньою швидкістю вітру емпіричною залежністю, отриманою В.В. Пановим /34/:

$$h_m = 3,8 \cdot 10^{-2} u_a^{1,75} + \lambda, \quad (5.4)$$

де h_m – максимальна висота підйому крапель брижкальної хмари, м;

u_a – середня швидкість вітру, м/с;

λ – середня висота вітрової хвилі, м у системі

розрахункового шторму, м.

Загальна маса води, що потрапила на $1m^2$ плоскої вертикальної або горизонтальної поверхні, розташованої

перпендикулярно до потоку бризок, на яку попадають бризки, розподіляється зі зростанням висоти споруди за таким законом:

$$W_z = W_1 e^{-0,85(z-\lambda)}, \quad (5.5)$$

де W_z – маса води, що потрапила на 1 м^2 горизонтальної або вертикальної поверхні за одиницю часу, год;

W_1 – маса води, що потрапила на 1 м^2 горизонтальної або вертикальної поверхні на висоті 1 м від середньої висоти хвилі за одиницю часу, $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{ год})$;

z – висота, м.

Знаючи масу води та її розподіл по вертикалі, масу льоду можна визначити, використовуючи таке рівняння:

$$I_i = \beta W_z, \quad (5.6)$$

де: I_i – маса льоду, що наросла при обмерзанні на 1 м^2 надводної поверхні споруди за одиницю часу на висоті z ;

β – коефіцієнт намерзання.

За номограмою, представленою на рис. 5.6, визначається швидкість утворення льоду на надводній поверхні споруди. Множачи отриману швидкість обмерзання на тривалість обмерзання, можна отримати масу льоду, що наросте на споруді.

Таким чином, процес обмерзання призводить до збільшення ваги споруди, а значить і до збільшення

напружень у ґрунтовій основі під фундаментною частиною.

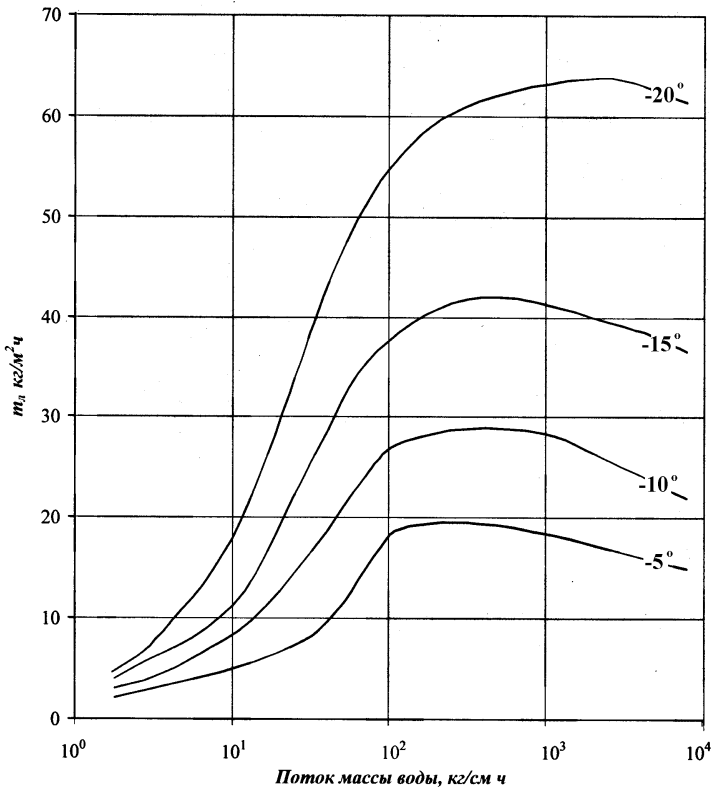


Рис. 5.6. Номограма для розрахунку швидкості наростання льоду під час бризкового обмерзання за потоком маси води для різної температури повітря

Слід особливо зазначити, що бризгове обмерзання спричиняє збільшення поперечного розміру опорних ча-

стин гідротехнічних споруд у зоні змінного горизонту. І, в тих випадках, коли такі гідротехнічні споруди будуть експлуатуватися в умовах відкритого моря, то збільшення поперечних розмірів їхніх опорних частин призведе до одностороннього збільшення хвильових навантажень. Розмір зони обмерзання на опорних частинах морських нафтогазопромислових гідротехнічних споруд буде також залежати і від величини коливання рівня води. Так, у приливних морях, залежно від місця розташування споруди, висота цієї зони може сягати кількох метрів. В Україні величина зони коливання рівня води в Азовському і Чорному морях залежить винятково від зганяльно-нагінних явищ.

5.2 Льодові навантаження від рівних крижаних полів

Розрахунки льодових навантажень на гідротехнічні споруди проводять у процесі їхнього проєктування з урахуванням природно-кліматичних характеристик району майбутнього будівництва, на підставі аналізу результатів ынженерних вишукувань типів льодових утворень, їхньої міцності та метричних характеристик, конструкції споруд і різноманіття розрахункових випадків, які можуть бути реалізовані в період служби споруди.

Основним нормативним документом з визначення льодових навантажень на морські гідротехнічні споруди, що проєктуються, на сьогодні і в Росії, і в Україні є СНиП 2.06.04-82*/50/, а також доповнення й уточнення до цих норм /54/. У цьому підручнику наведено основні розрахункові сценарії з цих нормативних документів.

5.2.1 Визначення розрахункових значень міцнісних характеристик крижаних полів

Величина льодового навантаження на гідротехнічні споруди насамперед залежить від характеристик міцності і товщини розрахункового рівного крижаного поля в районі будівництва. Характеристики міцності рівних крижаних полів у районах майбутнього будівництва вивчаються в процесі інженерних вишукувань упродовж низки років згідно до вимог відповідних нормативних документів /11, 12, 50/. Найдоцільніше такі роботи проводити з бортів спеціалізованих суден в умовах відкритого моря. У випадках, коли майбутні морські гідротехнічні споруди планується зводити на відносно невеликих відстанях від берегової лінії або в затоках, губах, протоках і бухтах, то такі вишукування проводять із берегових баз.

Дослідження міцності льоду на стиск проводять з урахуванням їхньої орієнтації щодо площини намерзання. Так, для виготовлення зразків льоду, орієнтованих перпендикулярно до площини намерзання, з рівного крижаного поля відбирають проби льоду, випиляні на всю товщину льоду. Перед виготовленням зразків льоду роблять візуальний опис текстури льоду по товщині крижаного поля. Далі керн по висоті розрізають на окремі зразки, висота яких не повинна перевищувати двох діаметрів. Перед випробуваннями зразків льоду фіксуються їхні поперечні розміри. У процесі їх випробувань на одновісне стиснення фіксуються сили руйнування, а також деформації льоду в часі. Після руйнування кожного зразка визначають його температуру і з уламків відбирають проби, у вигляді невеликих шматочків льоду, для подальшого визначення солоності. Така методика проведення дослідів, після опрацювання та аналізу результатів, дає змогу отримати зміну міцності льоду по товщині крижини, по її поверхні, а також відповідний розподіл температури, щільності та солоності.

Комплексні дослідження міцнісних властивостей рівних крижаних полів, що проводилися цілою низкою дослідників у різних регіонах, дали змогу встановити

співвідношення між міцністю льоду на зразках, орієнтованих перпендикулярно й паралельно до площини намерзання, а також міцністю на вигин. На підставі узагальнення та аналізу результатів польових досліджень було встановлено, що межу міцності льоду під час одновісного стискання в напрямку, паралельному до поверхні крижаного покриву, - R_c та межу міцності під час вигину - R_f МПа, слід визначати за формулами:

$$R_c = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i + \Delta_i)} \quad (5.7)$$

$$R_f = 0,4 R_c, \quad (5.8)$$

де N – кількість шарів однакової товщини, на яку розбивається за товщиною досліджуване крижане поле, при цьому $N \geq 3$;

C_i – середнє (арифметичне) значення межі міцності льоду при одновісному стисненні за товщиною крижаного покриву, що визначається за дослідними даними, МПа;

Δ_i – довірча межа випадкової похибки випадкових визначень C_i , МПа, яка визначається методами математичної статистики при заданих значеннях статистики за заданих значень довірчої ймовірності α довірчої ймовірності α і кількості паралельних вимірювань (кількості ви-

пробуваних зразків) n , $\Delta_i = \pm 0,3$ при $t \geq -15^\circ\text{C}$; $\Delta_i = 0,45$ при $t_i \leq 15^\circ\text{C}$.

Таким чином, достовірні значення характеристик міцності рівних крижаних полів можуть бути отримані на підставі аналізу узагальнених результатів досліджень упродовж кількох зимових сезонів у районах майбутнього будівництва та з урахуванням опрацювання даних спостережень за температурами повітря найближчої до місця будівництва гідрометеорологічної станції.

За відсутності дослідних даних допускається приймати розрахункові значення R_c за такими емпіричними залежностями:

$$\text{- при } \sqrt{10^{-3} \cdot v_b} = 0,08 \div 0,27, \rho_i = 760 \div 860 \text{ кг/м}^3$$

$$R_c = -2,12 \cdot \ln \sqrt{10^{-3} \cdot v_b} - 2,39;$$

$$\text{- при } \sqrt{10^{-3} \cdot v_b} = 0,16 \div 0,32, \rho_i = 860 \div 920 \text{ кг/м}^3$$

$$R_c = -2,60 \cdot \ln \sqrt{10^{-3} \cdot v_b} - 2,32;$$

де v_b – середнє арифметичне значення кількості рідкої фази за товщиною крижаного поля, ‰, що визначається за формулою:

$$v_b = s_i \cdot (0,532 - 49,185/t_i) \quad (5.9)$$

де t_i – середнє арифметичне значення температури по товщині крижаного поля $^{\circ}\text{C}$, $t_i = - (0,5 \div 22,9)^{\circ}\text{C}$,

s_i – середнє арифметичне значення солоності крижаних кернів (призм) по товщині рівного крижаного поля, ‰, що визначається за дослідними даними, а за їхньої відсутності приймається однаковим і рівним $0,2s_w$ для льоду віком до двох місяців або $1,5 s_w$ для льоду віком два місяці і більше;

s_w – солоність морської води, ‰. Температура льоду t_i визначається дослідним шляхом, а за відсутності таких даних за рекомендаціями норм /68/:

$$t_i = t_u Z_i , \quad (5.10)$$

де t_u – температура льоду на межі повітря (або сніг) - повітря (або сніг) - лід $^{\circ}\text{C}$, яка визначається методами тепло і масообміну за даними про температуру повітря, товщину снігового покриву і швидкості вітру або приймається рівною середньодобовій температурі повітря до моменту

розрахункового впливу льоду на споруду за даної товщини льоду: 0,5м – за 5 діб; 0,75м – за 11 діб; 1,0м – за 19 діб; 1,5м – за 43 доби; 2,0м – за 77 діб;

z_i – відстань від межі лід-вода до середини i -го шару в частках товщини крижаного поля.

5.2.2. Льодові навантаження на споруди з вертикальною передньою гранню

До споруд із вертикальною передньою гранню відносяться: моли та хвилеломи з масивної кладки або з масивів-гігантів; морські нафтогазопромислові гідротехнічні споруди гравітаційного типу з однією опорною частиною ("моноподи") або на кількох опорах; маяки; опори мостів у вигляді трикутника, багатогранника або циліндричної форми. Що стосується річкових споруд, то до них відносяться бетонні водозливні греблі, причальні споруди і набережні різних типів.

