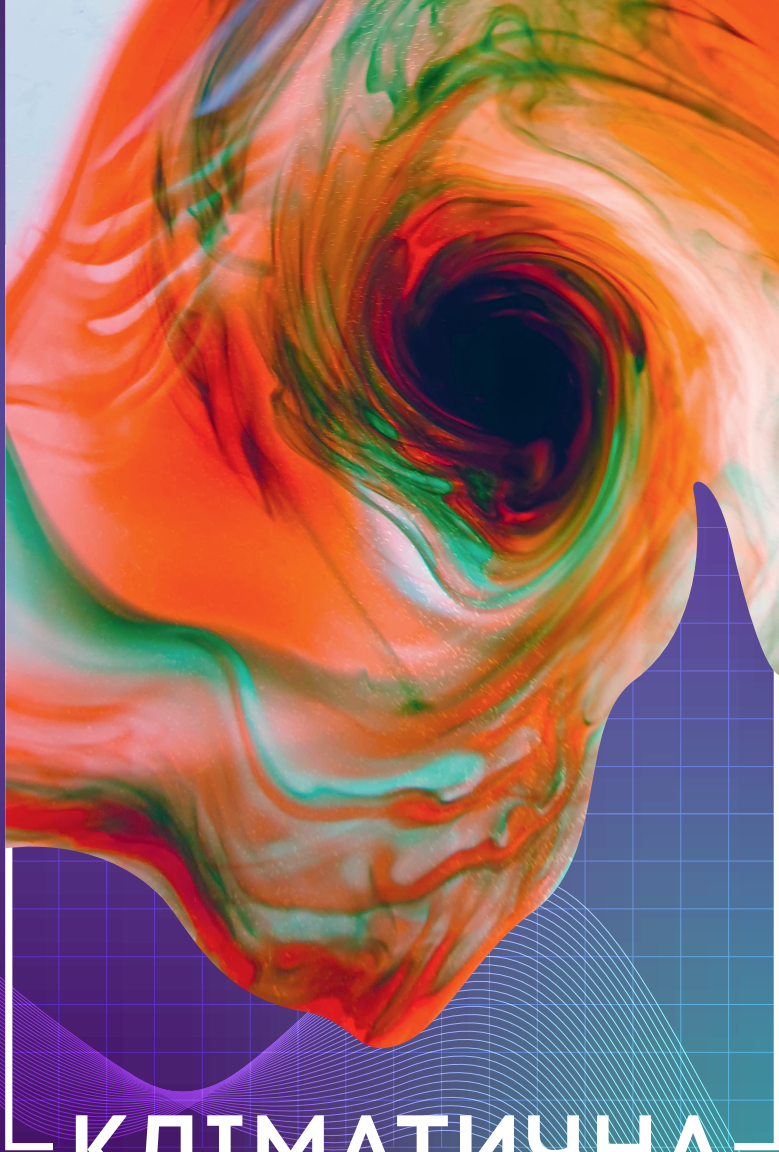




НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК

КЛІМАТИЧНА ОСВІТА

ФІЗИКА
АТМОСФЕРИ
І ОКЕАНУ

МІНІСТЕРСТВО
ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ НАУК
УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ЦЕНТР
«МАЛА АКАДЕМІЯ НАУК
УКРАЇНИ»

КЛІМАТИЧНА ОСВІТА

ФІЗИКА
АТМОСФЕРИ
І ОКЕАНУ

НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК

КИЇВ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЦЕНТР
«МАЛА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ»
2025

Укладачі:

К. В. Терлецька – завідувачка лабораторії математичних наук НЦ «МАНУ», старша наукова співробітниця Інституту проблем математичних машин і систем НАН України, д. фіз.-мат. наук;

І. С. Чернецький – завідувач відділу створення навчально-тематичних систем знань НЦ «МАНУ», канд. пед. наук;

С. О. Довгий – академік НАН України, президент НЦ «МАНУ», д. фіз.-мат. наук

Рецензенти:

В. М. Косик – директорка Центру освітнього консультування, старша викладачка Інституту післядипломної освіти Київського столичного університету імені Бориса Грінченка;

Д. В. Пішняк – завідувач відділу фізики атмосфери та геокосмосу Державної установи Національний антарктичний науковий центр, канд. геогр. наук

Рекомендовано для використання в освітньому процесі рішенням науково-методичної ради Національного центру «Мала академія наук України» (протокол № 3 від 26.06.2024)

Кліматична освіта: фізика атмосфери і океану : навч.-метод. посіб. / уклад.: К. В. Терлецька, І. С. Чернецький, С. О. Довгий. – Київ : Національний центр «Мала академія наук України», 2025. – 276 с.

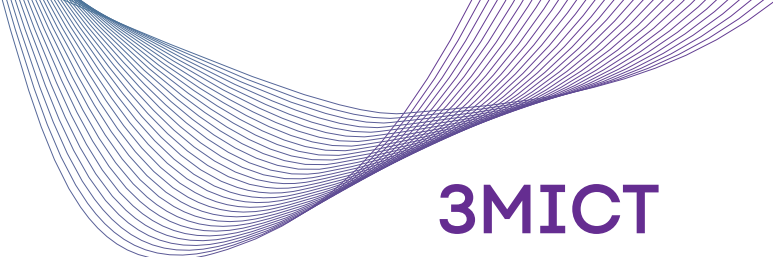
ISBN 978-617-7945-81-8

Видання призначене для використання в освітньому процесі у закладах позашкільної та загальної середньої освіти. Матеріали посібника відповідають навчальній програмі «Зміни клімату» та презентують теоретичні й практичні підходи до організації роботи з дітьми та учнівською молоддю в гуртках і на уроках фізики і географії. Посібник пропонує пояснення, як влаштована і функціонує кліматична система, як і чому відбуваються зміни клімату та яка роль людини в цих змінах.

УДК 551.5

© Терлецька К. В., Чернецький І. С.,
Довгий С. О., укладання, 2025
© Національний центр
«Мала академія наук України», 2025

ISBN 978-617-7945-81-8



ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	7
ВСТУП	9
Розділ 1. КЛІМАТ І ЙОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	12
1.1. Глобальні кліматичні зміни	13
1.2. Погода і клімат	17
1.3. Фізичні моделі кліматичних явищ. Основи теорії подібності	23
1.4. Лабораторна установка для моделювання руху атмосфери та океану.....	27
1.5. Питання та завдання до розділу 1	31
Розділ 2. ПЛАНЕТА ЗЕМЛЯ	34
2.1. Клімат на планеті Земля	35
2.2. Геометричні та фізичні характеристики Землі	40
2.3. Тепловий баланс Землі.....	43
Дослід 1. Дослідження залежності нагрівання поверхні тенісної кульки від кута падіння променів	47
2.4. Альbedo Землі	51
Дослід 2. Дослідження впливу альbedo на температуру поверхонь	53
2.5. Парниковий ефект	56
Дослід 3. Дослідження парникового ефекту.....	62
2.6. Зворотні зв'язки у глобальній кліматичній системі	65
2.7. Парниковий ефект і людина	66

2.8. Обертання та його вплив на клімат і форму Землі	69
Дослід 4. Дослідження рівнопотенційних поверхонь у процесі обертання ємності з рідиною	73
2.9. Сила Коріоліса	78
Дослід 5. Дослідження сили Коріоліса	81
2.10. Вплив обертання на динаміку рідини. Критерії подібності для течій в обертовій установці	85
Дослід 6. Дослідження впливу обертання на динаміку рідини	87
2.11. Маятник Фуко	91
Дослід 7. Дослідження коливань маятника Фуко	95
2.12. Питання та завдання до розділу 2	97
Розділ 3. ОКЕАН І КРІОСФЕРА	102
3.1. Глобальна кліматична система. Відмінність фізичних властивостей океану та атмосфери	103
Демонстрація 1. Порівняння теплоємності води та повітря	105
3.2. Характеристики світового океану і кріосфери	107
3.3. Морська вода. Рівняння стану	110
Дослід 8. Дослідження подвійної дифузійної конвекції рідини	115
3.4. Зростання рівня океану. Теплове розширення	120

Дослід 9. Дослідження теплового розширення води	122
3.5. Кріосфера та її компоненти. Танення морських та континентальних льодовиків.....	126
Дослід 10. Вплив танення льоду на зміну рівня океану: наземний і морський лід	134
Дослід 11. Швидкість танення льоду у морській і прісній воді	137
3.6. Роль полярних регіонів у змінах клімату.....	141
Дослід 12. Швидкість танення льоду на суші та у воді.....	149
3.7. Вертикальна структура водних мас океану. Термоклин	150
Дослід 13. Експеримент Марсильї	153
3.8. Внутрішні хвилі і перемішування океану	155
Дослід 14. Дослідження процесу генерації внутрішніх хвиль	159
Демонстрація 2. Вплив неоднорідностей рельєфу дна на внутрішні хвилі	164
3.9. Океанічні течії. Термохалінна циркуляція...	167
Дослід 15. Термохалінна циркуляція	170
3.10. Поверхнева течія Гольфстрім.....	173
Дослід 16. Моделювання течії Гольфстрім	177
3.11. Транспорт Екмана. Велика тихоокеанська пляма	181
Дослід 17. Транспорт Екмана	186
3.12. Особливості течій при обертанні	190
Дослід 18. Стовпчики Тейлора	193
3.13. Питання та завдання до розділу 3.....	196

Розділ 4. АТМОСФЕРА	200
4.1. Горизонтальна структура атмосфери та її характеристики.....	201
4.2. Вертикальна структура атмосфери. Атмосферна конвекція	203
Дослід 19. Атмосферна конвекція	206
4.3. Фізичні властивості повітря. Утворення хмар при адіабатичному розширенні	209
Демонстрація 3. Утворення хмар при адіабатичному розширенні	210
4.4. Загальна атмосферна циркуляція та атмосферні комірки	212
Дослід 20. Атмосферні комірки	217
4.5. Вихори в атмосфері.....	222
Дослід 21. Дослідження структури вихору.....	225
4.6. Питання та завдання до розділу 4	232
Перелік фізичних величин	234
Перелік експериментів	236
Список джерел	238
Додаток 1. Технічні характеристики обертової установки НЦ «МАНУ»	242
Додаток 2. Роздатковий матеріал для слухачів курсу	246
Список ілюстрацій	266

ПЕРЕДМОВА

Дорогі друзі!

Виклики, що постають перед людством у ХХІ столітті, вимагають від нас не лише глибоких знань, а й спільної відповідальності за наше майбутнє. Зміна клімату — одна з найскладніших глобальних проблем сучасності, що впливає на всі сфери життя і потребує рішень, які спираються на науку, освіту та свідому участь кожного.

Цей навчально-методичний посібник «Кліматична освіта: фізика атмосфери і океану», створений у межах навчальної програми «Зміни клімату», є запрошенням до пізнання важливих фізичних процесів, що формують клімат нашої планети, а також до розвитку навичок дослідницької роботи, критичного і креативного мислення, вміння працювати в команді й відповідально ставитися до природи.