Льодові навантаження на гідротехнічні споруди з вертикальною передньою гранню слід визначати під час силового впливу окремих крижин з урахуванням їхніх розмірів і характеристик міцності:

- на опорі, що стоїть окремо (рис. 5.7), з передньою опорною гранню у вигляді трикутника, багатокутника, або циліндричної форми $F, MН$ за формулою;

$$F = 0,04vh_d\sqrt{mAk_bk_vR_c\text{tg}\gamma} \quad (5.11)$$

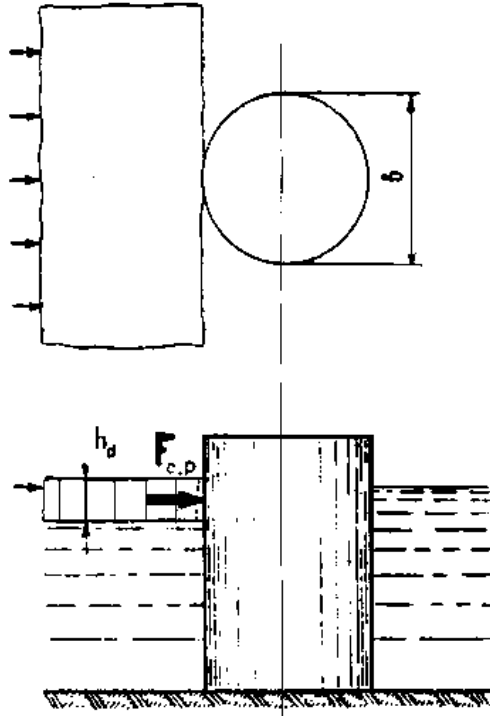


Рис. 5.7. Схема прикладання горизонтальної складової льодового навантаження від дрейфуючого крижаного поля на окрему вертикальну опору;

- на секцію протяжної споруди F , МН (рис. 5.8.) за формулою:

$$F = 0,07vh_d\sqrt{Ak_vR_c}, \quad (5.12)$$

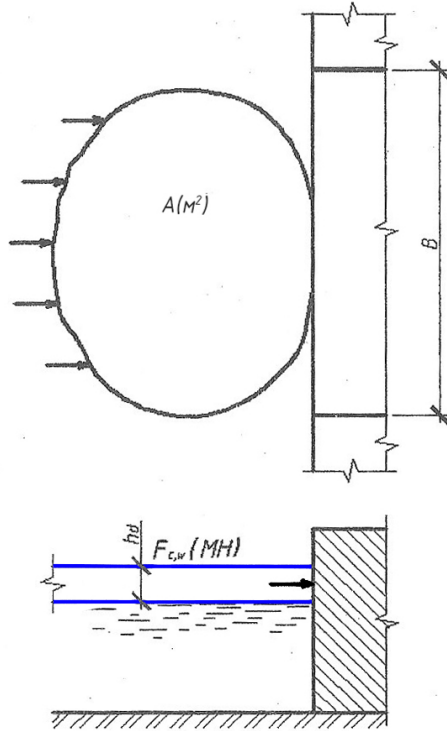


Рис. 5.8. Схема прикладання горизонтальної складової льодового навантаження від дрейфуючого крижаного поля на секцію споруди

У залежностях (5.11 і 5.12) v - швидкість руху крижаного поля, м/с, яку визначають за даними натурних спостережень у районі будівництва, а за їхньої відсутності допускається приймати рівною:

для річок і приливних ділянок морів - швидкості течії води;

для водосховищ і морів - 3% від значення швидкості вітру 1% забезпеченості;

m - коефіцієнт форми опори в плані, що приймається відповідно до даних таблиці 5.6;

A – максимальна площа розрахункового крижаного поля 1% забезпеченості, m^2 , що визначається за результатами натурних спостережень;

k_b - коефіцієнт, який приймають за таблицею 5.7;

k_v - коефіцієнт, що приймається відповідно до даними таблиці 5.8.

Таблиця 5.6

Значення коефіцієнтів форми опор у плані

Коефіцієнт форми опори в плані	Для опор із передньою гранню у вигляді						
	трикутника з кутом загострення в плані 2γ , град					многогранника або напівциркульного обрису	прямокутника
	45	60	75	90	120		
m	0,41	0,47	0,52	0,58	0,71	0,83	1
<p><i>Примітка. У разі раптового зрушення крижаного поля, що змерзло з опорою, для опори з передньою гранню у вигляді трикутника і прямокутника приймають $=1$, для опор із передньою гранню у вигляді багатогранника або перпендикулярного обрису - $m=1,26$.</i></p>							

Таблиця 5.7

Значення коефіцієнта k_b в залежності від відношення b/h_d

Значення b/h_d		0,3 та менш	1	3	10	20	30 та більш
Коефіцієнт k_b	для прісноводного льоду	5,3	3,1	2,5	1,9	1,6	1,3
	для морського льоду	5,7	3,6	3,0	2,3	1,9	1,5
b – ширина опори або секції споруди по фронту на рівні дії льоду, м.							

Таблиця 5.8

Значення коефіцієнта k_v залежно від ефективної швидкості деформації льоду

Значення $\dot{\varepsilon}_e, c^{-1}$	10^{-7} та менш	$5 \cdot 10^{-5}$	$10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-3}$	10^{-2} та більш
Коефіцієнт k_v	0,1	0,9	1,0	0,8	0,5	0,3
$\dot{\varepsilon}_e$ – ефективна швидкість деформації льоду в зоні його взаємодії з опорою, c^{-1} , яка визначається за формулою						

де b – ширина опори або секції споруди по фронту на рівні впливу льоду, м;

$\dot{\varepsilon}_e$ – ефективна швидкість деформації льоду в зоні його взаємодії з опорою, c^{-1} ($\dot{\varepsilon}_e = v/k_e b$);

k_e – коефіцієнт, що приймається при $b/h_d < 30$ рівним 4, а при $b/h_d \geq 30$ – 2;

γ - половина кута загострення передньої грані опори в плані на рівні дії льоду в градусах, для опор з передньою гранню у вигляді багатогранника або напівциркового кульного обрису необхідно приймати $\gamma = 70^\circ$.

При цьому в СНиП 2.06.04-82*/50/ акцентується увага конструкторів на те, що льодове навантаження F , обчислене за формулою (5.11), не може перевищувати навантаження, визначене за наведеною нижче залежністю, що враховує руйнування рівного поля завдяки зім'якшенню та дробленню льоду:

$$F_b = mk_b k_v R_c b h_d, \quad (5.13)$$

а льодове навантаження F , обчислене за формулою (5.12), не може перевищувати навантаження, визначене за такою залежністю:

$$F = k k_v R_c b h_d, \quad (5.14)$$

де k - коефіцієнт, що приймається відповідно даних таблиці 5.9.

Таблиця 5.9

Значення коефіцієнта k залежно від відношення b/h_d

Значення b/h_d	0,3 та менш	1	3	10	20	30 та більш
------------------	-------------	---	---	----	----	-------------

Коефіцієнт k	1	0,9	0,8	0,6	0,5	0,4
----------------	---	-----	-----	-----	-----	-----

Льодове навантаження від впливу рівних крижаних полів на опори гідротехнічних споруд з передньою гранню у вигляді прямокутника слід визначати, використовуючи розрахункову залежність (5.13).

У вищенаведених розрахункових залежностях як розрахунковий параметр використовується міцність льоду на одновісне стиснення R_c , з урахуванням того, що лицьова поверхня гідротехнічних споруд або їхні опорні частини мають вертикальні профілі. У таких випадках льодові навантаження досягають своїх максимальних значень, а їхній характер у часі, залежно від співвідношення ширини споруд або опорних частин до товщини рівних льодових полів, є найнесприятливішим і має пилкоподібний характер (рис. 5.9).

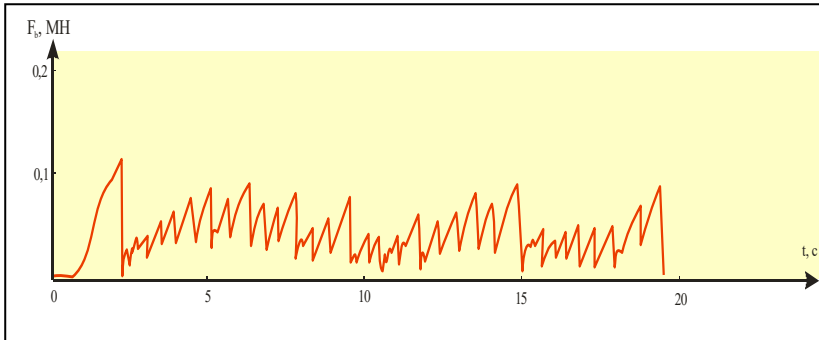


Рис. 5.9. Приклад реалізації льодового навантаження під час прорізання рівного крижаного поля

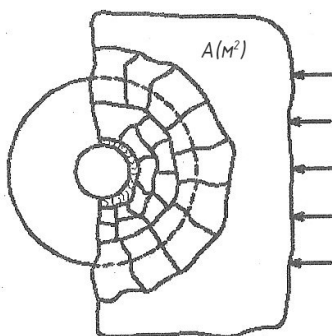
Лід на контакті зі спорудами руйнується за рахунок зм'яття і дроблення. При цьому за короткі проміжки часу льодове навантаження досягає своїх максимальних значень, а потім різко знижується до мінімальних (нульових) значень. Така несприятлива картина, зрештою, негативно позначається на роботі ґрунтової основи під спорудами, викликаючи в ній процеси нерівномірного переущільнення.

5.2.3 Льодові навантаження на споруди кінчної форми та з похилою лицьовою поверхнею

З метою істотного зниження льодових навантажень на гідротехнічні споруди та опори мостів, а також зміни їхнього характеру в сприятливий для споруд бік, передні грані проектують похилого профілю. Це можуть бути фун-

даментні частини маяків, морських нафтогазопромислових гідротехнічних споруд, які в зоні змінного рівня води мають конічну вставку, або опори мостів напівконічної форми (рис. 5.10).

а)



б)

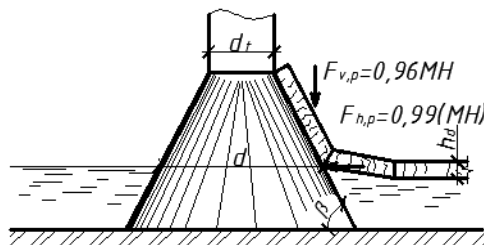


Рис.5.10. Схема прикладання горизонтальної і вертикальної складових льодового навантаження від дрейфуючого крижаного поля на окремо розташовану конічну опору

До споруд укісного профілю належать огорожувальні та берегозахисні споруди, які в зоні змінного рівня мають похилу поверхню. Така ж поверхня притаманна і верхнім укосам земляних гребель, укріпленими бетонними плитами рис. 5.11.