Мала академія наук України завжди підтримує талановитих і допитливих молодих людей. Ми прагнемо створювати для кожного школяра й вихованця закладів позашкільної освіти можливості відчувати себе частиною великої наукової спільноти, спроможної впливати на виклики сьогодення та будувати сталі рішення для прийдешніх поколінь.

Щиро вірю, що цей посібник стане у пригоді і педагогам, і учням, і всім небайдужим до теми змін клімату. Бажаю всім натхнення у дослідженнях, успіхів у навчанні та віри у власні сили. Нехай ваша наукова цікавість і готовність діяти відповідально стануть запорукою нашого спільного сталого розвитку.

З повагою
Станіслав Довгий,
академік НАН України,
президент Малої академії наук України —
Центру ЮНЕСКО з наукової освіти

ВСТУП

На часі є нагальна потреба у колективних діях для пом'якшення наслідків зміни клімату та адаптації людства до таких змін. Згідно з останнім звітом Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (IPCC 2023) [12], це десятиліття є критичним для швидкого скорочення викидів парникових газів та вживання заходів щодо захисту людей від небезпечних кліматичних впливів, яких уже неможливо уникнути. Наслідки зміни клімату не є лінійними, і потепління призводитиме до швидкого збільшення небезпек, посилюючи більш інтенсивні хвилі тепла та повені, потепління океану та затоплення прибережних районів. Такі події позначатимуться на більш вразливих верствах населення. Одним із важливих інструментів для формування рішень щодо реагування на подальші зміни клімату є кліматична освіта. На сьогодні у світі існує багато міжнародних ініціатив, таких як, наприклад, Офіс кліматичної освіти (OCE), ініціатива UNESCO щодо змін клімату та інші, що прагнуть зробити освіту впливовим інструментом міжнародної реакції на зміни клімату.

Для того, щоб вести публічне обговорення і приймати важливі рішення щодо змін клімату, необхідно спочатку пояснити фізичні основи цих змін. Тому мета цього посібника — дати учням розуміння важливих фізичних процесів, які відбуваються в земній атмосфері та Світовому океані, причин їх виникнення та їхньої ролі у кліматичній системі, а також розвинути навички евристичного мислення і опанування наукового методу.

Основні завдання цього посібника полягають у формуванні таких компетентностей:

- *пізнавальної*: формувати науковий світогляд, активізувати пізнавальний інтерес до більш глибокого вивчення теорії формування земного клімату, поглиблювати знання щодо фізичних аспектів існування природних явищ;
- *практичної*: формувати здатність експериментально досліджувати, занотовувати результати та оцінювати їх точність, розвивати навички використання методів досліджень; залучати вихованців до наукової діяльності для розв'язання проблем зміни клімату;
- *творчої*: використовувати творчий підхід у дослідницькій діяльності; застосовувати креативне мислення для реагування на виклики, що пов'язані зі станом довкілля;
- *соціальної*: формувати навички комунікації під час виконання практичних завдань, лабораторних робіт; розвивати екологічне мислення: прогнозування результатів діяльності людини, пов'язаних зі зміною клімату, формувати відповідальне та ощадне ставлення до використання природних ресурсів.

У посібнику будуть охоплені такі питання:

1. Наукової освіти (наукове розуміння фізичних явищ і процесів, що лежать в основі формування погоди та клімату).
2. Екологічної обізнаності (розуміння наслідків людської діяльності).
3. Використання набутих навичок (критичне мислення, творче мислення, прийняття рішень і навички комплексного розв'язання проблем, самоусвідомлення та емпатія, стійкість і здатність справлятися зі стресом тощо).

Досліди та демонстрації, запропоновані у посібнику, можуть бути використані як у школі, так і для занять у позашкільній освіті. Посібник відповідає навчальній програмі з позашкільної освіти дослідницько-експериментального напрямку «Зміни клімату» (автори Терлецька К., Чернецький І., Довгий С.) [5].

Видання можна використовувати для організації освітнього процесу в закладах позашкільної освіти і гурткової роботи в закладах загальної середньої освіти.

Теоретичні заняття рекомендовано проводити у формі лекцій, дослідів, демонстрацій, обговорення і дискусій, із застосуванням елементів проблемного навчання та презентаційних матеріалів. Практичні заняття здебільшого проводяться у формі лабораторних робіт з використанням обладнання, яке подано у переліку до кожного досліді. Виконання дослідів за відсутності відповідних умов можливе із застосуванням програмного забезпечення (з вільним доступом) за відеозаписами та даними, розміщеними на сайті <https://stemua.science>. До кожного досліді є покрокова інструкція на цьому ресурсі.

Отже, цей посібник допоможе вихованцям зрозуміти фізичні процеси формування клімату та їх вплив на довкілля, а також усвідомити наслідки людської діяльності для екосистем і важливість сталого розвитку. Вихованці набудуть навичок наукових досліджень, зокрема збирання, аналізу даних та презентації результатів. Посібник спрямований на розвиток здатності адаптуватися до змін і справлятися зі стресом під час екологічних викликів. Лекції, дискусії, лабораторні роботи та демонстрації з елементами проблемного навчання активізують пізнавальний інтерес учнів.

Розділ 1. КЛІМАТ І ЙОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

У ЦЬОМУ РОЗДІЛІ МИ:

1. З'ясуємо, що таке глобальні кліматичні зміни.
2. Розглянемо причини та масштаби цих змін.
3. Оцінимо наслідки кліматичних змін.
4. Вивчимо основні кліматотвірні чинники.
5. Розглянемо рішення для розв'язання кліматичних проблем.
6. Розрізнімо поняття клімату та погоди.
7. Дізнаємося про історію науки про клімат.
8. Ознайомимось із сучасними методами моделювання погоди та клімату.
9. Створимо власну фізичну модель земної атмосфери та океану.
10. Ознайомимось з теорією подібності.
11. Навчимося використовувати лабораторну обертову установку.

1.1. Глобальні кліматичні зміни

Що таке зміни клімату?

Кліматичні зміни — це довгострокові зміни температури та погодних умов. Ці зміни можуть бути спричинені природними чинниками, як-от вплив активності Сонця або вплив від вулканічних вивержень. Однак із початку XIX століття основним рушієм зміни клімату стала людська діяльність, яка здебільшого пов'язана з викопним паливом (вугілля, нафта, газ). У результаті його спалювання утворюються парникові гази, які, ніби ковдра, огортають Землю, затримуючи тепло і призводячи до підвищення температури. Основними парниковими газами, що впливають на клімат, є вуглекислий газ та метан. Вони утворюються, наприклад, під час згоряння бензину в автомобілях або вугілля для опалення будівель. Збезлісення також може сприяти викиду вуглекислого газу. Сільське господарство, нафтова та газова промисловість є головними джерелами викидів метану. Сектори енергетики, промисловості, транспорту, будівництва, сільського господарства та землекористування — основні виробники викидів газів, що впливають на клімат.

Які зміни клімату вже відбулись?

На основі аналізу наукових публікацій Міжурядова група експертів зі зміни клімату (IPCC) зробила висновок: потепління кліматичної системи Землі є незаперечним фактом. Протягом останнього століття спостерігається стійке підвищення середньої глобальної температури поверхні планети (рис. 1.1). Особливо швидке потепління розпочалося після промислової революції, що спричинила суттєве збільшення викидів парникових газів. Підвищення середньої глобальної температури відносно доіндустріального рівня на сьо-

годні становить близько $1,1^{\circ}\text{C}$, і, на думку вчених, головним чинником цього є людська діяльність.

Влітку 2024 року ми стали свідками екстремально високих температур як в Україні, так і в усьому світі. Від червня 2023 року і до літа 2024 року кожен місяць був рекордно спекотним, перевищуючи доіндустріальні температури більш ніж на $1,5^{\circ}\text{C}$ [30]. Це підвищення є безпрецедентним і має серйозні наслідки для довкілля. Згідно з останніми дослідженнями [28], танення льодовиків відбувається значно швидше, ніж передбачалося раніше. Такі зміни несуть загрозу для екосистем, призводять до підвищення рівня моря та збільшення частоти екстремальних погодних явищ, що ставить під загрозу життя мільйонів людей по всьому світу.

Треба зазначити, що глобальне потепління не означає, що температура постійно зростає всюди з однаковою швидкістю. Наприклад, температура може зрости на 5°C в одному регіоні та знизитися на 2°C в іншому. Надзвичайно холодні зими в одному місці можуть бути збалансовані теплими зимами в іншій частині світу. Як правило, потепління є сильнішим над суходолом, ніж над океанами, оскільки вода повільніше поглинає та віддає тепло (теплова інерція). Потепління також може суттєво відрізнятись в межах суходолу та океанічних басейнів.

Існує також велика кількість різноманітних зворотних реакцій на зміну клімату, які можуть як збільшувати, так і зменшувати глобальне потепління. Деякі компоненти кліматичної системи, такі як океани та льодовикові шапки, повільно реагують на кліматичні зміни, тоді як інші компоненти реагують значно швидше. У цьому посібнику ми будемо розглядати та досліджувати внутрішні кліматоутворювальні чинники, тобто такі процеси, які виникають всередині самої кліматичної системи, наприклад термохалінну циркуляцію, що виникає внаслідок різниць у густині океанічної води, вітрову циркуляцію тощо.



Рис. 1.1. Глобальна поверхнева температура (показана як річне відхилення від базового тренду 1850–1900 рр.) (IPCC 2023)

Якими будуть наслідки кліматичних змін?

Основний зміст доповіді IPCC 2023 року [12] полягає в тому, що в найближчі два десятиліття людство матиме справу з безпрецедентними та численними небезпечними кліматичними явищами, спричиненими глобальним підвищенням температури на 1,5 °C. Навіть короточасне досягнення цього рівня температури матиме серйозні наслідки, і деякі з них будуть незворотними. Ризики для суспільства зростуть, зокрема постраждають інфраструктура та прибережні зони. Хвилі спеки, засухи та повені вже перевищили пороги стійкості рослин і тварин, що призводить до масової загибелі таких видів, як дерева та корали. Ці екстремальні погодні явища вже відбуваються і триватимуть у майбутньому, спричиняючи каскадні наслідки. Вони вже призвели до того, що мільйони людей відчувають гостру нестачу продовольства та води, особливо в Африці, Азії, Центральній і Південній Америці, на малих островах і в Арктиці.

Зміна клімату й надалі впливатиме на здоров'я людей, продовольчі ринки, житло, безпеку та роботу. Деякі країни вже гостро відчувають ці зміни, особливо мешканці малих острівних держав та прибережних зон, що зазнають підтоплення. Наслідки досягли такого масштабу, що цілі громади змушені переселятися, через затяжні посухи людям загрожує голод. У майбутньому очікується збільшення кількості «кліматичних біженців».

Підвищення температури атмосфери супроводжується змінами атмосферної циркуляції, опадів, випаровування та суттєвими змінами у Світовому океані. Температура води теж зростає, площа і товщина плавучих крижин в Арктиці зменшується, зменшується також площа шельфових льодовиків у Західній Антарктиці. Теплове розширення морської води, танення льодовиків у Гренландії та Антарктиді призводять до росту середнього рівня Світового океану, як показано на рис. 1.2, де наведено зміни середнього рівня у Світовому океані за даними вимірювань NASA.

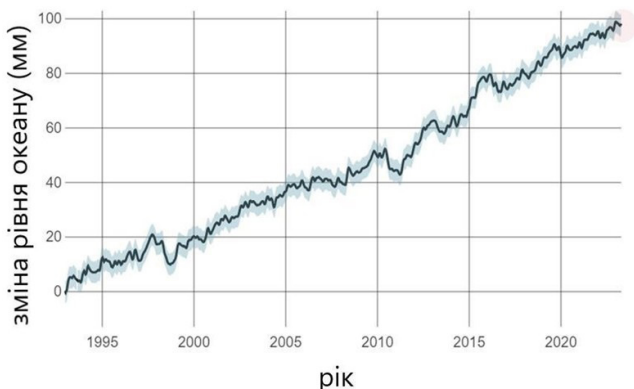


Рис. 1.2. Зміна рівня океану за даними супутникових спостережень (<https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>)

Як ми можемо діяти, щоб запобігти кліматичним змінам та адаптуватися до них?

Для досягнення результату потрібно створювати спільну програму дій. Основою для координування зусиль у досягненні прогресу в цій галузі є такі документи: Цілі сталого розвитку (ЦСР) [29], які ще називають Глобальними цілями, Рамкова конвенція ООН зі зміни клімату (англ. United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) [31] та Паризька кліматична угода (2015) [24]. Дії, спрямовані на боротьбу зі зміною клімату, можна розділити на три основні категорії: скорочення викидів, адаптація до наслідків та фінансування необхідних заходів. Перехід від викопних джерел енергії до відновлюваних, як-от сонячна та вітрова енергія, допоможе зменшити викиди парникових газів. Також потрібно суттєво знизити використання вугілля, нафти та газу.

Усвідомлення змін клімату — перший крок до розуміння людського впливу на ці процеси. Другий крок — визнання відповідальності за ці зміни. Освіта є важливим інструментом впливу на урядові рішення щодо клімату. Громадяни, які розуміють механізми кліматичних змін і роль людини в них, можуть суттєво вплинути на політичні рішення.

1.2. Погода і клімат

То що таке клімат і чим він відрізняється від такого поняття, як погода?

Погода — це стан атмосфери в конкретний момент часу. Вона визначається такими характеристиками, як температура повітря, вологість, атмосферний тиск, швидкість і напрямок вітру, кількість опадів, хмарність та інтенсивність сонячного випромінювання. Ці параметри можуть змінюва-

тися протягом доби або навіть годин, створюючи різноманітні погодні умови, які впливають на життя людей та природні процеси.

Клімат — це середній стан атмосфери на певній території, розрахований за десятки років. Він відображає характерні для конкретного регіону умови погоди та їх сезонні зміни. Слово «клімат» походить від давньогрецького «κλίμα», що означає «нахил» (сонячних променів до горизонтальної поверхні). Чим більший кут падіння сонячних променів, тим ефективніше Сонце нагріває поверхню.

Прогноз погоди — це науково обґрунтоване передбачення майбутнього стану атмосфери. Метеорологічні служби розробляють ці прогнози, застосовуючи методи метеорології. Прогноз погоди є одним із найяскравіших прикладів використання математики в повсякденному житті, що допомагає нам вирішити, чи варто взяти парасольку, одягти светр або планувати пікнік. На рис. 1.3 ілюструється відмінність між кліматом і погодою.

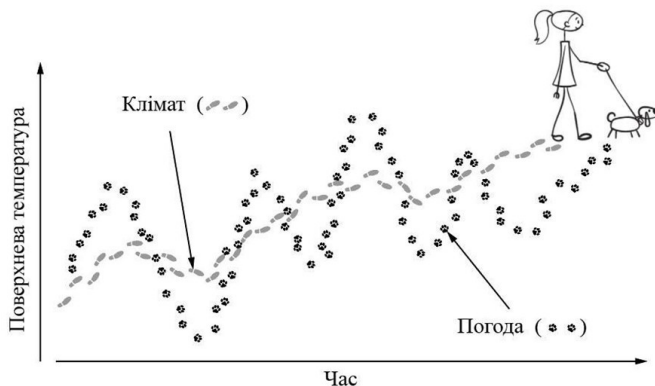


Рис. 1.3. Аналогія між кліматом і погодою така: клімат — це шлях людини, а погода — петляння пса, що йде поруч

Траєкторія собаки символізує постійно змінювану погоду. Хоча зміни погоди можуть бути різноманітними, вони не є випадковими, а підпорядковуються закономірностям, пов'язаним із регіоном і порою року. Ці закономірності виявляються, наприклад, у тому, що погода, типова для одного сезону, малоймовірна або навіть неможлива в іншому. З роками формується певний погодний режим, характерний для конкретної території, — її клімат. Траєкторію людини, що веде собаку, можна передбачити на певній відстані, тоді як траєкторія собаки є непередбачуваною. Тому вчені можуть із певністю прогнозувати майбутній клімат і потепління на 1,5–3 °C через 80 років, але не можуть це зробити на два тижні: справджуваність сучасного прогнозу на три дні наперед сягає 98,5 %, а от щодо середньострокових прогнозів — до 10 діб — становить 65–80 %.

Історія науки про клімат

Історія науки про клімат має глибоке коріння, що сягає античних часів. Уже в давнину вчені, історики, філософи та географи, такі як Геродот (484–425 рр. до н. е.), проводили спостереження за кліматом, намагаючись зрозуміти його закономірності. Греки того часу знали, що Земля має форму кулі, правильно уявляли її розміри та з великою точністю вимірювали відстань до Місяця.

Розвиток мореплавства у XVII–XVIII століттях дав поштовх і до активного розвитку таких наук, як географія, фізика та метеорологія. Було встановлено, що клімат на океанічних узбережжях тепліший, ніж у глибині континентів, а на західних узбережжях у помірних широтах тепліший, ніж на східних. Винайдення термометра (XVI ст.) та барометра (XVII ст.) заклало основи інструментальних спостережень за температурою та атмосферним тиском, що значно сприяло розвитку кліматології.

У 1831 році німецький дослідник Александер фон Гумбольдт у своїй книзі «Космос» вперше визначив клімат як

середній стан атмосфери, що стало важливим кроком у розумінні цього явища. Перший прогноз погоди на основі синоптичної карти був створений британцем Робертом Фіц-Роєм і опублікований 1 серпня 1860 року в газеті Times. Цей прогноз базувався на даних, зібраних через телеграф із різних куточків Британії та Європи. Фіц-Рой також розробив методику аналізу графічних сигналів про наближення штормів, що дало змогу створити погодні карти з відображенням циклонів і антициклонів.

У ХХ столітті розвиток кліматології отримав новий імпульс завдяки значним досягненням у науці. Норвезький математик Вільгельм Б'єркнес зробив важливий крок у прогнозуванні погоди, застосувавши математичні рівняння Нав'є – Стокса для опису фізичних процесів, які керують рухом вітру та атмосферних фронтів. Це стало основою для розвитку сучасних методів моделювання клімату та прогнозування погоди.

Рівняння Нав'є – Стокса — це математичні рівняння, які описують, як рідини та гази рухаються і змінюються. Вони враховують такі чинники, як швидкість течії, тиск, в'язкість та інші властивості рідини або газу. Ці рівняння допомагають зрозуміти і передбачити, як середовища поведуться в різних умовах, від океанічних течій до атмосферних процесів. Варто зазначити, що слово «**середовище**» використовується у контексті **механіки суцільних середовищ** — галузі фізики, яка вивчає поведінку та властивості матеріальних середовищ, що розглядаються як суцільні (тобто без урахування мікроскопічної структури, такої як атоми чи молекули). Це середовище охоплює широкий спектр матеріалів, зокрема гази, рідини, плазму та деформівні тверді тіла.

Так Вільгельм Б'єркнес розробив першу **математичну модель** для прогнозування погоди, проте не зміг самостійно розв'язати рівняння та зробити прогноз. Математичні рівняння потребували значних спрощень, оскільки моделі

можуть лише частково відтворювати складний оригінал (у цьому випадку — погоду). Великим викликом було створити модель, яка б відображала основні характеристики оригіналу та водночас була доступною для розв'язання.

Британський математик Льюїс Фрай Річардсон спробував спростити модель Б'єркнеса, використавши дані про атмосферу для ручного розрахунку зміни тиску в двох місцях у Європі. Однак його результат був фізично некоректним: зміна тиску за шість годин становила майже 109 мм рт. ст. Це продемонструвало, що для реалізації такої складної моделі не вистачає як теоретичних знань із математичних методів розв'язання рівнянь, так і потужного комп'ютера. Комп'ютер ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer), створений у 1946 році, виявився ключовим для успішної реалізації першого точного прогнозу погоди, здійсненого у 1950 році математиком Джоном фон Нейманом та метеорологом Джулом Чарні.

Таким чином, у другій половині XX століття завдяки використанню комп'ютерних технологій та супутникових спостережень кліматологія еволюціонувала в науку, здатну не лише аналізувати минулі кліматичні зміни, а й прогнозувати майбутні кліматичні тенденції. Зокрема, було виявлено ключову роль парникових газів у регуляції глобальної температури, що лягло в основу сучасних досліджень змін клімату та розробки стратегій боротьби з глобальним потеплінням.

Актуальні завдання прогнозування погоди та моделювання клімату вирішуються за допомогою суперкомп'ютерів. Сучасні суперкомп'ютери мають величезні обчислювальні потужності, здатні виконувати квінтільйони операцій за секунду (10^{18} , тобто мільярд мільярдів), що дає змогу моделювати складні кліматичні процеси. Станом на 2024 рік список найпотужніших суперкомп'ютерів очолює встановлений у Ліверморській національній лабораторії (США) El Capitan із потужністю понад 10^{18} операцій за секунду. Втім, навіть такі машини не можуть забезпечити точний прогноз погоди

на тривалий час через високу чутливість моделі до початкових умов. Це означає, що навіть за наявності потужних обчислювальних ресурсів довгостроковий прогноз погоди залишається складним через її мінливість (згадаймо про непередбачуваний рух собаки на рис. 1.3).

Однак для прогнозування клімату, який змінюється повільніше і є більш передбачуваним (повільна траєкторія людини на рис. 1.3), використовуються інші підходи. Лауреат Нобелівської премії 2021 року Клаус Гассельманн показав, що погодні флуктуації можуть впливати на клімат так само, як хаотичні рухи молекул впливають на випадкові переміщення частинок у броунівському русі. Ця аналогія допомогла глибше зрозуміти взаємодію різних фізичних масштабів у кліматичній системі.