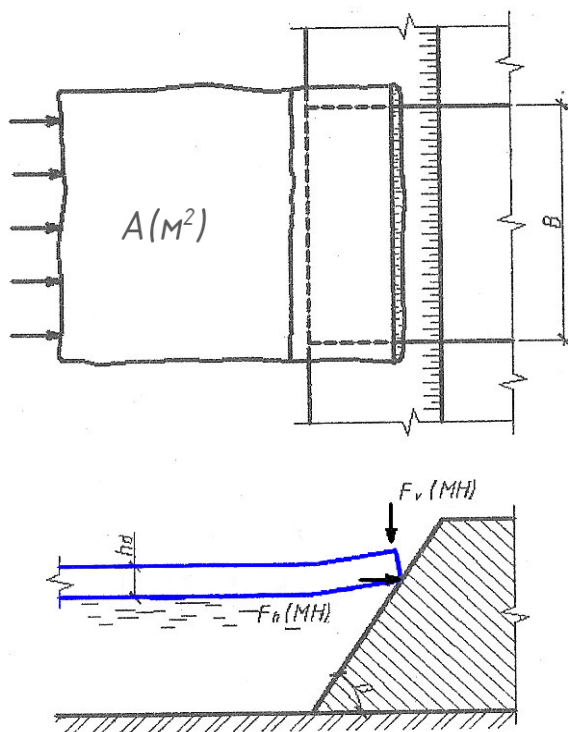


Рис.5.11. Схема прикладання горизонтальної та вертикальної складових льодового навантаження від дрейфуючого крижаного поля на споруду укісного профілю

У таких випадках під час визначення льодових навантажень як розрахунковий параметр використовують міцність льоду на вигин R_f , яка, як зазначалося вище, менша за міцність льоду на одновісне стиснення R_c . Характер руйнування рівних крижаних полів при цьому вигідно відрізняється від попереднього тим, що лід руйнується за рахунок вигину з утворенням радіальних і кільцевих тріщин, а цикл зростання навантаження від мінімальних до максимальних значень значно збільшується в часі. Таким чином, ґрунти в основі таких споруд не піддаються короткочасним циклічним навантаженням у процесі впливу на них рівних крижаних полів.

Слід зазначити, що в морях, особливо приливних, неможливе змерзання льоду зі спорудами через постійну дію течій, довгоперіодних хвиль і коливань рівнів води. Льодове навантаження від впливу рівних крижаних полів на окремо розташовану конічну опору (мал. 5.10) або конічний льодоріз напівциркульного обрису за відсутності змерзання з льодом, відповідно до рекомендацій норм /50/, слід визначати за формулами:

а) горизонтальну складову льодового навантаження $F_{h,p}$, МН,

$$F_{h.p} = [k_{h.1}R_f \dot{h}_d^2 - k_{h.2}\rho gh_d d^2 + k_{h.3}\rho gh_d (d^2 - d_t^2)]k_{h.4} \quad (5.15)$$

б) вертикальну складову льодового навантаження $F_{v.p}$, МН,

$$F_{v.p} = k_{v.1}F_{h.p} + k_{v.2}\rho gh_d (d^2 - d_t^2) \quad (5.16)$$

де $k_{h.1}$, $k_{h.2}$ - коефіцієнти, що приймаються за таблиці 5.10;

$k_{h.3}$, $k_{h.4}$, $k_{v.1}$, $k_{v.2}$ - коефіцієнти, які приймають за таблицею 5.11.

На секцію споруди укiсного профiлю (рис. 5.11) або окрему опору прямокутного перерiзу з похилою передньою гранню за формулами:

а) горизонтальну складову льодового навантаження F_h , МН,

$$F_h = 0,1R_f b h_d t g \beta; \quad (5.17)$$

б) вертикальну складову льодового навантаження F_v , МН,

$$F_v = F_h c t g \beta, \quad (5.18)$$

де ρ - щiльнiсть води, кг/м³;

g - прискорення вiльного падiння, 9,81м/с²;

d - дiаметр конуса по ватерлiнii, м;

d_t - верхнii дiаметр конуса, м;

β - кут нахилу утворюючої конуса (передньої грані

споруди укісного профілю) до горизонту, град.

Таблиця 5.10

Значення коефіцієнтів $k_{h,1}$ и $k_{h,2}$ в залежності від $\frac{pgd^2}{R_f h_d}$

Значення $\frac{pgd^2}{R_f h_d}$	0,1	0,5	1	5	10	25	50	100
Коефіцієнти: $k_{h,1}$	1,6	1,6	1,7	1,9	2,1	2,5	2,9	3,5
$k_{h,2}$	0,31	0,24	0,21	0,11	0,08	0,05	0,02	0,02

Таблиця 5.11

Значення коефіцієнтів $k_{h,3}$, $k_{h,4}$, $k_{v,1}$, $k_{v,2}$
в залежності від β

Значення β , град.	20	30	40	50	60	70
Коефіцієнти: $k_{h,3}$	0,25	0,27	0,31	0,36	0,46	0,67
$k_{h,4}$	0,7	0,9	1,3	1,8	2,6	5,3
$k_{v,1}$	2,2	1,6	1,1	0,8	0,5	0,3
$k_{v,2}$	0,041	0,042	0,039	0,034	0,026	0,017
Примітка. Дані цієї таблиці відповідають коефіцієнту тертя між льодом і спорудою, що дорівнює 0,15.						

Рекомендації нормативного документа /50/ з розрахунку льодових навантажень на багатоопорні морські гідротехнічні споруди можна застосувати лише для попередньої оцінки, оскільки характер руйнування рівного льоду буде залежати від багатьох чинників. До них, насамперед, належать відносний діаметр опор, їхня кількість і відстань між ними. З цієї причини уточнення льодових навантажень у реальних проєктах необхідно здійснювати в процесі наукового супроводу, використовуючи сучасні наукові підходи, зокрема й фізичне моделювання.

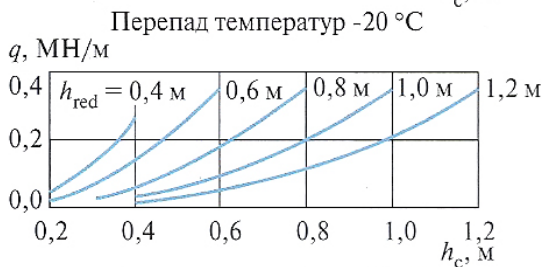
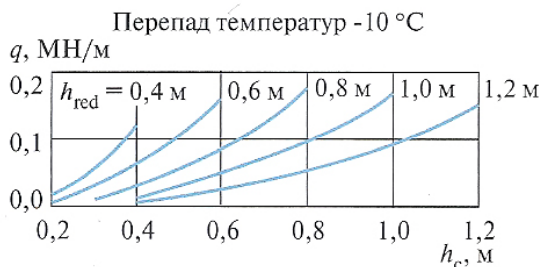
5.2.4 Льодові навантаження від суцільного крижаного покриву при його температурному розширенні

Такі розрахункові сценарії можуть реалізуватися протягом терміну служби гідротехнічних споруд, які експлуатуються на обмежених акваторіях: портів; бухт; лиманів; заток. Рекомендації з розрахунку льодових навантажень у таких умовах містяться в нормативному документі /50/.

Горизонтальне лінійне навантаження q , МН/м, (на 1п м довжини по фронту протяжної споруди) від суцільного крижаного покриву за умови його температурного розши-

рення необхідно приймати таким, що дорівнює найбільшому значенню з отриманих за розглянутий ряд років.

Значення q визначаються за графіками рис. 5.12. за заданих значень перепадів температури повітря $\Delta\theta$, $^{\circ}\text{C}$ і відповідних їм реальних і приведених товщин льоду h_c і h_{red} , м.



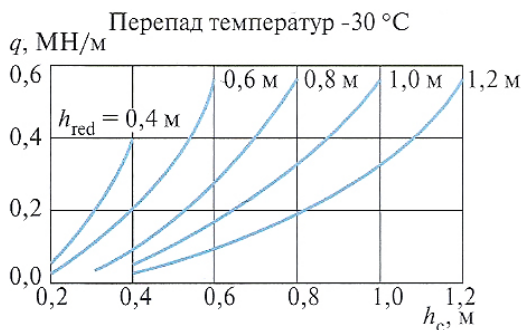


Рис. 5.12. Залежність q від перепадів температури повітря $\Delta\theta$, °С

Значення $\Delta\theta$ слід вибирати з графіка перепад температур повітря за даними термінових спостережень у льодоставний період для кожного року з розглянутого ряду років (30 років і більше) за тривалості перепадів від 5 годин до 20 діб. Значення h_c приймаються рівними середнім товщинам льоду за час перепаду температури.

Значення h_{red} , м, необхідно визначати за формулою:

$$h_{red} = h_{red} + 1,43h_s + h_r \quad (5.19)$$

де h_s – середня товщина снігу за час перепаду температури, м;

h_r – додаткова товщина льоду м, що приймається за таблиці 5.12.

Таблиця 5.12

Значення додаткової товщини льоду

Середня швидкість вітру за час перепаду температури, γ_w , м/с	Додаткова товщина льоду h_r , м, за середньої температури повітря за час перепаду температури θ_a , °C		
	0	-10	-20
0	0,57	0,46	0,39
2,5	0,32	0,26	0,22
5	0,16	0,14	0,12
10	0,05	0,05	0,05
20	0,01	0,01	0,01

Силу від дії крижаного покриву на окремо розташовану споруду F_t , МН, необхідно визначати за формулою:

$$F_t = k_1 q b \quad (5.20)$$

де k_1 – коефіцієнт, який приймають за таблицею 5.13.

Таблиця 5.13.

Значення коефіцієнта k_1

Значення L/b	1	5	15	25	50	75	100
Коефіцієнт k_1	1	2	4	6	10	14	17

L - відстань від окремо розташованої споруди до берега або протяжної споруди, м

При цьому сила F_t , визначена за формулою (5.20), не може бути більшою за силу F_{tb} , МН, що визначається за формулою (5.20):

$$F_{tb} = R_c b h_c \quad (5.21)$$

Щоб уникнути реалізації таких навантажень на портові гідротехнічні споруди під час формування суцільного крижаного покриву на акваторіях слід вдаватися до регулярного його руйнування за допомогою криголамів або морських буксирів.

5.3 Методи розрахунку льодових навантажень від торосистих утворень

На підставі обробки та аналізу великомасштабних експериментальних досліджень були розроблені рекомендації з розрахунку сумарного льодового навантаження на опорні частини морських гідротехнічних споруд циліндричної форми від впливу торосистих утворень [39, 40]. При цьому торосисте утворення розглядалось у вигляді трьох основних частин: надводної, середньої (консолідованої) і підводної. До основних розрахункових характеристик торосистих утворень, які слід враховувати при визначенні льодових навантажень на морські стаціонарні споруди, належать:

- а) товщина уламків льоду, що складають торос $h_{r,m}$;
- б) довжина уламків льоду, що складають торос $l_{r,m}$;
- в) висота надводної частини торосу $h_{s,m}$;

- г) товщина середньої консолідованої (змерзлої) частини торосу $h_{m,m}$;
- д) висота підводної частини торосу $h_{k,m}$;
- е) межі міцності зразків льоду на однове́сне стиснення, виготовлених із проб льоду, відібраних із надводної, середньої та підводної частин торосистого утворення - R_{cs} , R_{cm} , R_{ck} відповідно, МПа;
- ж) інтегральна міцність кожної з частин торосистого утворення R_s , R_m , R_k , МПа;
- з) пористість торосу p - об'єм пустот у кожній із частин торосу у відсотковому відношенні.