Гассельманн також розробив методи, які дають змогу виділяти впливи природних і антропогенних чинників на зміни клімату. Його дослідження стали ключовими для встановлення зв'язку між викидами вуглекислого газу та підвищенням температури на планеті. З часом антропогенні «відбитки пальців» (так їх назвав Гассельманн) у зміні клімату стали настільки виразними, що серед кліматологів сформувався консенсус щодо значного впливу людської діяльності на глобальне потепління [15].

Отже, ми не зможемо точно спрогнозувати погоду на Новий рік через 100 років, але можемо з упевненістю стверджувати, що за певних умов зима через століття буде теплішою, ніж зараз. У межах сучасної наукової парадигми вже немає сумнівів щодо впливу людської діяльності на потепління. Проте інтенсивність цього потепління залежатиме від наших дій.

У цьому розділі ми згадали про математичні моделі, засновані на рівняннях Нав'є – Стокса, які описують рух рідини та повітря. Водночас, оскільки рух атмосферних фронтів і рідин зумовлений складними фізичними процесами, для їх дослідження можна створювати і фізичні моделі, про які детальніше йтиметься в наступному розділі.

1.3. Фізичні моделі кліматичних явищ. Основи теорії подібності

Що таке фізична модель?

Фізична модель — це матеріальний об'єкт, який використовується для вивчення іншого об'єкта або явища. Модель зберігає ключові риси оригіналу, але жодна модель не може відтворити його повністю та всебічно. Вимірювання параметрів фізичної моделі допомагає визначити параметри оригінального об'єкта.

Британський статистик Джордж Бокс зауважував: «Усі моделі мають неточності, але деякі з них корисні». Будь-який процес можна описати за допомогою різних моделей. І хоча фізична модель часто сприймається як щось схоже на оригінал, вона не завжди повинна бути подібною за розмірами або структурою. Наприклад, при моделюванні теплових чи інших процесів зовнішня схожість не є обов'язковою.

Але що тоді потрібно? Яких умов при створенні експериментальної моделі дотримуватися обов'язково, а яких можна і не дотримуватися?

Для цього нам знадобляться основні положення **теорії подібності**.

Подібними називаються явища, для яких відношення відповідних величин, що їх характеризують, є постійними. Розрізняють такі подібності:

- 1) геометрична подібність;
- 2) часова подібність;
- 3) подібність фізичних величин;
- 4) подібність початкових та граничних умов.

Геометрична подібність означає, що всі лінійні розміри об'єкта та його моделі пропорційні один одному. Це схоже на те, як дві фотографії одного й того самого об'єкта можуть бути різного розміру, але мають однакові пропорції.

Розглянемо течію в трубах різної довжини l' , l'' та різного діаметра h' , h'' (рис. 1.4). Але при цьому

$$\frac{l'}{l''} = \frac{h'}{h''} = k, \quad (1.1)$$

де k – константа геометричної подібності. Тоді ці процеси геометрично подібні.

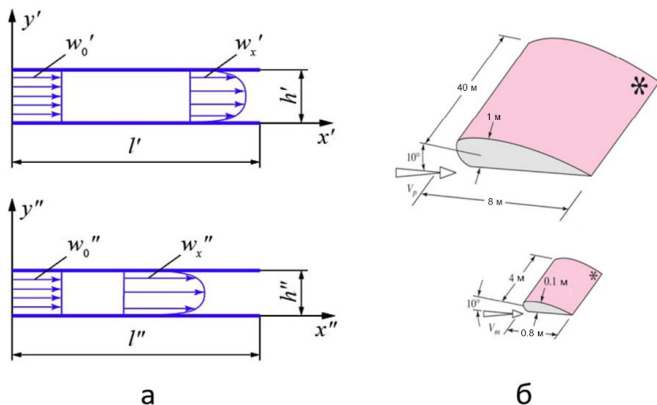


Рис. 1.4. Геометрично подібні процеси

А можна для подібних фігур записати ці співвідношення у такому вигляді:

$$\frac{l'}{h'} = \frac{l''}{h''} = idem \quad (1.2)$$

Тобто відношення довжини труби до її діаметра в оригіналу та моделі має бути постійним.

Таке відношення називається інваріантом подібності **idem**. На прикладі найпростішої геометричної подібності ми побачили, що подібність можна охарактеризувати або за до-

помогою константи подібності, або за допомогою інваріантів подібності. І константа, і інваріант — величини безрозмірні. У цьому їхня схожість. Але є й різниця. При переході від одного перерізу (рис. 1.4, а) до іншого інваріант змінюється, а константа подібності залишається постійною.

Часова подібність вимагає однакових відношень проміжків часу, за які в моделі та оригіналі відбуваються однакові стадії процесу. При дотриманні геометричної та часової подібності буде виконуватися і подібність швидкостей. Цей принцип використовується, наприклад, для випробувань моделей літаків, що в десятки разів менші за оригінал, в аеродинамічних трубах (рис. 1.4, б).

Подібність фізичних величин виконується, якщо для двох подібних точок оригіналу та моделі відношення фізичних властивостей є величинами постійними. Подібність початкових та граничних умов передбачає, що відношення основних параметрів на початку і в кінці моделі та оригіналу є величинами постійними.

Інваріанти можуть складатися із різних величин. Наприклад:

$$\text{Re} = \frac{w'_0 h'}{\nu'} = \frac{w''_0 h''}{\nu''} , \quad (1.3)$$

де ν' , ν'' — коефіцієнти кінематичної в'язкості рідин, w'_0 , w''_0 — характерні швидкості. Нагадаємо, що в'язкістю називається властивість рідких речовин чинити опір переміщенню однієї їхньої частини відносно іншої. Критерій (1.3) називається *критерієм Рейнольдса*. Критерій завжди є співвідношенням двох сил. Наприклад, критерій Рейнольдса — відношення інерційних сил $w'_0 h'$ до сил в'язкості ν' . Це число вказує на характер різних режимів течії — ламінарного або турбулентного. Коли сили в'язкості переважають (малі числа Рейнольдса), спостерігається ламінарна течія. Вона характеризується сталістю розподілу швидкості руху рідини. При

великих числах Рейнольдса (коли переважають сили інерції) спостерігається турбулентний режим. Це є причиною утворення хаотичних вихорів нестійкості потоку. Деякі інші критерії наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Безрозмірні критерії

Назва	Формула	Опис
Число Рейнольдса	$Re = \frac{Ul}{\nu}$	відношення інерційних сил до сил в'язкості
Число Россбі	$Ro = \frac{U}{fL}$	відношення інерційних сил до сил Коріоліса
Число Фруда	$Fr = \frac{U}{\sqrt{gl}}$	відношення інерції тіла до гравітаційних сил
Число Річардсона	$Ri = \frac{gh}{U^2}$	відношення потенціальної енергії до кінетичної енергії
Число Релея	$Ra = \frac{L^3 g \alpha \Delta T}{\nu \alpha}$	визначення поведінки рідини під впливом градієнта температури
U — швидкість потоку, L — характерний розмір, ν — коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини, g — прискорення вільного падіння, f — параметр Коріоліса		

Застосування теорії подібності передбачає такі етапи. Спочатку потрібно створити повний математичний опис процесу чи об'єкта, зазвичай у формі диференціального рівняння. Відтак перетворити це диференціальне рівняння, виділивши критерії подібності. Потім проводяться експерименти на моделях, під час яких вимірюються величини, що

належать до критеріїв подібності. На основі експериментів отримуємо масив даних. Проведемо математичну обробку отриманих даних для виявлення залежностей між критеріями. Це дає змогу отримати рівняння та співвідношення, які можна використовувати для розрахунків і прогнозування процесів, що моделюються.

За допомогою простих лабораторних моделей і основ теорії подібності можна виявляти залежності між фізичними величинами, які будуть справджуватися і в масштабах планети.

Тепер постає питання: якою має бути фізична модель, щоб вона могла охопити важливі процеси, що впливають на формування клімату? Відповідь на це питання буде далі.

1.4. Лабораторна установка для моделювання руху атмосфери та океану

Щоб створити адекватну фізичну модель клімату Землі, потрібно зрозуміти природу глобальної циркуляції як в атмосфері, так і в океані, а також визначити особливості розподілу таких величин, як температура, солоність і густина. Модель має бути якомога простішою для зручності роботи з нею.

Сонце нагріває тропіки сильніше, ніж полюси, що призводить до перепаду температур, який намагається врівноважити сила тяжіння. Ця сила сприяє досягненню рівноваги, за якої тепліші й менш густі рідини завжди перебувають над холоднішими. Цей процес супроводжує ще і обертання Землі. Тому дослідження кліматичних процесів має відбуватися з урахуванням обертання.

Існує безліч способів моделювати обертання в шкільних умовах, від простих кухонних тортниць і гончарних кругів до складніших установок, які дають змогу створювати рівномірне обертання і вимірювати його швидкість. Таку оберто-

ву установку можна виготовити самостійно, як це пропонується у проєкті DIYnamics Project.



Для наших досліджень ми будемо використовувати вітчизняний аналог обертової установки, розробленої в межах проєкту Массачусетського технологічного інституту «Погода в лабораторному басейні» [32]. У цій установці вивчення загальної циркуляції атмосфери та океану здійснюється завдяки поєднанню двох ключових планетарних компонентів:

- 1) неоднорідного нагрівання атмосфери (тобто охолодження полярних широт відносно екватора);
- 2) обертання Землі.

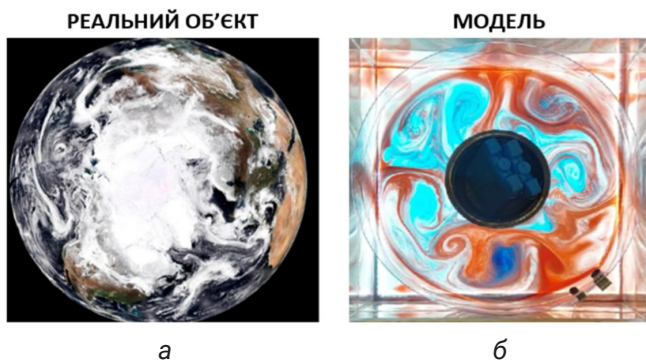


Рис. 1.5: а) фото північної півкулі Землі
(<https://mashable.com/article/earth-day-satellite-photo-most-detailed>);
б) моделювання полярної атмосферної комірки на обертовій установці

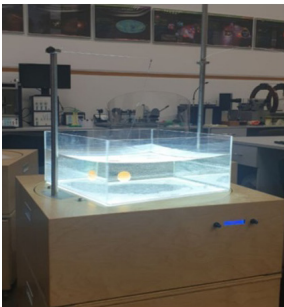
Лабораторна обертова установка — це проєкція сферичної Землі на плоску поверхню. Така фізична модель, з од-

ного боку, є досить простою, а з другого — дає можливість описати ключові планетарні компоненти. Ми також будемо розглядати явища, де обертання не є суттєвим, та висвітлювати основні ідеї енергетичного балансу. Ми дізнаємось, як проявляються неоднорідні властивості рідини у просторі при її обертанні і як ці властивості впливають на циркуляцію в атмосфері й океані та, врешті-решт, на глобальний клімат нашої планети.

Суть цієї методики полягає у поєднанні даних натурних спостережень з основними фундаментальними теоретичними концепціями, які потім демонструються за допомогою ретельно підібраних лабораторних експериментів. Основою для більшості запропонованих експериментів є обертова установка.

Характеристики обертової установки

Обертова установка зображена на рис. 1.6, а. Поворотна платформа може обертатися з частотою від 1 об/хв (обертів на хвилину, *Revolutions Per Minute, RPM*) до 30 об/хв. Ця частота зазначається на дисплеї (рис. 1.6, б).



а



б

Рис. 1.6: а) обертова установка для симуляції руху атмосфери та океану; б) дисплей на обертовій установці із зазначенням швидкості обертання

Досліди на установці проводяться в демонстраційно-му режимі перед аудиторією, і учні беруть активну участь у здійсненні експерименту. Для деяких дослідів потрібен резервуар із квадратною основою 41×41 см (зовнішні розміри) та $39,5 \times 39,5$ см (внутрішні розміри), розміщений на обертовій платформі. Основа платформи має підсвітку, що дає можливість робити зображення більш чіткими. Процеси, які відбуваються на обертовій платформі, знімаються на камеру (або на телефон), що розташовується зверху над платформою.

Можна виводити отримане зображення на великий екран або інтерактивну дошку.

Процес обертання описується характеристиками, які наведено в таблиці 1.2:

- 1) кутова швидкість обертального басейну Ω ;
- 2) період одного обороту басейну $\tau = 2\pi/\Omega$;
- 3) $\text{RPM} = 60/\tau$.

Таблиця 1.2. Характеристики процесу обертання резервуара

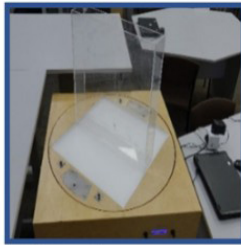
Ω (рад/с)	0	00,1	00,25	00,5	1	01,5	02
τ (с)	∞	62,8	25,1	12,6	6,3	04,2	03,14
RPM (об/хв)	0	01	02,4	04,7	9,5	14,3	19,1

На обертовій платформі можливі такі конфігурації: 1) нитяний маятник; 2) плоский резервуар; 3) резервуар із квадратною основою; 4) резервуар із квадратною основою і круглою вставкою; 5) резервуар із квадратною основою та перешкодою; 6) резервуар із квадратною основою та закріпленими на ній вентиляторами.

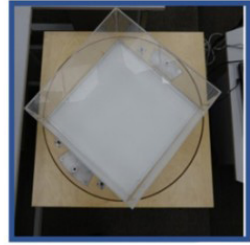
Можливі й інші конфігурації. Наприклад, щоб створити модель циркуляції у полярному регіоні, у центрі резервуара розміщують циліндричний контейнер із нержавіючої сталі та фіксують його за допомогою важкого предмета (рис. 1.5, б). Якщо в такий контейнер додати лід, у басейні створюється різниця температури в радіальному напрямку.



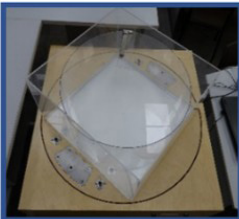
1. Нитяний маятник



2. Плоский резервуар



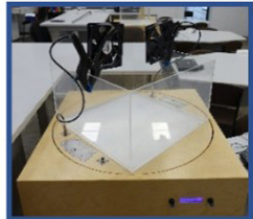
3. Резервуар із квадратною основою



4. Резервуар із квадратною основою і круглою вставкою



5. Резервуар із квадратною основою та перешкодою



6. Резервуар із квадратною основою та вентиляторами

Рис. 1.7. Обертова платформа із можливими конфігураціями

1.5. Питання та завдання до розділу 1

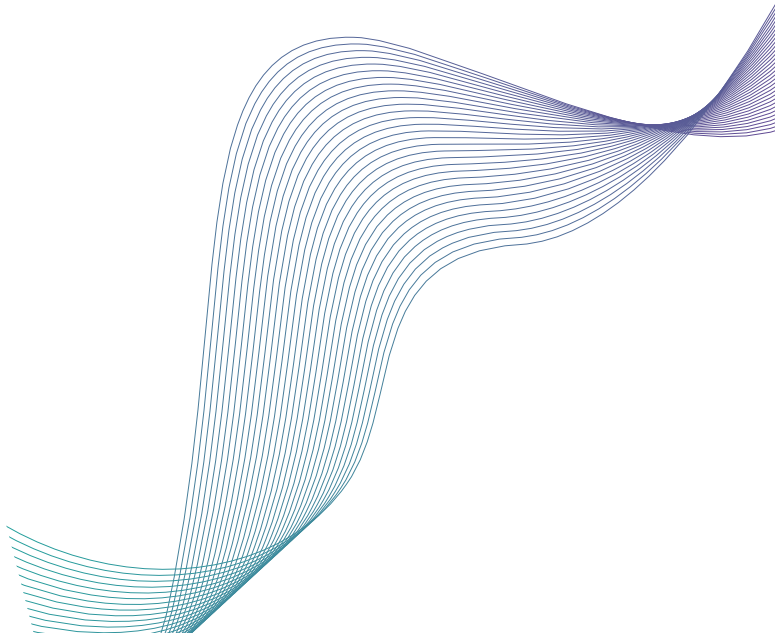
1. Що таке клімат і як він відрізняється від погоди?
2. Які дані та графіки ілюструють зміну глобальної температури з кінця XIX століття до сьогодні? Які методи використовуються для вимірювання та аналізу

цих змін і як ці дані порівнюються з природними кліматичними варіаціями в історії Землі?

3. Які антропогенні чинники сприяють глобальному потеплінню?
4. Які конкретні екологічні та соціально-економічні наслідки вже проявилися в результаті глобального потепління (такі як танення льодовиків, підвищення рівня моря, збільшення частоти екстремальних погодних явищ, зміни в екосистемах і вплив на сільське господарство)?
5. Як прогнозуються зміни в температурі, рівнях морів та інших кліматичних показниках на основі сучасних моделей клімату? Які потенційні впливи на довкілля і людські спільноти можуть виникнути у найближчі 20–50 років? Які сценарії розвитку найбільш імовірні?
6. Які міжнародні угоди, протоколи та стратегії є ключовими для глобального управління кліматичними змінами? Як ці документи формулюють цілі, завдання та зобов'язання для країн-учасниць?
7. Які рівняння використовуються для моделювання і прогнозування атмосферних і океанічних процесів? Як ці рівняння допомагають у розумінні та прогнозуванні кліматичних змін?
8. Які науковці були удостоєні Нобелівської премії за внески в розробку кліматичних моделей або дослідження змін клімату? Які їхні основні роботи та досягнення були визнані?
9. Що таке модель у науковому контексті і як вона допомагає в розумінні складних систем, таких як клімат? Які основні типи моделей існують і як кожна з них застосовується для дослідження кліматичних процесів?
10. Що таке подібні явища у фізичних науках і як вони впливають на наше розуміння природних процесів? Які приклади подібних явищ існують в атмо-

сферних і океанографічних науках і як ці явища допомагають нам зрозуміти складні системи, такі як атмосферна циркуляція або океанічні течії?

11. Які ключові планетарні компоненти можна вивчати за допомогою обертової установки і як ці дослідження сприяють розумінню кліматичних процесів?
12. Який діапазон кутової швидкості допускає обертова установка?
13. Обертова платформа має кутову швидкість обертання $0,7 \text{ рад/с}$. Визначте період одного обороту басейну і його частоту обертання в обертах на хвилину (RPM).
14. Яким буде число Россбі для торнадо з діаметром 400 м, що вирує в штаті Флорида?
15. Якою має бути кутова швидкість обертової установки, щоб моделювати атмосферні вихори з $L = 5000 \text{ км}$ та значеннями чисел Россбі порядку 0,05? Будемо вважати, що швидкості рідини в резервуарі — порядку $U = 0,5 \text{ см/с}$.



Розділ 2. ПЛАНЕТА ЗЕМЛЯ

У ЦЬОМУ РОЗДІЛІ МИ:

1. Дізнаємося про типи клімату та прогнози кліматичних змін.
2. Повторимо деякі геометричні та фізичні характеристики Землі.
3. Розрахуємо тепловий баланс Землі.
4. Встановимо залежність нагріву поверхні від кута падіння променів.
5. Переконаємось у впливі альbedo на температуру поверхонь.
6. Продемонструємо, що кількість сонячного тепла, яке отримує наша планета, виявляється недостатнім для пояснення температури її поверхні.
7. Зрозуміємо, що таке парниковий ефект і які гази є парниковими.
8. Дізнаємося, завдяки чому так стрімко зростає концентрація парникових газів в атмосфері.
9. Дізнаємося про зворотні зв'язки у глобальній кліматичній системі.
10. З'ясуємо, чому Земля має форму геоїда і що це таке.
11. Наочно побачимо вплив сили Коріоліса на рух тіла при обертанні.
12. Створимо модель маятника Фуко.
13. Наочно побачимо, що таке радіус Россбі.
14. Продемонструємо вплив обертання на динаміку рідини.

2.1. Клімат на планеті Земля

Клімат планети Земля визначається кількома основними чинниками: надходженням сонячної енергії, циркуляцією повітряних мас, характером поверхні та впливом океанів. Відповідно до однієї з найпоширеніших класифікацій, розробленої Володимиром Кеппеном, виокремлюється п'ять основних типів клімату: тропічний, сухий, помірний, континентальний і полярний. Ця класифікація базується на особливостях режиму температури та опадів, а також на природній рослинності, яка слугує індикатором клімату на певній території.

Полярний клімат спостерігається в арктичних і антарктичних регіонах, де температура може опускатися до -50°C . Цей тип клімату характеризується дуже низькою кількістю опадів, що зазвичай випадають у вигляді снігу. Полярні райони мають мінімальну рослинність і велику частину року покриті льодом, що суттєво обмежує життя і діяльність у цих регіонах.

Континентальний клімат властивий внутрішнім регіонам континентів, де температури можуть суттєво коливатися між сезонами. Зимой в таких зонах бувають дуже холодними, до -30°C , тоді як літо може бути спекотним, з температурами до 30°C і вище.

Помірний клімат характерний для більшої частини Європи та частини Північної Америки. Йому властиві чітко виражені сезони з помірними температурами, що коливаються від 0°C до 20°C . Опади в помірних зонах розподілені рівномірно протягом року, що сприяє розвитку різноманітних екосистем, включаючи ліси, луки та сільськогосподарські угіддя.

Сухий клімат, до якого належать пустелі та напівпустелі, вирізняється незначною кількістю опадів — менш ніж 250 мм на рік. У таких регіонах денні температури часто

перевищують 40 °С, а нічні можуть різко знижуватися, що зумовлено відсутністю хмарності та високою швидкістю випаровування.