Метричні параметри суцільного поля торошіння (висота надводної частини h_s , товщина середнього консолідованого шару h_m м, висота кільової частини h_k м, товщина h_b м, і довжина уламків l_m , що складають торос), а також пористість p , %, кожної з частин торосу (об'єм порожнеч у відсотковому відношенні) слід визначати за даними натурних спостережень та вишукувань у районі будівництва. На підставі аналізу даних натурних спостережень, виконаних як у СРСР /33, 36, 37/, так і за кордоном /66, 68, 71, 73, 81/, було встановлено, що метричні характеристики поодиноких торосів і полів торошіння перебувають у певних співвідношеннях. Тому за відсутності даних натурних спо-

стережень на попередніх стадіях проектування допускається приймати:

- висоту надводної частини h_s , залежно від товщини уламків льоду при $0,2\text{м} \leq h_r \leq 2,1\text{м}$, за формулою:

$$h_s = 3,69\sqrt{h_r}, \quad (5.22)$$

де $h_r = 0,8h_d$; h_d – розрахункова товщина рівного крижаного поле в районі будівництва;

- товщину середньої консолідованої частини торосу h_m за формулою:

$$h_m = 1,5h_d; \quad (5.23)$$

- висоту кільової частини торосу h_k за формулою:

$$h_k = 5h_s - h_m \quad (5.24)$$

Інтегральну міцність кожної з частин торосистого утворення R_s , R_m , R_k , МПа, слід визначати на підставі даних натурних випробувань зразків льоду на одновісне стиснення R_{cs} , R_{cm} , R_{ck} , МПа, з урахуванням пористості:

$$R_s = k_p \cdot R_{cs} \quad (5.25)$$

$$R_m = k_p \cdot R_{cm} \quad (5.26)$$

$$R_k = k_p \cdot R_{ck} \quad (5.27)$$

Коефіцієнт зниження інтегральної міцності k_p кожної з частин торосу залежно від їхньої пористості p , за 0%

$\leq p \leq 50\%$, визначається за допомогою такої емпіричної залежності:

$$k_p = e^{(-0,066p)} \quad (5.28)$$

За відсутності даних вишукувань і пористості консолідованої частини торосу p близької до 0% допускається приймати:

$$R_m = R_{cm} = 0,8R_c \quad (5.29)$$

Межа міцності льоду на одновісний тиск у напрямку, паралельному до поверхні крижаного поля, R_c , МПа розрахункової товщини h_d у районі будівництва, визначається відповідно до вимог нормативного документа /50/. На підставі результатів великомасштабних дослідів в натурних умовах було встановлено, що для інженерних розрахунків можна приймати:

$$R_{cs} = 0.75 R_{cm}, \quad (5.30)$$

$$R_{ck} = 0,25 R_{cm}. \quad (5.31)$$

У межах відносних параметрів, виконаних раніше експериментальних великомасштабних досліджень із визначення дослідних значень коефіцієнтів торосистості /19, 20, 21, 3, 6, 39, 73, 79/, врахування силового впливу торосів на проєктовані гідротехнічні споруди можна

здійснювати з використанням наведених нижче рекомендацій.

Сумарна величина льодового навантаження від поля торосіння F_r , МН, утвореного з уламків льоду h_r (при $0,2 \text{ м} \leq h_r \leq 0,8 \text{ м}$) і нульової пористості середньої консолідованої частини, може визначатися з використанням диференційованого коефіцієнта торосистості за формулою:

$$F_r = k_r \cdot F_{b,p}, \quad (5.32)$$

де $F_{b,p}$ - льодове навантаження на споруду від впливу рівних крижаних полів розрахункової товщини h_d і міцності, що примикають до торосу або поля торосіння, що визначається відповідно до вимог рекомендацій нормативного документа СНиП 2.06.04-82* /50/;

k_r – диференційований коефіцієнт торосистості, що враховує збільшення льодового навантаження на споруди порівняно з льодовим навантаженням від рівного крижаного поля розрахункової товщини h_d , що приймається в залежності від співвідношення ширини опорної частини споруди b до товщини консолідованої частини поля торосіння h_m з урахуванням відношення h_m/h_d .

Оскільки значення коефіцієнта торосистості k_r зі збільшенням безрозмірного параметра D/h_m прагнуть до асимптоти, то під час розроблення рекомендацій відомчого

нормативного документа /54/, була проведена екстраполяція цієї залежності до значень відносної ширини опорної частини морських споруд, що мають практичний інтерес /53/ (рис. 5.13). При цьому апроксимація з урахуванням екстраполяції дала змогу отримати скориговані емпіричні залежності для визначення диференційованих значень коефіцієнтів торосистості:

при $h_m/h_d = 1,5$

$$k_r = 3,3 \cdot (D/h_m)^{-0,16}; \quad (5.33)$$

при $h_m/h_d = 1,25$

$$k_r = 2,85 \cdot (D/h_m)^{-0,14}; \quad (5.34)$$

при $h_m/h_d = 1$

$$k_r = 2,4 \cdot (D/h_m)^{-0,11}. \quad (5.35)$$

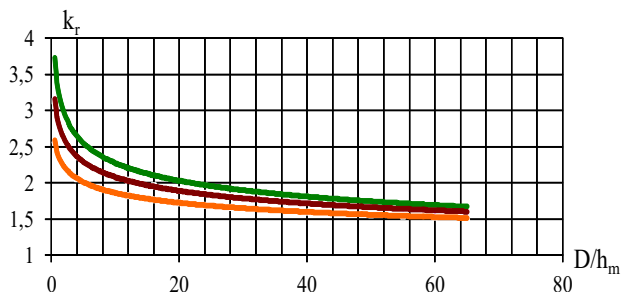


Рис.5.13. Залежність коефіцієнтів торосистості від відносної ширини перешкоди

- зелена - при $h_b/h_m = 1,5$
- коричнева - при $h_b/h_m = 1,25$
- помаранчева при $h_b/h_m = 1,0$

Як було зазначено вище, розглядаючи силовий вплив торосистих утворень на морські гідротехнічні споруди, видається доцільним виходити з того, що кожна зі складових частин торосу, під час взаємодії зі спорудою, робить конкретний внесок у сумарну складову льодового навантаження.

Маючи в своєму розпорядженні дані про характеристики міцності і розміри кожної з частин розрахункового торосу або поля торшіння, можна розрахунковим шляхом визначити складові сумарного льодового навантаження на циліндричні перешкоди. Таким чином, сумарну рівнодіючу льодового навантаження від поля торшіння F_r МН, за товщини уламків льоду, що складають торос $h_b > 0,8$ м, слід визначати як суму навантажень від кожної з частин торосу:

$$F_r = F_s + F_m + F_k, \quad (5.36)$$

де: F_s - навантаження від надводної частини поля торшіння;

F_m - навантаження від середньої частини поля торшіння;

F_k - навантаження від підводної частини поля торшіння.

Розрахунок складових сумарного льодового навантаження можна здійснювати за допомогою модернізованої класичної залежності К.Н. Коржавіна /25/, покладеної в основу рекомендацій норм /50, 12/ для розрахунку льодового навантаження на споруду від впливу рівних льодових полів. При цьому як характеристики міцності слід використовувати інтегральні значення міцності кожної з частин торосистого утворення, які призначаються на підставі результатів інженерних вишукувань, що проводяться в районах майбутнього будівництва перед проектуванням льодостійких морських гідротехнічних споруд.

Виходячи з цього, складові льодового навантаження від поля торшіння F_s , F_m и F_k , МН можна визначати за допомогою нижченаведених виразів:

$$F_s = m \cdot k \cdot k_v \cdot R_s \cdot b \cdot h_s, \quad (5.37)$$

$$F_m = m \cdot k_b \cdot k_v \cdot R_m \cdot b \cdot h_m, \quad (5.38)$$

$$F_k = m \cdot k \cdot k_v \cdot R_k \cdot b \cdot h_k, \quad (5.39)$$

де: m – коефіцієнт форми у формулах (5.37 - 5.39) визначається за таблицею 5.6;

k – коефіцієнт неповноти контакту між льодом і спорудою у формулах (5.37, 5.39), що приймається за даними таблиці 5.9;

k_b – коефіцієнт зминання льоду у формулі (5.38) визначається за таблицею 5.7;

k_v - коефіцієнт, що враховує швидкість дрейфу льодових утворень та ефективну швидкість деформації льоду $\dot{\epsilon}$, визначається за таблицею 5.8 і приймається рівним 1 у разі найбільшого силового впливу льоду на споруду;

b – ширина (діаметр D) опорної частини споруди.

Слід зазначити, що оскільки характер руйнування консолідованої частини торосу ідентичний руйнуванню рівного крижаного поля, то під час визначення льодового навантаження в розрахунковій залежності (5.38) застосовується коефіцієнт зминання k_b . Цей коефіцієнт враховує збільшення міцності льоду, викликаної обмеженістю деформацій під час взаємодії зі спорудою. Руйнування надводної та підводної частин торосів істотно відрізняються через підвищену їхню деформативність, зумовлену значно меншою консолідацією між уламками льоду і наявністю пор між ними. З цієї причини, під час визначення льодових навантажень від парусної та кильової

частин торосів у розрахункових залежностях (5.37) і (5.38) застосовується коефіцієнт неповноти контакту k .

За відсутності даних вишукувань на попередніх стадіях проектування сумарне льодове навантаження від однорічного торосистого утворення можна визначати з урахуванням розмірів та інтегральної міцності середньої, консолідованої частини поля торошіння, зважаючи на внесок вітрильної та кільової частин за такою залежністю:

$$F_r = 1,3 \cdot m \cdot k_b \cdot k_v \cdot R_m \cdot b \cdot h_m, \quad (5.40)$$

де 1,3 - числовий коефіцієнт, що враховує навантаження від підводної та надводної частин торосу.

5.4 Метод розрахунку локального льодового тиску

У процесі проектування гідротехнічних споруд і опор мостів необхідно мати у своєму розпорядженні розрахункові дані про величини локальних льодових тисків, які чинитимуть дрейфуючі льодові утворення. Максимальні значення локального тиску, насамперед, необхідні для розрахунків місцевої міцності опорних частин споруд. Вивченням локального тиску льоду займалося багато дослідників з різних країн світу. Локальний льодовий тиск, під час впливу на споруди різних типів льодових утворень, реалізується на дуже малих площах у початковий момент

контакту. Його величина може значно перевищувати міцність льоду на одновісне стиснення. Проте, у чинному загальноросійському нормативному документі СНиП 2.06.04-82* /50/ і в його актуалізованій редакції 2.06.04-82*, зведення правил 38.13330.2012 /49/ відсутні рекомендації щодо розрахунку локального льодового тиску під час проектування гідротехнічних споруд різних типів.

На підставі аналізу результатів експериментальних досліджень локальних льодових тисків, а також порівняльних розрахунків із використанням різних методик у нормативні документи /54, 48/ було сформульовано рекомендації щодо визначення максимальних значень локального тиску льоду.

Величина локального льодового тиску P_l , МПа, що виникає під час впливу рівних крижаних полів на гідротехнічні споруди, визначається залежно від площі контакту S , м², швидкості деформації льоду і міцності рівного крижаного поля R_c , МПа визначеної на зразках льоду, орієнтованих паралельно площині намерзання під час їхніх випробувань на одновісний тиск.

Таким чином, значення локального льодового тиску для площ контакту від 0,1 до $10h_d$, m^2 може визначатися за такою емпіричною залежністю:

$$P_i = k \cdot k_v \cdot I \cdot R_c, \quad (5.41)$$

де k – коефіцієнт, що враховує тип льоду: для прісноводного льоду приймається рівним 1; для морського льоду рівним 1,164;

k_v – коефіцієнт, що враховує ефективну швидкість деформації льоду., приймається відповідно до даних таблиці 31 СНиП 2.06.04-82*/50/;

I – емпіричний коефіцієнт, що враховує складний напружено-деформований стан льоду в зоні контакту зі спорудою, для максимальних значень локальних льодових тисків, визначається за формулою:

$$I = \left(\frac{1,12}{\sqrt[4]{S/h_d^2}} + 0,56 \right)^2 + 0,93, \quad (5.42)$$

де S – площа контакту рівного крижаного поля або консолідованої частини поля торошіння, зі спорудою. ням, m^2 ;

h_d – розрахункова товщина рівного крижаного поля, м;

R_c – нормативна міцність льоду на одновісний тиск, МПа, визначається дослідним шляхом, за відсутності дослідних даних R_c рекомендується визначати за формулою (5.7).

Виявлена в експериментах закономірність зниження інтегральної міцності торосів від їхньої пористості дає змогу використовувати залежність (5.41) для визначення максимальних значень локальних льодових тисків на гідротехнічні споруди не тільки від впливу рівних крижаних полів, а й від полів торшіння. Очевидним є той факт, що найбільші локальні тиски при цьому виявлятимуться на спорудах у зонах контакту із середньою консолідованою частиною поодинокого торосу або поля торшіння. Тому під час визначення максимальних значень локальних тисків від впливу середньої консолідованої частини полів торшіння в розрахункову залежність (5.41) необхідно ввести параметр, що характеризує її інтегральну міцність R_m :

$$P_m = k \cdot k_v \cdot I_m \cdot R_m, \quad (5.43)$$

$$R_m = R_{cm} \cdot k_p, \quad (5.44)$$

де R_m – інтегральна міцність середньої частини поля зрошення;

k_p – коефіцієнт, що враховує зниження інтегральної міцності середньої частини торосу R_m залежно від

від її пористості p_m .

Під час визначення параметра I_m у розрахункову залежність (5.42) замість товщини рівного крижаного поля h_d вводиться товщина середньої консолідованої частини розрахункового торосистого утворення h_m . Таким чином, метод розрахунку локального льодового тиску враховує площі контакту, ефективну швидкість деформації, властивості міцності льоду, його складний напружений стан у зоні контакту і типи льодових утворень (рівні льодові поля, поля торосіння). Використання цього методу дає змогу з достатнім для інженерної практики ступенем точності визначати максимальні значення локального льодового тиску на опорні частини як морських, так і річкових гідротехнічних споруд.

5.5. Врахування стираючого впливу дрейфуючих льодових утворень

Силовий вплив дрейфуючих льодових утворень на гідротехнічні споруди різних типів призводить до їх стирання в зоні контакту. Зона контакту з льодовими утвореннями залежить від величини коливання рівня води. Інтенсивність стирання пов'язана з льодовою ситуацією в місці зведення споруд, а також від марки, складу бетону і його

якості. Перераховані фактори слід враховувати в процесі проектування.

Вивченням стирання дрейфуючими льодовими утвореннями залізобетонних конструктивних елементів гідротехнічних споруд займалися дослідники різних країн світу /7, 29, 30, 61, 62, 65, 66, 71/. Натурні спостереження, присвячені цій проблемі, показали, що в період весняного льодоходу на річках глибина руйнування бетону залізобетонних набережних, у зоні контакту рівних крижаних полів, досягала до 0,4 м /29, 57/. Слід зазначити, що міцність річкового льоду в повінь ослаблена порівняно з морським льодом, що дрейфує, взимку. З цієї причини морські гідротехнічні споруди, які експлуатуються в замерзаючих морях, зазнають впливу дрейфуючих утворень із максимальними характеристиками міцності.

Оскільки одним із найпоширеніших матеріалів, які застосовують у гідротехнічному будівництві, зокрема й під час зведення льодостійких морських платформ, є залізобетон, то питання стирання цього матеріалу багатьма дослідниками вирішуються в лабораторних умовах. Такі експериментальні дослідження проводять на спеціально створених установках, на яких можуть випробовувати не тільки зразки бетону різних марок, а й інших матеріалів.

Це насамперед стосується різних марок сталей, з яких виготовляють спеціальні бандажі, що встановлюють на опорних частинах споруд у зонах контакту з льодовими утвореннями.

На підставі досвіду експлуатації таких бандажів для їхнього виготовлення рекомендується використання плакованої сталі, що має підвищену міцність і опірність стираючому впливу льоду. У разі використання звичайних сталей у зоні активної дії льоду необхідно передбачати збільшення товщини обшивки корпусу опорного блока на величини, які наведені в таблиці 5.14 /7/. Висоту зони контакту над рівнем моря призначають виходячи з товщини консолідованого шару розрахункового торосистого утворення і коливання рівня води.

Таблиця 5.14

Рекомендоване збільшення товщини металеві
обшивки корпусу опорного блоку

Висота над середнім рівнем моря, м	Збільшення товщини, мм
$z \geq 2,0$	3,0
$-4,0^* \leq z < 2,0$	6,0
$z < -4,0^*$	1,5

Слід зазначити випадок часткового руйнування обшивки з плакованої сталі під впливом рівних крижаних

полів і торосистих утворень на платформі "Молікпак", яка експлуатується на шельфі о.Сахалін в Охотському морі.

У компанії Sandwell були проведені дослідження з дослідження стирання залізобетонної конструкції платформи "Молікпак". В експериментах випробовували на стирання бетонні зразки за міцності льоду на одновісний тиск, що дорівнює 3,5 МПа, за притискного контактного тиску 0,5 і 1,0 МПа. На підставі аналізу результатів дослідів було отримано експериментальну залежність величини стирання бетону від довжини шляху стирання, що приведена на рис. 5.14.

За результатами випробувань було рекомендовано прийняти нормативне значення стирання бетону, що дорівнює 0,3 мм на 180 погонних км дрейфуючого льоду за притискного тиску в 1,0 МПа.

Експериментальні дослідження зі стирання бетонних зразків абразивним матеріалом проводили в Галузевій науково-дослідній лабораторії морських нафтогазопромислових гідротехнічних споруд Московського державного будівельного університету /10/.

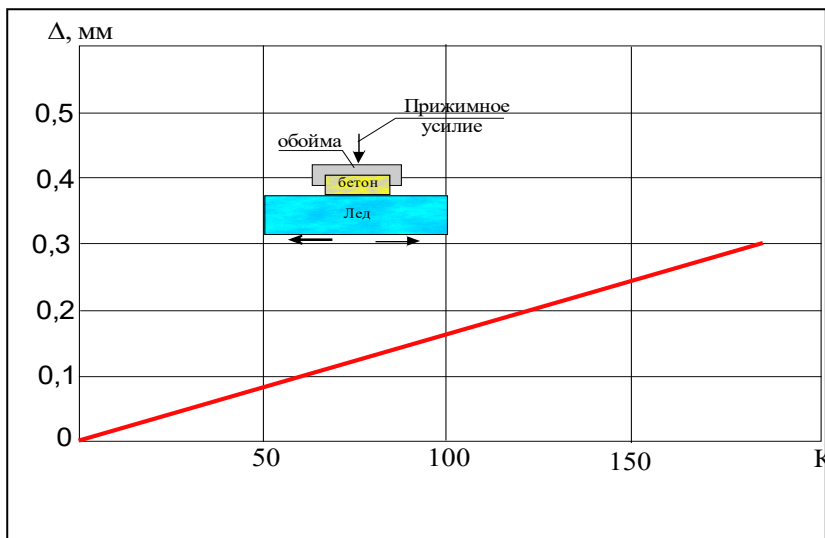


Рис.5.14. Залежність величини стирання бетону від довжини шляху стирання

У досліджах вивчали зміну швидкості стирання різних зразків бетону і коефіцієнтів тертя. На підставі аналізу результатів експериментів були встановлені швидкості стирання шести зразків за абразивним матеріалом (карбід кремнію) і розраховані достовірні значення коефіцієнтів стирання бетону. Досвід експлуатації гідротехнічних, мостових бетонних і залізобетонних конструкцій показав, що стирання може досягати 10 мм/рік завдяки високій швидкості дисипації енергії сил тертя льоду по поверхні цих матеріалів.

5.6. Призначення відмітки низу верхньої будови морських нафтогазопромислових гідротехнічних споруд (МНГС)

Під час взаємодії дрейфуючих рівних крижаних полів з опорними частинами морських гідротехнічних споруд у районі змінного рівня води внаслідок руйнування льоду відбуватиметься нагромадження його уламків (див. рис. 5.15).

Залежно від цілої низки чинників висота нагромажень може змінюватися. Визначальними з них є ширина споруди або її опорної частини, товщина і міцність льоду, глибина води і швидкість дрейфу рівних крижаних полів при підході до споруди. Неприятливий збіг цих обставин може призвести до небажаної реалізації і вертикальної складової льодового навантаження на гідротехнічні споруди. При цьому уламки льоду можуть досягти верхньої будови (палуби) і спричинити ушкодження обладнання, що знаходиться там.

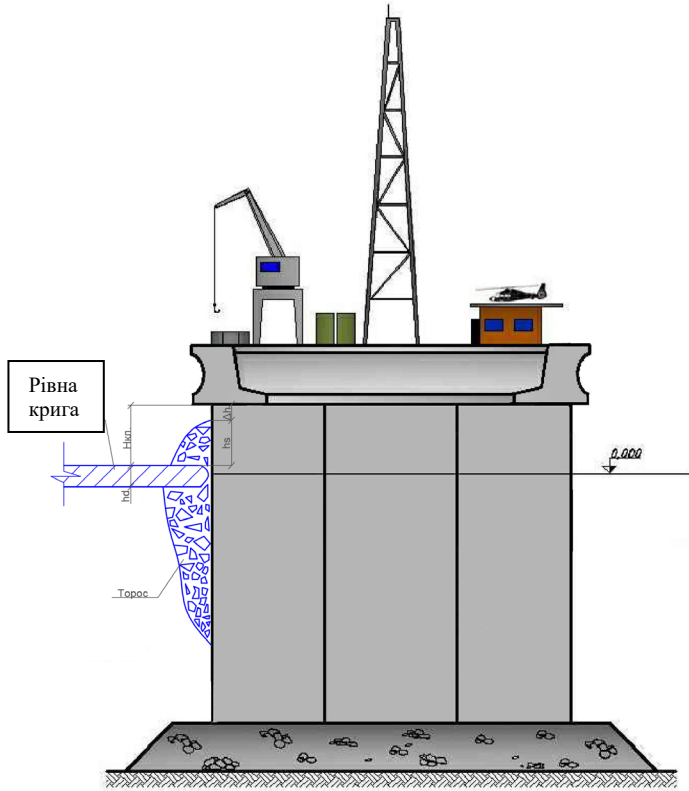


Рис.5.15. Схема утворення уламків льоду під час дії рівних крижаних полів на споруди континентального шельфу

Таким чином, у процесі проектування морських нафтогазопромислових гідротехнічних споруд необхідно передбачати такі несприятливі сценарії з метою їх виключення на період експлуатації. Як і в разі силового впливу вітрових хвиль /44/, позначку низу верхньої будови над максимальним розрахунковим рівнем води необхідно при-

значати такою, щоб не допускати контакту уламків льоду надводної частини нагромаджень із низом верхніх (надводних) будов МНГС.