Тропічний клімат розташований між екватором і 23,5° північної та південної широти. Цей тип клімату характеризується стабільно високими температурами протягом усього року, із середньорічною температурою, що коливається між 25 °С і 30 °С. Оподи в тропічних зонах можуть досягати 4000 мм на рік. Тропічні ліси, зокрема, мають густу рослинність і високу біорізноманітність завдяки великій кількості опадів і стабільно теплій температурі.

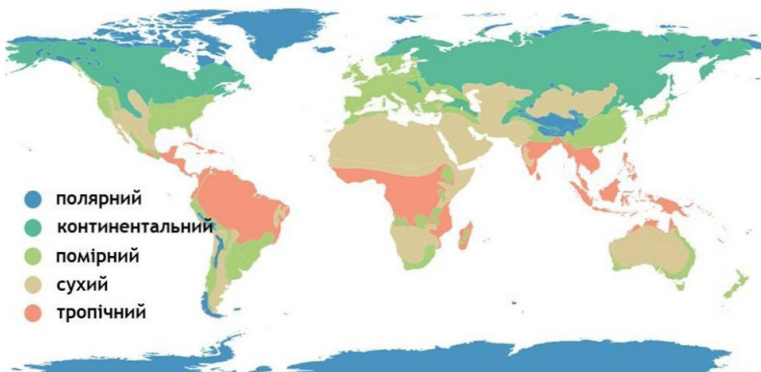


Рис. 2.1. Класифікація кліматів Кеппена [26]

Але що буде з температурою і опадами в майбутньому? В умовах глобального потепління картина суттєво зміниться. Щоб передбачити, яким буде клімат у майбутньому, підготовлено кілька сценаріїв ймовірної зміни клімату. Зокрема, так звані спільні соціально-економічні сценарії (SSP Shared Socioeconomic Pathways) поєднують прогнози щодо трансформації клімату і глобальних соціально-економічних змін до 2100 року. Їх застосовують для формування сценаріїв викидів парникових газів з огляду на різні кліматичні

політики. Цю концепцію використано в шостому звіті IPCC щодо зміни клімату у 2021 році [11].

Йдеться про п'ять можливих сценаріїв:

SSP1: Сталий розвиток – бажаний сценарій.

SSP2: Серединний сценарій.

SSP3: Регіональна конкуренція.

SSP4: Нерівність.

SSP5: Розвиток на викопному паливі.

Опис цих сценаріїв дано в таблиці 2.1. Слід зазначити, що в таблиці наведено числові індекси, які вказують на рівень радіаційного впливу (radiative forcing) у 2100 році. Радіаційний вплив вимірюється у ватах на квадратний метр (W/m^2) і показує, наскільки енергетичний баланс Землі зміниться через парникові гази. Цей термін буде уточнено далі у розділі 2.3. Наприклад: **SSP1-1.9** – сценарій сталого розвитку із дуже низьким рівнем радіаційного впливу ($1,9 \text{ W/m}^2$), що відповідає значному скороченню викидів CO_2 . **SSP2-4.5** – середній сценарій, де викиди CO_2 поступово зменшуються і радіаційний вплив досягає $4,5 \text{ W/m}^2$ до 2100 року.

Таблиця 2.1. Спільні соціально-економічні сценарії

SSP	Сценарій	Розрахункове потепління, °C		Цілком імовірний діапазон, °C
		(2041–2060)	(2081–2100)	(2081–2100)
SSP1-1.9	повне скорочення викидів CO_2 до 2050 р.	1,6	1,4	1,0–1,8
SSP1-2.6	повільне скорочення викидів CO_2 до 2075 р.	1,7	1,8	1,3–2,4

Продовження таблиці 2.1.

SSP	Сценарій	Розрахункове потепління, °C		Цілком імовірний діапазон, °C
		(2041–2060)	(2081–2100)	(2081–2100)
SSP2-4.5	викиди CO ₂ лишаються на теперішньому рівні до 2050 р., а потім зменшуються, але не скорочуються повністю до 2100	2,0	2,7	2,1–3,5
SSP3-7.0	викиди CO ₂ подвоюються до 2100 р.	2,1	3,6	2,8 – 4,6
SSP5-8.5	викиди CO ₂ збільшуються в три рази до 2075 р.	2,4	4,4	3,3 – 5,7

На рис. 2.2 зображено майбутні зміни річної максимальної добової температури та річної максимальної добової кількості опадів при рівнях глобального потепління 1,5 °C, 2 °C, 3 °C і 4 °C відносно 1850–1900 років. Згідно з прогнозами очікується, що кількість опадів у найбільш вологий день на рік збільшиться майже в усіх континентальних регіонах, навіть у регіонах, де прогнозовано середньорічне зниження вологості ґрунту. Також очікується, що найспекотніша річна денна температура зросте найбільше у середніх широтах і напівзасушливих регіонах і в регіоні мусонів Південної Америки. Прогнозується, що північна півкуля, як і було раніше, нагріватиметься сильніше, ніж південна.

Ми бачимо, що вплив зміни клімату на різні регіони світу буде різним. Це проявлятиметься у підвищенні рівня моря, міграції тварин, скороченні снігового покриву, підвищенні температури тощо. Підвищення температури збільшує ризик

незворотної втрати морських та прибережних екосистем, включаючи морські луки та чагарники водоростей. Коралові рифи особливо вразливі до зміни клімату. За прогнозами, вони втратять від 70 % до 90 % своєї сучасної площі при потеплінні на 1,5 °C і понад 99 % – при потеплінні на 2 °C [12].

Для прогнозування ймовірних змін розроблено глобальний кліматичний симулятор *En-ROADS*, який дає можливість визначити, як зміни в енергетиці, землекористуванні, сільському господарстві вплинуть на температуру на планеті. Користувачі можуть регулювати параметри щодо різних рішень та одразу бачити відповідні наслідки – як зміняться обсяг викидів та глобальна температура.



En-ROADS is a powerful climate solutions simulation tool that runs in your browser.



En-ROADS дає змогу миттєво оцінити вплив конкретних політичних заходів. Наприклад, як швидке зменшення використання вугілля вплине на глобальну температуру до 2100 року? Який ефект матиме заліснення чи підвищення енергоефективності?

Цей інструмент є ідеальним для спростування хибного переконання, що одне рішення може впоратися зі зміною клімату. Він дає чітке уявлення про масштаби глобальних зусиль, необхідних для значного зменшення викидів.

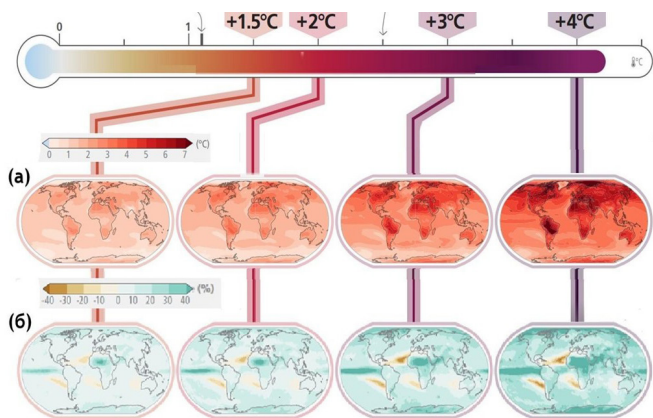


Рис. 2.2. Прогнозовані зміни річної максимальної добової температури та річної максимальної добової кількості опадів при рівнях глобального потепління 1,5 °C, 2 °C, 3 °C і 4 °C відносно 1850–1900 років [12]

2.2. Геометричні та фізичні характеристики Землі

Земля є майже ідеальною сферою із середнім радіусом $R_{\text{Earth}} = 6370$ км, прискоренням сили тяжіння $g = 9,81$ м/с⁻² і періодом обертання $\tau_E = 24$ години, що еквівалентно кутовій швидкості $\Omega_E = 2\pi/\tau_E = 7,27 \times 10^{-5}$ с⁻¹ (див. табл. 2.2). Атмосфера, яка огортає Землю, дуже тонка; вона швидко зменшується з висотою і не має певної границі. Близько 80 % маси атмосфери міститься на висоті нижче 10 км.

Суша займає близько 30 % поверхні Землі, і зараз приблизно 70 % суші розташовано в північній півкулі. На відміну від океану, атмосфера не обмежується материками. Коли повітря обтікає земну кулю, воно може відхилитися рельєфом, але ніколи не блокується повністю, як це відбувається з течіями в океані.

Середня загальна густина повітря поблизу поверхні Землі становить $1,235 \text{ кг/м}^3$. Сумарна маса повітря в атмосфері $Ma = 5,1\text{--}5,3 \times 10^{18} \text{ кг}$.

Таблиця 2.2. Геометричні та фізичні характеристики Землі

Параметри	Позначення	Значення величини
Швидкість обертання Землі	Ω_E	$7,27 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$
Прискорення вільного падіння	g	$9,80665 \text{ м/с}^2$
Середній радіус Землі	R_{Earth}	$6,37 \times 10^6 \text{ м}$
Площа поверхні Землі	$4\pi R_E^2$	$5,09 \times 10^{14} \text{ м}^2$
Площа Земного диска	πR_E^2	$1,27 \times 10^{14} \text{ м}^2$

Історична довідка

Земля, як і інші планети Сонячної системи, має форму, близьку до сфери, але не є ідеальною: вона трохи сплюсчена в напрямку полюсів. Через нерівності поверхні Землі, такі як морські западини й гірські хребти, її дійсна геометрична форма є ще більш складною і отримала назву геоїд. Перші спроби визначити форму та структуру Землі припадають на період VI–IV століть до нашої ери. Грецький філософ Аристотель (384–322 роки до нашої ери) першим науково обґрунтував ідею сферичної форми Землі. Він помітив, що тінь Землі на Місяці під час місячного затемнення має форму дуги кола, що можна пояснити тільки сферичністю Землі. Його послідовник, грецький вчений Ератосфен Кіренський (276–194 роки до нашої ери), вперше досить точно визначив радіус Землі. Він зробив це, не залишаючи стін Александрійської бібліотеки, де працював бібліотекарем. Ератосфен дізнався від торговців, що в день літнього сонцестояння (22 червня) в місті Сієна (нині Асуан), розта-

шованому поблизу екватора, сонце опівдні не кидає тіні. Ця інформація зацікавила його. Згідно з теорією Аристотеля Ератосфен припустив, що Земля має сферичну форму і тому сонячні промені падають на її поверхню під різними кутами в різних точках. Знаючи ці кути, він зміг розрахувати відстань між точками та визначити радіус Землі. Ератосфен змайстрував велику півкулю, увіткнув у неї вертикальну палицю (рис. 2.3, а) й опівдні 22 червня виміряв довжину тіні, яку відкидала палиця. Вона становила 1/50 довжини кола кулі ($360^\circ/50$), тобто кут φ приблизно $7^\circ 12'$ (рис. 2.3, б). В Асуані в той самий час тіні не було: сонячні промені там падають вертикально. Маючи відстань між Асуаном і Александрією (5000 єгипетських стадій; 1 стадія дорівнює 158,25 м), Ератосфен використав найпростіші тригонометричні співвідношення:

$$R_{\text{Землі}} = \frac{d}{\sin \varphi} = \frac{791000}{0.1253} \approx 6300 \text{ км.}$$

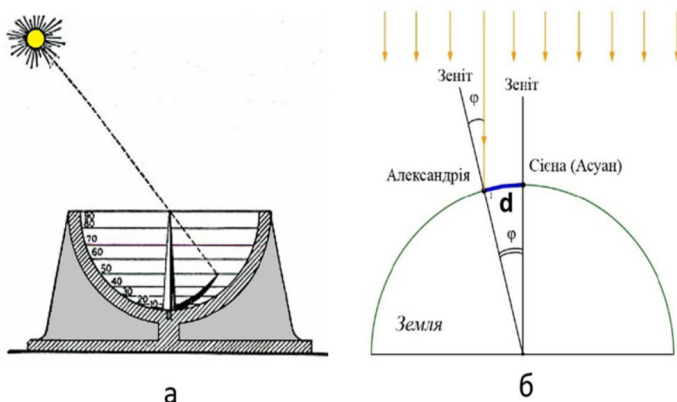


Рис. 2.3: а) скафіс – прилад для визначення висоти сонця над горизонтом; б) схема вимірювання радіуса Землі Ератосфеном

2.3. Тепловий баланс Землі

Основним джерелом надходження тепла є Сонце. Якщо говорити дуже загально, то та кількість енергії, яку Земля отримує від Сонця, мінус кількість, яку вона повертає у космос, визначає рівноважну температуру та, відповідно, клімат Землі. На поверхні океанів і морів відбуваються складні теплові процеси.