Основний нормативний документ /50/ не містить конкретних рекомендацій з цього важливого питання, оскільки його вирішення вимагає багатосторонніх натурних спостережень та лабораторних досліджень. Проте, один із наближених підходів, представлений у цьому параграфі, може бути використаний проєктувальниками на попередніх стадіях проєктування.

У більшості випадків висота надводної частини нагромаджень уламків льоду перед спорудами буде формуватися аналогічно висотам вітрил торосів на глибокій воді /74, 75/. В залежності від відносної ширини споруд або їхніх опорних частин (при $D/h_a \geq 10$), висоту надводної частини нагромадження h_s на перших стадіях проєктування можна визначати, використовуючи емпіричну залежність (5.22). З урахуванням інженерного запасу і коливання рівня води, висота позначки низу палуби (висота кліренсу H_{kl}) над розрахунковим максимальним рівнем води, може призначатися за допомогою такої наближеної залежності /45/:

$$H_{kl} \approx 3,69\sqrt{h_r} + \Delta h \quad (5.45)$$

де: H_{kl} – відстань у м, між розрахунковим максимальним рівнем води 1% забезпеченості та відміткою низу палуби МНГС, що проєктується;

h_s – висота надводної частини нагромадження з уламків льоду рівного крижаного поля розрахункової міцності і товщини h_d у м (див. 5.22);

h_r - товщина уламків льоду, що складають торос;

Δh – інженерний запас у м, який призначається з урахуванням впливу розрахункових параметрів вітрових хвиль у системі шторму розрахункової повторюваності в районі будівництва, у безлідні періоди року і розрахункового рівня води.

Уточнення параметра H_k може бути здійснено на підставі аналізу даних експериментальних лабораторних лабораторних і модельних досліджень з використанням струк-турно-модельованого льоду в процесі його силової дії на моделі споруд, що проєктуються.

За великих глибин води, а також порівнянних із розмірами кільвої частини розрахункового торосу в місці будівництва та відносної ширини розрахункового торосу споруди $D/h_d \leq 10$, висота кліренсу H_{kl} має призначатися в процесі наукового супроводу тільки на підставі аналізу ре-

зультатів експериментальних лабораторних лабораторних модельних досліджень.

Цей підхід буде також виправданий і під час проєктування маяків, рейдових причалів та опор мостів як на річках, лиманах, так і в протоках. У процесі проєктування рейдових причалів на морях і мостів на малих річках слід розглядати й екстремальні випадки реалізації вертикальної та горизонтальної складових льодового навантаження на надводні частини споруд в суворі зими рідкісної повторюваності.

5.7 Захист підводних комунікацій від силового впливу кильової частини торосів

У тих випадках, коли морські родовища вуглеводнів, що облаштовуються, перебуватимуть у відносній або безпосередній близькості від берегів, стає економічно доцільним і технічно привабливим здійснювати їх енергопостачання з берега. Нерідко під час розроблення газоконденсатних родовищ скраплений газ транспортують на сушу підводними трубопроводами. У випадках розроблення нафтових родовищ, видобуту нафту можуть накопичувати в нафтосховищах, а потім нафтопроводом подавати на

рейдові причали, що розташовані безпосередньо в межах промислу. І в тих, і в інших випадках з берегових баз можна прокладати відповідні комунікації у вигляді електричних кабелів високої напруги і трубопроводів різного призначення. Аналогічним чином здійснюватиметься й енергопостачання точкових терміналів для відвантаження водневої сировини в танкери, а також навігаційних знаків, які встановлюють на відкритих акваторіях.

У морях, що замерзають, а також у суворі зими рідкісної повторюваності в морях із помірним кліматом, таких як Балтійське, Азовське, Чорне і Каспійське, відбуваються процеси торошіння рівних крижаних полів. Як свідчать натурні спостереження, поодинокі тороси і поля торошіння, перебуваючи у вільному дрейфі, часто взаємодіють своєю кільовою частиною з донними ґрунтами. При перетині мілководних ділянок дна, де глибини води будуть порівнянними з розмірами кільової частини розрахункових торосів, підводні комунікації будуть піддаватися силовому впливу дрейфуючих торосистих утворень. У результаті такого впливу можуть відбуватися розриви комунікаційних мереж і підводних трубопроводів, які призведуть до порушення безперебійної роботи промислів, відвантаження видобувної сировини та роботи

навігаційного устаткування, що, безсумнівно, призведе до різних витрат, зокрема й до екологічних катастроф.

Щоб уникнути розривів підводних трубопроводів та інших комунікацій на таких ділянках донних поверхонь і пов'язаних із цим можливих втрат, необхідно ще на стадії проектування таких об'єктів передбачати відповідні заходи їхнього захисту від силового впливу кильової частини торосистих утворень. Цей вплив може бути істотним, якщо дрейфуючи тороси, будуть являти собою стамухи, що знялися з мілини під впливом низки природних чинників. Наприклад, за різкого підвищення рівня води й одночасної дії в одному напрямку вітру та течій. Як показують дані натурних спостережень, у торосах, що сидять на міліні (стамухах), відбувається майже повна консолідація (промерзання) кильової частини, а також часткове промерзання ґрунту навколо кіля. Такі тороси, при вторинній посадці на міліну, являють собою найбільшу небезпеку для підводних трубопроводів і комунікацій, що прокладаються по морському дну.

Рекомендації щодо захисту підводних трубопроводів розробили на підставі експериментів, виконаних у Галузевій науково-дослідній лабораторії морських нафтогазовпромислових гідротехнічних споруд ім. М.М. Джун-

ковського Московського державного будівельного університету. М.М. Джунковського Московського державного будівельного університету. Проведення таких експериментів потребувало розроблення і створення унікальної експериментальної установки /8, 9/.

Силовий вплив кільвої частини торосів на підводні комунікації можна запобігти шляхом їхнього заглиблення під рівень дна, нижчого за глибину впливу кіля розрахункового тороса /43/. При цьому необхідно враховувати цілу низку параметрів, які слід призначати на підставі аналізу результатів інженерних вишукувань у районі будівництва. До них, насамперед, належать: розрахункові рівні води; топографія дна; розміри розрахункового торосу і його міцнісні властивості; фізико-механічні характеристики поверхневих шарів донного ґрунту.

Як відомо, у процесі взаємодії кільвої частини торосів із донними ґрунтами відбувається їх проорювання з утворенням траншей, профілі яких відповідають конфігурації кільвих частин торосів. Проорювання припиняється, коли енергія дрейфу торосів врівноважується пасивним тиском ґрунту в процесі посадки торосів на мілини, а також деяким випором і поворотом торосів /26/. Під кілеви-ми частинами торосів, у міру їх впровадження в морське дно, виникає напружено-деформований стан у поверхне-

вих шарах ґрунтів, інтенсивність якого загасає з глибиною. Таким чином, щоб уникнути поривів підводних комунікацій та трубопроводів або їх неприпустимої деформації, яка може стати причиною порушення їхньої герметичності, необхідно щоб:

- проєктне положення кабелю або трубопроводу було б нижче за позначку кіля розрахункового торосу;

- напруження в ґрунті під кільовою частиною розрахункового торосу не повинні перевищувати допустимих для проєктованих комунікацій і трубопроводів.

Безпечна величина заглиблення кабелів або трубопроводів в донні ґрунти може визначатися виходячи з низки міркувань, підтверджених інженерною практикою /7/. Так, на рис. 5.16 наведено схему взаємодії кільової частини торосів під час перетину лінії прокладання підводної комунікації у вигляді електричного кабелю або трубопроводу за розрахункової позначки рівня води 98% забезпеченості. Такий випадок в принципі є екстремальним розрахунковим сценарієм, оскільки будь-яке підвищення рівня води над цією позначкою являє собою цілком певний запас.

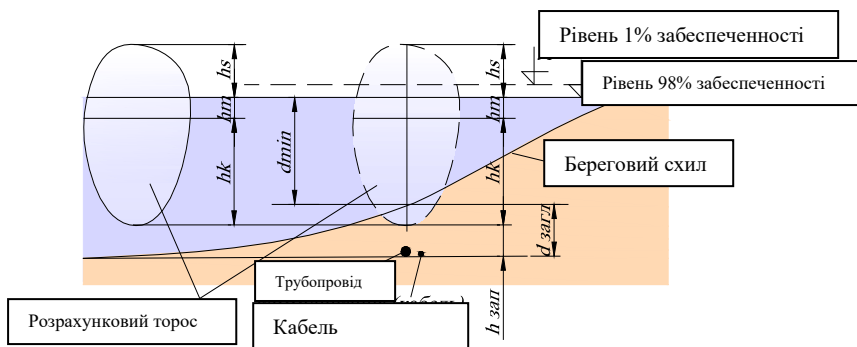


Рис.5.16. Положення розрахункового торосу над трубопроводом або комунікацією за мінімального рівня води

В якості розрахункових можуть розглядатись два сценарії. Перший із них відповідає проходженню кіля торосу над трасою комунікації без зупинки за мінімального рівня води в районі будівництва. Тоді величина заглиблення трубопроводу або кабелю під рівень дна може бути визначена за допомогою наведеної нижче залежності:

$$d_{\text{загл}} = h_m + h_k + h_{\text{запаса}} - d_{\text{min98\%}}, \quad (5.46)$$

де: h_m та h_k – відповідно товщина консолідованої

і кільової частин розрахункового торосу;

$h_{\text{запаса}}$ – величина запасу, що дорівнює відстані між відміткою кіля і відміткою закладення трубопроводу або кабелю;

$d_{\text{min98\%}}$ – глибина води в районі будівництва 98% забезпеченості.

Слід зазначити, що якщо глибина води у створі перевищить суму параметрів ($h_m + h_k + h_{\text{запасу}}$), то в цьому випадку $d_{\text{загл}}$ стане негативною величиною. Це означатиме, що кінь розрахункового торосу в цій точці не торкнеться дна і в таких випадках різного роду комунікації, зокрема й трубопроводи, можна прокладати по поверхні дна. Величина запасу $h_{\text{запасу}}$ при цьому може призначатися виходячи лише з фізико-механічних властивостей донних ґрунтів. З огляду на ту обставину, що поверхневі шари донних ґрунтів у більшості випадків представлені мулами, то величина запасу може не перевищувати одного метра. Такі запаси було прийнято в цілій низці реалізованих проєктів.

До другого розрахункового випадку можна віднести момент зупинки торосу над трасою комунікації. Тоді трубопроводи або кабелі опиняться в зоні напружено-деформованого стану ґрунтів. У таких випадках величина безпечного заглиблення під рівень дна залежатиме від фізико-механічних характеристик ґрунтів, закону розподілу напружено-деформованого стану ґрунту за його глибиною, а також гранично-допустимого тиску на підводні трубопроводи або кабелі.

Слід особливо зазначити, що ймовірність реалізації такого розрахункового сценарію порівняно з попереднім

досить незначна. З цієї причини основним розрахунковим випадком є перший.

Глибина заглиблення від рівня дна, у міру наближення комунікацій до урізу води, має призначатися, виходячи з особливостей літодинамічних процесів, що відбуваються в береговій зоні безпосередньо в зоні прокладання.

5.8. Конструктивні елементи для зниження льодових навантажень на гідротехнічні споруди

Зниження величин льодових навантажень на опорні частини гідротехнічних споруд різних типів та призначення є актуальною технічною проблемою. Її можна розв'язати завдяки влаштуванню конструктивних елементів, що викликають концентрацію напружень у дрейфуючих льодових утвореннях. У таких випадках руйнування, наприклад, рівних крижаних полів відбуватиметься не завдяки зім'яттю і дробленню льоду. У початковий момент контакту рівного крижаного поля з конструктивними елементами на спорудах у ньому розвиватимуться окремі тріщини або система радіальних і кільцевих тріщин. Це дасть змогу змінити характер реалізації льодового навантаження в позитивний бік, оскільки збільшиться часовий інтервал між

зростанням піків льодового навантаження та його падіннями.

Фахівцями в галузі споруд континентального шельфу сформульовано низку технічних пропозицій, використання яких в інженерній практиці дасть змогу не тільки знижувати льодові навантаження, але й зменшити стираючий вплив дрейфуючих льодових утворень. А загалом це призведе до зменшення матеріаломісткості опорних частин і до збільшення терміну служби як морських, так і річкових гідротехнічних споруд. Слід також зазначити, що такі конструкційні елементи можна використовувати і на інших типах гідротехнічних споруд, зокрема й на мостових опорах.

Одну з таких пропозицій, яка захищена авторським свідоцтвом СРСР /38/, представлено в цьому параграфі у вигляді льодостійкої платформи типу "мостопод". Таку споруду можна успішно використовувати в замерзаючих морях із помірною льодовою обстановкою під час облаштування морських родовищ вуглеводнів (див. рис. 5.17).

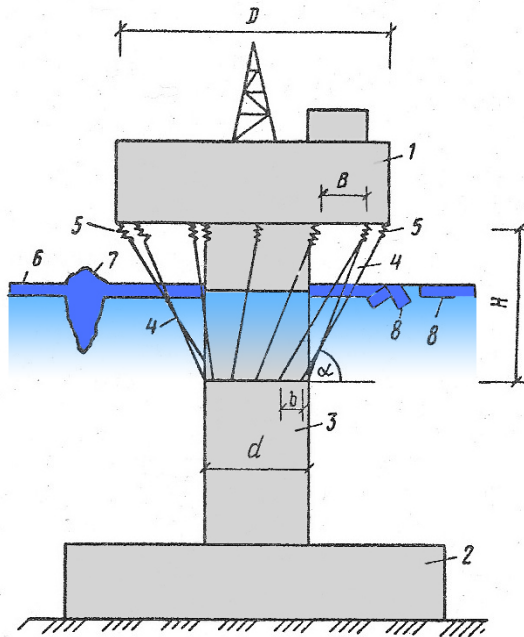


Рис. 5.17. Льодостійка гідротехнічна споруда

- 1 - верхня будова; 2 - фундаментна частина;
 3 – опорна частина; 4 – льодоруйнівні елементи
 у вигляді системи металевих тросів; 5 – амортизатори;
 6 – рівне крижане поле; 7 – торосисте утворення;
 8- уламки льодових утворень.

Взаємодія такої гідротехнічної споруди з дрейфуючими льодовими утвореннями (рівними крижаними полями та поодинокими торосами) буде відбуватися таким чи-

ном. Залежно від діаметра опорної частини споруди, кута α до твірної конічної поверхні, розмірів льодових утворень та їхніх міцнісних характеристик, з урахуванням кліматичних умов регіону, де буде зведено споруду, призначаються відстані B і b між льодоруйнівними елементами. Жорсткість амортизаторів має відповідати максимальним зусиллям, що будуть виникати в льодоруйнівних елементах. У дрейфуючих рівних крижаних полях, що контактуватимуть із кригоруйнівними елементами, розташованими під кутом α до твірної конічної поверхні, виникатиме складний напружений стан. Рівні крижані поля руйнуватимуться завдяки їхньому вигину та частковому прорізання, що призведе до значного зниження льодового навантаження на споруду. Система льодоруйнівних елементів у просторі навколо опорної частини сприятиме зміні траєкторій уламків льоду і частково зменшить їхній контакт безпосередньо зі спорудою. У результаті стираючий вплив льодових утворень у зоні контакту на матеріал споруди буде знижено. Слід також зазначити, що в безлідні періоди року така система льодоруйнівних елементів не викличе збільшення хвильових навантажень від впливу штормових хвиль.

Крім цієї технічної пропозиції, у світі є багато конструктивних рішень, використання яких на опорних частинах гідротехнічних споруд, зокрема й на морських нафтогазопромислових, може істотно знижувати льодові навантаження. Ефективність їх застосування може бути визначена на підставі експериментальних досліджень у процесі наукового супроводу кожного реального проекту.

ВИСНОВОК

У цьому підручнику викладено відомості про процеси утворення льоду на акваторіях річок, озер, водосховищ і морів, а також про типи льодових утворень, які, перебуваючи в стані дрейфу, становлять найбільшу небезпеку для гідротехнічних споруд. Багаторічний практичний досвід автора з дослідження льодових утворень в Охотському, Карському та Баренцевому морях дав змогу стисло викласти методи досліджень міцності та метричних характеристик рівних крижаних полів, полів торосіння та одиноких торосів, зокрема й стамух. Ці методи використовують дослідники під час інженерних вишукувань на шельфі замерзаючих морів у різних країнах світу.

Великомасштабні експерименти з впливу торосів на моделі опорних частин гідротехнічних споруд дали змогу розробити відповідний метод розрахунку льодових навантажень з урахуванням розмірів та інтегральної міцності складових частин торосистих утворень. Цей метод розрахунку було впроваджено у відомчий нормативний документ.

Численні експериментальні дослідження було проведено (у рамках міжнародного проекту) в натурних умовах із втіленням жорстких штампів різної площі в природний

льодовий покрив і в моделі консолідованої частини торосів із різною пористістю. Результати цих досліджень дали змогу розробити рекомендації з розрахунку максимальних значень локального тиску льоду на опорні частини гідротехнічних споруд, які було також включено до відомчих норм для використання в проєктній практиці. Таким чином, цей підручник буде корисним для студентів - гідротехніків, особливо для майбутніх фахівців в морському гідротехнічному будівництві.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алексеев Ю.Н., Афанасьев В.П. и др. Ледотехнические аспекты освоения морских месторождений нефти и газа. ГМС, 2001, Санкт-Петербург, 340 с.

2. Арнольд-Алябьев В.И. Мощность, строение и плотность льда Карского моря по данным экспедиции л/к «Малыгин» в 1934г. Тр. ААНИИ, т.110, 1938.

3. Белов А.Б., Варданын С.С., Копайгородский Е.М., Носков Б.Д., Рогачко С.И. Взаимодействие торосистых образований с цилиндрическими опорами гидротехнических сооружений. Сборник научных трудов «ПОРТОВОЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО И ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ МОРЯ», «ТРАНСПОРТ», М., 1986.

4. В.В. Богородский, В.П. Гаврило. ЛЕД. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Гидрометео-издат Л 1980.

5. Буйницкий В.Х. Ледоисследовательские работы. – Труды советских антарктических экспедиций, 1962, т. 20, с. 114 – 140.

6. Варданян С.С., Белов А.Б., Носков Б.Д., Рогачко С.И. Исследование воздействия торосистых образований на сооружения континентального шельфа. “Воздействие внешних факторов на морские гидротехнические сооружения”. Межвузовский сборник научных трудов, М., 1986, с. 148-157.

7. Вершинин С.А. и др. Воздействие льда на сооружения Сахалинского шельфа. М., 2005.

8. Вершинин С.А., Левачев С.Н., Правдивец Ю.П., Рогачко С.И., Шунько Н.В. Установка для испытания устойчивости морских гидротехнических сооружений. ПАТЕНТ РОССИИ на изобретение №83480 Москва 2008

9. Вершинин С.А., Левачев С.Н., Правдивец Ю.П., Рогачко С.И., Шунько Н.В. Установка для исследования деформаций в грунтах при вариативных силовых воздействиях. Научно-технический журнал Вестник МГСУ ПЕРИОДИЧЕСКОЕ НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ №5/2011 Москва

10. С.А. Вершинин, Н.Д.Зуев, Н.В.Шунько Исследование истирания бетона сооружений континентального шельфа. Научно-технический журнал Вестник МГСУ ПЕРИОДИЧЕСКОЕ НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ №5/2011 Москва

11. ВСН 51.2-84. Инженерные изыскания на континентальном шельфе. Рига. 1985.

12. ВСН 41.88. Проектирование ледостойких стационарных платформ. Миннефтепром СССР, М., 1988, 138 с.

13. Глухов С.В. К проблеме обледенения морских сооружений, предназначенных к работе в условиях Карского моря // Морская технология. – 1998. - №4. – С. 13 – 15.

14. А.М. Гусев. Курс общей геофизики. ОСНОВЫ ОКЕАНОЛОГИИ МГУ, М. 1983.

15. ДБН В.1.2 – 2 : 2006 Нагрузки и воздействия (Минстрой Украины К. 2006).

16. Доронин Ю.П., Хейсин Д.Г. Морской лед. Л., Гидрометеиздат, 1975, 1 – 318

17. Зубов Н.Н. Льды Арктики. – М.: Изд. Главморсевпути. 1944 – 360 с.

18. Исследование взаимодействия ледяных полей и торосистых образований с ледостойкими опорами в условиях Охотского моря. Отчет о НИР, ОНИЛ МНГС, МИСИ им. В.В. Куйбышева, шифр 350/В-1, В-2, М., 1980.

19. Исследование взаимодействия торосистых образований и ледостойких опор применительно к условиям

Охотского моря. Отчет о НИР, ОНИЛ МНГС, МИСИ им. В.В. Куйбышева, Ч.1 и Ч.2, М., 1983.

20. Исследование взаимодействия торосистых образований и ледостойких опор применительно к условиям Охотского моря. Отчет о НИР, ОНИЛ МНГС, МИСИ им. В.В. Куйбышева, М., 1984.

21. Исследование взаимодействия торосистых образований и ледостойких опор применительно к условиям Охотского моря. Отчет о НИР, ОНИЛ МНГС, МИСИ им. В.В. Куйбышева, Ч.1 и Ч.2, М., 1985.

22. Исследование силового воздействия полей торошения. Отчет о НИР, INTAS Report "CHOICE OF OFFSHORE STRUCTURES FOR ARCTIC REGIONS", М., 1996.

23. Копайгородский Е.М., Вершинин С.А. и др. Устройство для определения несущей способности преимущественно ровных ледяных полей. А.С. № 697833 от 20.07.1979, М.

24. Копайгородский Е. М., Вершинин С. А., Упоров А. В., Нифонтов С.А. Установка для натуральных исследований воздействия льда на гидротехнические сооружения. А.С. № 473781 от 21.02.1975, М.

25. Коржавин К. Н. Воздействие льда на инженерные сооружения. –Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962, 224 с.

26. Лунин А. Ф., Рогачко С. И. Взаимодействие дрейфующих ледовых образований с морским дном. Производственно–технический журнал “ГАЗОВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ”, № 12, М., 1998, с. 49-50.

27. Мальмгрен Ф. О свойствах морского льда. – Л.; Изд. Гидрометеорологического комитета СССР, 1930. – 90с.