Спектр сонячного випромінювання можна розділити на 3 основні частини: ультрафіолетову ($\lambda < 0,40$ мкм), видиму ($0,40-0,76$ мкм), інфрачервону ($\lambda > 0,76$ мкм). Весь спектр сонячного випромінювання ще називають радіацією. За ультрафіолетовою частиною спектра сонячної радіації лежить рентгенівське випромінювання, а за інфрачервоною — радіовипромінювання Сонця. Короткохвильове електромагнітне випромінювання Сонця охоплює спектральний діапазон від 0,1 до 4 мкм. Тепло надходить від Сонця саме у вигляді короткохвильової сонячної радіації, яка складається з прямої радіації та радіації, розсіяної атмосферою. Розсіювання короткохвильового випромінювання в атмосфері відбувається на молекулах і комплексах молекул, на частках аерозолу та хмарних частках.

Радіаційний баланс земної поверхні — це сума радіаційних потоків на певній поверхні або в об'ємі, яка визначається як різниця між поглинутою радіацією і ефективним випромінюванням. Цей баланс не є рівномірним з огляду на вітри, океанічні течії та інші механізми, що впливають на клімат у різних регіонах планети.

На формування клімату впливають такі чинники:

- 1) зміни у сонячному випромінюванні (залежать від висоти сонця над горизонтом, що обумовлено часом доби, порою року);
- 2) неоднорідність величини, що описує здатність поверхні материків і океанів відбивати та розсіювати випромінювання (альbedo);

- 3) зміни у концентрації парникових газів;
- 4) прозорість атмосфери, хмарність.

Існує велика кількість різноманітних зворотних реакцій на зміну клімату, які можуть як збільшувати, так і зменшувати первісний вплив. Деякі частини кліматичної системи, такі як океани та льодовикові шапки, повільно реагують на кліматичні зміни, тоді як інші реагують значно швидше. Тепловий баланс, його просторова неоднорідність визначає області прогрівання або охолодження повітря над поверхнею, що впливає на режим атмосферної циркуляції.

Пряме і розсіяне тепло змінюються упродовж доби, це пов'язано з рухом сонця небесною сферою. Їхня інтенсивність зростає з ранку до полудня і потім знижується від полудня до вечора. Варіації у добових змінах можуть бути зумовлені прозорістю атмосфери та кількістю хмарності протягом дня.

Потік енергії — це кількість енергії, що переноситься за одиницю часу через одиничну поверхню. Потік енергії зазвичай вимірюється у ватах (Вт), де $1 \text{ Вт} = 1 \text{ джоуль/секунда}$ (1 Дж/с). Потік сонячної радіації перед входженням її в земну атмосферу при середній відстані Землі від Сонця називають **сонячною сталою**.

Суть терміна «стала» полягає в тому, що ця величина не змінюється через розсіювання та поглинання радіації в атмосфері. Вона відноситься до радіації, на яку атмосфера не має впливу. Таким чином, сонячна стала залежить від випромінювальної здатності Сонця і від відстані від Сонця до Землі і за даними позаатмосферних вимірювань ця величина S_0 має значення:

$$S_0 = 1,37 \text{ кВт/м}^2. \quad (2.1)$$

Тоді повна енергія, що отримується від Сонця площею перерізу земної кулі за одиницю часу, дорівнює

$$E_{tot} = \pi R_E \cdot 2S_0, \quad (2.2)$$

де $R_E = 6371 \text{ км}$ – радіус Землі. Тоді

$$E_{tot} = \pi R_E \cdot 2S_0 = 1,74 \cdot 10^{17} \text{ Вт}.$$

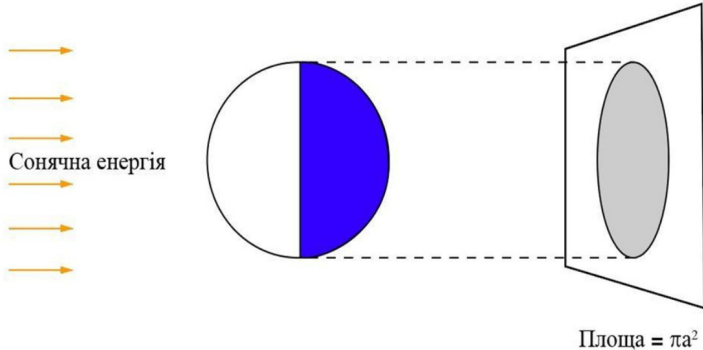


Рис. 2.4. Земля, обертаючись, отримує сонячну енергію через ту частину поверхні, яка при проекції на площину утворює диск, і водночас випромінює її від поверхні сфери

Оскільки загальна площа поверхні Землі $4\pi R_E^2$ (рис. 2.4), то середня кількість енергії, яку отримує Земля за одиницю часу, буде дорівнювати $0,25 \cdot S_0 = 344 \text{ Вт/м}^2$.

Це значення є середнім. Нахил земної осі $23,5^\circ$ спричиняє сезонні зміни при розподілі потоку. Ми розглянемо це детальніше у розділі 4.1. Як видно з рис. 2.5, на Землі радіаційний баланс коливається в широких межах: найбільші його значення – у тропічних океанах, найменші – в Антарктиді. На рисунку верхня суцільна лінія показує середній потік сонячної енергії, що сягає зовнішньої границі атмосфери. Нижня суцільна лінія демонструє середню кількість сонячної енергії, яка поглинається, а пунктиром позначено енергію, що відбивається у простір. Обидві нижні криві представ-

ляють усереднені результати супутникових вимірювань між червнем 1974 та лютим 1978 року [14].

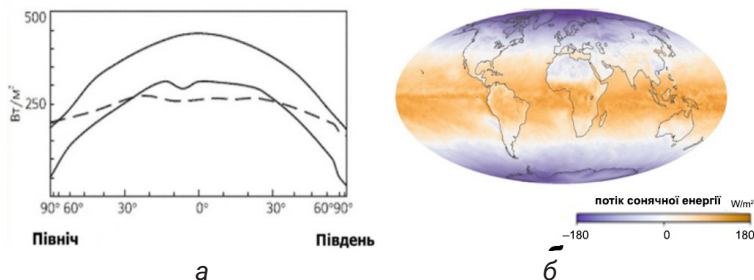


Рис. 2.5: а) радіаційний баланс Землі залежно від широти [14];
б) просторовий розподіл потоку сонячної енергії (березень 2024),
а саме баланс між вхідною та вихідною енергією у верхній частині
атмосфери за даними NASA (https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/CERES_NETFLUX_M)

Обчислення кута падіння сонячних променів

Коли Сонце перебуває в зеніті (тобто в точці, яка розташована прямо над спостерігачем) на різних географічних широтах φ , у будь-якому пункті можна визначити кут падіння сонячних променів. При цьому враховуються такі ситуації.

Коли Сонце перебуває в зеніті над екватором, кут падіння променів ω у будь-яких точках в обох півкулях на широті φ можна обчислити за допомогою формули:

$$\omega = 90^\circ - \varphi. \quad (2.3)$$

Коли точки, де Сонце перебуває в зеніті δ , та локації, в яких треба визначити кут падіння променів на широті φ , розташовані в одній і тій самій півкулі, то формула така:

$$\omega = 90^\circ - \varphi + \delta. \quad (2.4)$$

Коли точки розташовані в різних півкулях, то, відповідно:

$$\omega = 90^\circ - \varphi - \delta. \quad (2.5)$$

Як зазначено вище, прогрівання поверхні залежить від кута падіння променів. Для того, щоб це перевірити, проведемо дослід.



Дослід 1. Дослідження залежності нагрівання поверхні тенісної кульки від кута падіння променів

Мета досліду: дослідити залежність розподілу поверхневої температури тенісної кульки після нагрівання у світловому потоці від лампи розжарювання та порівняти отриману криву з кривою широтного розподілу середньої сонячної енергії, яка поглинається поверхнею Землі.

Обладнання: лампа розжарювання з рефлектором, тенісна кулька, тепловізор, ПК, SmartView (<https://s3-us-west-2.amazonaws.com/dam-assets.fluke.com/s3fs-public/flukeig/assets/SmartView+desktop+software/Setup.exe>).

SmartView



Рис. 2.6. Обладнання для проведення дослідів

Перед проведенням лабораторного дослідження запропонуйте учням ознайомитись із матеріалами з додатка 2 і сформулювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, щоб учні поділилися своїми прогнозами.

Експериментальна процедура

Підготовка обладнання. Помістіть тенісну кульку на рівну поверхню столу. Переконайтеся, що поверхня кульки покрита чорною фарбою, яка має високі світлопоглинальні властивості.

Налаштування лампи. Закріпіть лампу розжарювання з рефлектором так, щоб вона була спрямована на поверхню кульки. Регулюйте висоту і кут нахилу лампи, щоб забезпечити рівномірне нагрівання.

Нагрівання. Увімкніть лампу і дайте їй працювати протягом 10 хвилин, щоб забезпечити достатнє нагрівання тенісної кульки. Після цього вимкніть лампу.

Збір даних. Від'єднайте лампу від джерела живлення. Піднесіть тепловізор до поверхні кульки, яка була під лампою, і отримайте термограму, яка покаже розподіл температури.

Документування результатів. Зафіксуйте всі спостереження та результати у звіті. Включіть графічні зображення термограми та графіки для порівняння з даними про сонячну енергію. Визначте можливі джерела похибок і обговоріть їхній вплив на результати експерименту.

Альтернативний варіант. Якщо немає можливості провести експеримент, скористайтесь QR-кодом.