28. МЕЖДУНАРОДНАЯ СИМВОЛИКА ДЛЯ МОРСКИХ ЛЕДОВЫХ КАРТ И НОМЕНКЛАТУРА МОРСКИХ ЛЬДОВ. ААНИИ, Л, Гидрометеиздат, 1984. 56 с.

29. Б. Мишель Ледовые нагрузки на гидротехнические сооружения и суда. М. «Транспорт» 1978.112с.

30. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М., Физматгиз, 2007, 367стр

31. Носков Б.Д., Варданян С.С., Копайгородский Е.М., Рогачко С.И., Белов А.Б. и др. Способ создания моделей торосистых образований. Авторское свидетельство № 1219708 от 22.11.1985, М., 1985.

32. Определение влияния пористости на характеристики льда. Отчет о НИР. INTAS Report “CHOICE OF OFFSHORE STRUCTURES FOR ARCTIC REGIONS”, М., 1996.

33. Отчет об экспедиции на ледоколе “Ермак”. Мингазпром, М., 1982, 216 с.

34. Панов В.В. Обледенение судов: Тр. ААНИИ. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – Т. 304.

35. И.С. Песчанский. Ледоведение и Ледотехника. Л - 1967

36. Разработать ведомственные строительнотехнологические нормы (ВСТН) по воздействию торосистых образований на морские ледостойкие стационарные платформы. Отчет о НИР, ОНИЛ МНГС, МГСУ, М., 2000.

37. Рогачко С.И., Варданын С.С. Исследование геометрических и физико-механических параметров торосистых образований. Экспресс-инф. ВНИИЭгазпром, сер. “Геология, бурение и разработка газовых и нефтяных морских месторождений”, Изд. ВНИИЭгазпром, вып. 1, М., 1985.

38. Рогачко С.И., Шibaкин С.И. Ледстойкое гидротехническое сооружение А.С. СССР №1565954 от 22.01. 1990, М., 1990.

39. Рогачко С.И. Метод расчета силового воздействия торосистых образований на стационарные сооружения. Труды четвертой международной конференции “Освоение шельфа арктических морей России”, С. Петербург, 1999, с. 195-199.

40. С.И. Рогачко. “Развитие методов расчета волновых и ледовых воздействий на морские гидротехнические сооружения”. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. М 2003.

41. Рогачко С.И., Святченко В.Н. Разрушение айсбергов взрывным способом. Академические чтения Н.А. Цитовича. 2^{ые} Денисовские чтения. Материалы международного (2^{ого} Всероссийского) совещания заведующих кафедрами механики грунтов, инженерной геологии, основания и фундаментов и подземного строительства вузов и факультетов, М., 2003

42. С.И. Рогачко. Защита морских нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений от воздействия айсбергов. Сборник научных трудов “ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО,

ПОРТЫ И ПОРТОВЫЕ СООРУЖЕНИЯ, ОБЪЕКТЫ СТРОИТЕЛЬСТВА НА ШЕЛЬФЕ”, МГСУ, М., 2004.

43. Рогачко С.И. Безопасность подводных коммуникаций. ВЕСТНИК Одесской государственной академии строительства и архитектуры №34 Одесса 2009

44. Рогачко С.И. Определение отметки низа верхнего строения морских нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений. Ежемесячный научно-технический журнал Гидротехническое строительство. Энергопрогресс. №7 2005 М стр. 15-17.

45. Рогачко С.И. Назначение отметки низа верхнего строения морских нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений при воздействии ровных ледяных полей. ВЕСТНИК Одесской государственной академии строительства и архитектуры ВЫПУСК №51, Одесса, 2013 стр. 234-237.

46. Г.Н. Смирнов. Океанология. М - 1987 г.

47. Г.Н. Смирнов, С.И. Рогачко, Г.Н. Евдокимов О ледовых нагрузках на портовые гидротехнические сооружения. “Транспортное строительство”, №5 научно-технический и производственный журнал, орган Министерства Транспортного Строительства СССР, М., 1990 с.27

48. СВОД ПРАВИЛ “ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОРСКИХ ЛЕДОСТОЙКИХ ПЛАТФОРМ”. Часть I Классификация, общие положения и требования. Нагрузки и воздействия. Остойчивость. СП – 33 – 101 00, М., 2001.

49. СВОД ПРАВИЛ 38.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82*. Нагрузки и взаимодействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов).

50. СНиП 2.06.04-82*. Нагрузки и взаимодействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Минстрой России. - М.: ГИ ЦПП, 1995. 48 с.

51. СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия Госстрой СССР М.1985.

52. Трусков П.А. Ледотехнические аспекты создания объектов обустройства морских месторождений нефти и газа (на примере Охотского моря). Автореферат диссертации, С. Петербург.: ГНЦ РФ ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1997, 33 с.

53. Указания по расчету нагрузок (волновых, ледовых и от судов) на гидротехнические сооружения. Раздел 6. Ледовые нагрузки на гидротехнические сооружения. Отчет о НИР, ОНИЛ МНГС, МГСУ, М., 1998.

54. Указания по расчету нагрузок и воздействий от волн, судов и льда на морские гидротехнические сооружения. Р 31.3.07-01, М., 2001. Дополнение и уточнение СНиП 2.06.04–82* “Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов), М., 1995.

55. Черепанов Н. В. Систематизация кристаллических льдов в Арктике. – Проблемы Арктики и Антарктики, 1972, вып. 40, с. 78 – 83.

56. Черепанов Н. В. Классификация льдов природных водоемов. – Труды ААНИИ, 1976, т. 331, с. 77 – 99.

57. Шанкин П.А. К вопросу о расчете на прочность бетонного покрытия откоса на воздействие ледового припая. – «Гидротехническое строительство», 1961, №3 с. 32 – 34.

58. Шулейкин В.В. Физика моря. – М.; Наука, 1968. – 1083с.

59. CHOICE OF OFFSHORE STRUCTURES FOR ARCTIC REGIONS. Отчет о НИР. Experiments on the strength of refrozen layers of first-year ice ridges. INTAS Report, М., 1997.

60. CHOICE OF OFFSHORE STRUCTURES FOR ARCTIC REGIONS. Отчет о НИР. Final Report RTE38-IR-

4/1997, VTT BUILDING TECHNOLOGY, Espoo, Finland, 1997.

61. Hara F., Saeki H., Sato M., Takahashi Y. and Tachibana H. Prediction of the degree of abrasion of bridge piers by fresh water ice and the protective measures. Proc. of Intern. Conf. On Concrete under Severe Conditions, CONSEC'95 Sapporo, Japan, vol. 1, pp. 485 – 494.

62. Houvinen S. Abrasion of Concrete by ice in Arctic Sea Structures. VTT Publications 62, Espoo, 1990, pp. 110

63. IAHR Recommendations on Testing Methods for Ice. 3rd Report of working Group on Testing Methods in ice. Proc. "IAHR – symposium on ice", Quebec, 1981, 2, 938 – 952.

64. IAHR Recommendations on Testing Methods for Ice. 4th Report of working Group on Testing Methods in ice. Proc. "IAHR – Ice symposium - 1984", Hamburg, 4, 1 – 36.

65. Janson J.E. et al. Impact of ice Swedish Offshore Lighthouses. Main Report, vol.1, 1984.

66. Janson J.E. Field Investigation of ice Impact on Lightweight Aggregate Concrete. Report №1, Test Arrangements. Result from the Winter Season. 1986-1987, 1987.

67. Koma N. et al. Design Consideration of Global Ice Load Distribution and Local Ice Pressure on Offshore Structures – OMAE, Houston, 1987.

68. Lennart Fransson, Lars Stehn. POROSITY EFFECTS ON MEASURED STRENGTH OF WARM ICE. The 12th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions 17-20 August 1993. Hamburg.

69. Lepparanta M. and Hakala R. The structure and strength of first-year ice ridges in the Baltic Sea. Cold Region Science and Technology, 20, 1992, p. 295-311.

70. Li Zhijun, Peng Wanwei, Zhang Tao, Lu Ming, Gao Shugang. EFFECT OF POROSITY UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH OF ICE IN LIAODONG GULF. The tenth international symposium on OKHOTSK SEA, SEA ICE & PEOPLES. MOMBETSU, HOKKAIDO, JAPAN, 1995.

71. Newhook J.P. and McGinn D.J. Ice Abrasion Assessment – Piers of Confederation Bridge Engineering Summit. Charlottetown, PEI. – Canada, 2007, August 19-22.

72. Nortala-Hoikkanen A. Shtockman Field Development Study. Spring 1991. Barents Sea Expedition, Part 2, 1991.

73. Noskov B.D. and Rogachko S.I. DETERMINATION OF THE ICE LOADS ON OFFSHORE STRUCTURES FROM FIRST YEAR RIDGES. Proceedings the 15th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition, Helsinki, Finland 1999, vol. 3.

74. Parmeter R.R. and Coon M.D. Model of pressure ridge formation in sea ice. *Journal of Geophysical Research*, 1972, vol. 77, No. 33, p. 6565-6575.

75. Parmeter R.R. and Coon M.D. Mechanical models of ridging in the Arctic sea ice cover. *AIDJEX Bulletin*, 1973, No. 19, p. 59-112.

76. RELIABILITY OF ENGINEERING FACILITIES IN THE ARCTIC SEAS. Отчет о НИР, INTAS project, M., 2002.

77. Rogachko S.I. and Tuomo Karna. EXPERIMENTS ON THE STRENGTH OF REFROZEN LAYERS OF FIRST-YEAR ICE RIDGES. Proceedings the 15th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition, Helsinki, Finland, 1999, vol.3.

78. Rogachko Stanislav I., Evdocimov Gennady N., Melnikov Michail V., Tuomo Karna, Eila Lehmus. THE INFLUENCE OF POROSITY ON MECHANICAL STRENGTH OF HUMMOCKS. Proceedings of the 16th International Conference OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING and Proceedings of the 14th International Conference Port and Ocean Engineering under Arctic Condition, Yokohama, Japan, 1997, vol. IV.

79. Rogachko S.I., Evdokimov G.N., Burdjug T.P. THE ACTION OF SEA ICE ON OFFSHORE CONSTRUCTION. PROCEEDINGS of the 13th INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING VOLUME IV Houston, Texas, USA, 1994.

80. Rogachko S.I., Istomin A.D. and Tuomo Karna. INDENTATION TESTS ON LAKE ICE. Proceedings of the 16th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions POAC'01 Ottawa, Ontario, CANADA, 2001, p. 649-656.

81. STANDARDIZED TESTING METHODS FOR MEASURING MECHANICAL PROPERTIES OF ICE. Prepared by the Working Group on Standardized Testing Methods in Ice, IAHR Section on Ice Problems. J. Shwarz, R. Fredercing, V. Gavrillo, I.G. Petrov, K.I. Hirayama, M. Mellor, P. Tryde and K.D. Vaudrey. Cold Regions Science and Technology, 4, 1981, p. 245-253.

82. Tucker W.B. and Govoni J.W. Morphological investigations of first-year sea ice pressure ridge sails. Cold Regions Science and Technology, 1981, vol. 5, p. 1-12.

Автор цього підручника буде щиро вдячний за побажання, зауваження та відгуки, які можна надіслати на електронну адресу: rostasice@ukr.net

Наукове видання

Рогачко Станіслав Іванович

Льодові навантаження
та впливи на гідротехнічні споруди
Підручник
(українською мовою)