Аналіз отриманих даних

1. Завантажте термограму на ПК і запустіть програму SmartView.
2. Відкрийте у програмі термограму та, натиснувши на зображенні двічі, відкрийте його для аналізу.

3. У верхній частині вікна оберіть інструмент виділення «Лінія».



4. Проведіть кілька ліній на зображенні кульки так, щоб вони проходили через її центр (рис. 2.7).

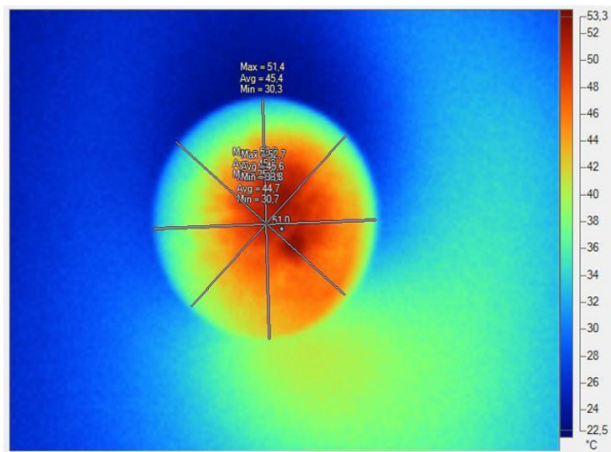


Рис. 2.7. Термограма кульки

5. У нижній частині вікна оберіть вкладку Graph, розгляньте отримані криві і скопіюйте дані, що відобразяться у правій нижній частині.

6. Перемістіть ці дані до таблиці Excel. За допомогою інструментів програми розрахуйте усереднене значення температури для кожного рядка і побудуйте графік розподілу температури по поверхні кульки.

Результати дослідіду

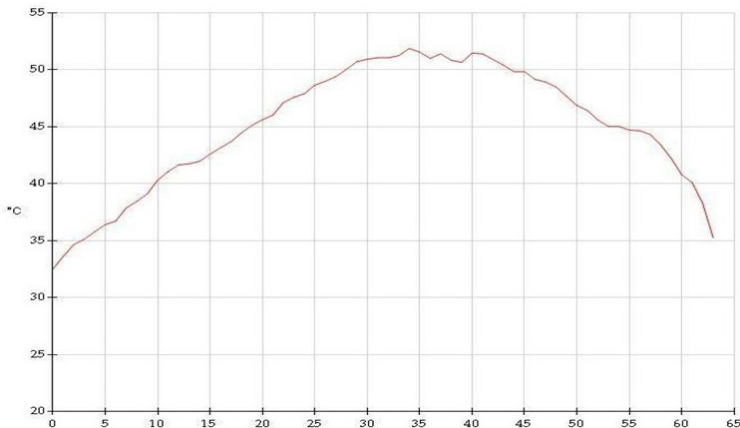


Рис. 2.8. Графік розподілу температури по поверхні кульки в одному з перетинів

Обговорення дослідіду

1. Обговоріть гіпотези, які були сформульовані учнями перед проведенням дослідіду. Потім варто порівняти отриману криву з кривою широтного розподілу середньої сонячної енергії, яка поглинається поверхнею Землі.

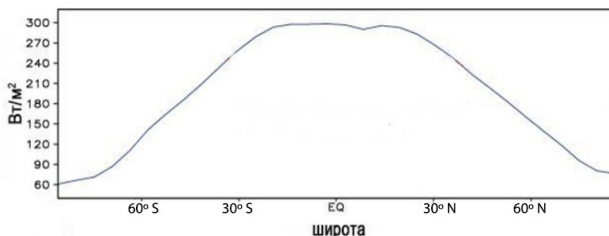


Рис. 2.9. Середня кількість сонячної енергії, яка поглинається поверхнею Землі (за даними NCEP-NCAR Kalnay et al. 1996)

2. Що буде, якщо повторити експеримент із кулькою, розмальованою у вигляді глобуса Землі?

3. Які особливості поверхневої температури тенісної кульки були помічені після її нагрівання? Як ці особливості пов'язані з принципами поглинання і випромінювання енергії?

4. Які фактори можуть впливати на точність отриманих даних термограми?

5. Як зміни в розподілі температури на тенісній кульці можуть бути пов'язані з широтним розподілом сонячної енергії на Землі?

2.4. Альbedo Землі

Для подальшого розрахунку енергії необхідно ввести фізичну величину — альbedo. Альbedo — це здатність поверхонь або окремих тіл відбивати сонячну радіацію. Альbedo A визначається за формулою:

$$A = \frac{\text{відбита сонячна радіація}}{\text{сумарна радіація}} \cdot 100 \% . \quad (2.6)$$

Розсіяна радіація — це частина сонячної радіації, яка розсіюється молекулами повітря, частинками пилу, краплями води та іншими елементами атмосфери. Внаслідок цього випромінювання надходить до земної поверхні з різних напрямків, а не безпосередньо від Сонця.

Продовжимо міркування щодо підрахунку енергії. Так, частина її відбивається або розсіюється, тому дійсний середній потік енергії, що поглинається, дорівнює

$$0,25(1 - A) S_0,$$

де A — альbedo Землі.

Кількість відбитої та розсіяної енергії становить приблизно $100 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$. Тоді сонячна енергія, що поглинається Землею,

$$E_{II} = (1 - A) \pi R_E^2 S_0 = 1,22 \cdot 10^{17} \text{ Вт}. \quad (2.7)$$

Альbedo є неоднорідним по поверхні нашої планети (рис. 2.10), а середнє значення для Землі $A = 0,3$. Над океаном альbedo має невеликі значення (2–10 %), над сушею значення є більшими (як правило, 35–45 %), а найбільші значення спостерігаються над поверхнею, вкритою снігом та кригою (80 %).

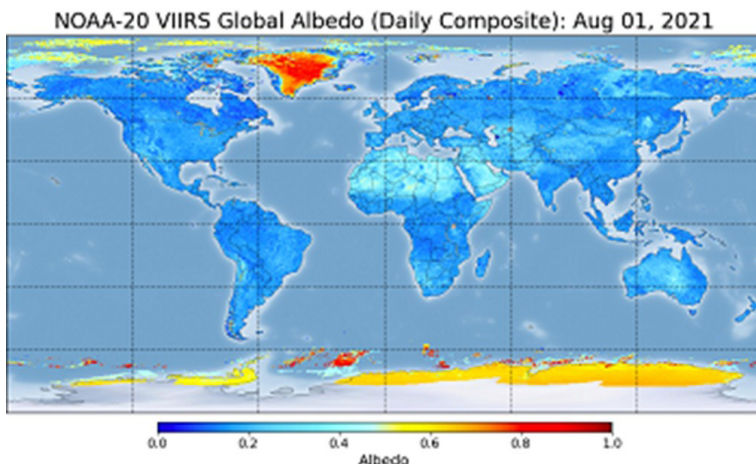


Рис. 2.10. Альbedo земної поверхні на 1 серпня 2021 року, за даними NOAA-20 VIIRS (<https://www.star.nesdis.noaa.gov/jpss/albedo.php>)

Поверхня залежно від кольору або типу поглинати́ме більше або менше сонячного випромінювання. Різні типи підстильної поверхні характеризуються різними альbedo. Наприклад, світлий сніг має альbedo у діапазоні 0,7–0,95; морський лід – 0,3–0,4; поля, луки, степи, ліси – 0,1–0,3; темні ґрунти – 0,05–0,15; сухі світлі ґрунти – 0,35–0,40. Характер підстильної поверхні змінюється протягом року, особливо в середніх широтах. Цей факт суттєво впливає на зміну клімату.

Альbedo Землі має значний вплив на температуру планети. Полюси мають виражений ефект альbedo завдяки білому кольору полярних крижаних шапок, які відбивають більшість сонячного випромінювання назад у космос. Однак, коли полярні крижані шапки тануть, кількість сонячних променів, що відбиваються, зменшується. Під час танення льоду пил, сажа та інші частинки, що осідають на поверхні льоду, можуть поглинати більше світла, що робить лід темнішим і менш здатним до відбиття. Це ще більше знижує альbedo. Під час танення льоду утворюються водяні пари і крапельки, що змінюють структуру поверхні і також можуть робити її темнішою. Таким чином, зміна кольору льоду із світлого на темний веде до поглинання більшої кількості тепла, що сприяє подальшому підвищенню температури Землі.

Перевіримо вплив альbedo на температуру поверхонь за допомогою досліду.



Дослід 2. Дослідження впливу альbedo на температуру поверхонь

Метою досліду є спостереження за зміною температури поверхонь різного кольору під час нагрівання в потоці випромінювання лампи розжарювання та порівняння експериментального результату з прогнозованим.

Обладнання: лампа розжарювання з рефлектором, однакові тіла з білою та чорною поверхнями (наприклад, металеві пластини), термометр, ПК.

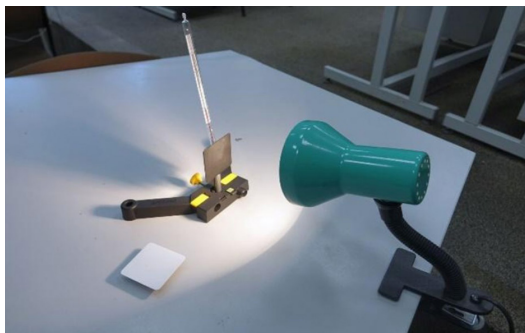


Рис. 2.11. Обладнання для проведення дослідів

Перед проведенням лабораторного дослідів запропонуйте учням ознайомитися з матеріалами з додатка 2 і сформулювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, щоб учні поділилися своїми прогнозами.

Експериментальна процедура

Підготовка. Закріпіть білу пластину на штативі та приєднайте до неї термометр. Переконайтеся, що термометр розташований таким чином, щоб точно вимірювати температуру поверхні пластини.

Нагрівання білої пластини. Спрямуйте рефлектор лампи розжарювання на білу пластину. Увімкніть лампу та почніть записувати покази термометра кожну хвилину протягом 10 хвилин. Виміри занотуйте в таблицю для подальшого аналізу.

Охолодження та підготовка до наступного вимірювання. Вимкніть лампу та дайте термометру охолонути до стабільної температури. Запишіть остаточні покази температури.

Нагрівання чорної пластини. Замініть білу пластину на чорну і повторіть попередні кроки: закріпіть чорну пластину на штативі, спрямовуйте рефлектор лампи на пластину,

увімкніть лампу, фіксуйте покази термометра щохвилини протягом 10 хвилин і занотуйте результати у таблицю.

Альтернативний варіант. Якщо немає можливості провести експеримент, скористайтеся QR-кодом.

Аналіз отриманих даних. Після завершення обох вимірювань порівняйте отримані температурні дані для білої та чорної пластин. Проаналізуйте різницю в температурі і визначте, як колір поверхні впливає на поглинання теплової енергії.

Таблиця результатів

Час t , хв	Температура білої пластини, °C	Температура чорної пластини, °C
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

1. Побудуйте таблицю в середовищі Excel.
2. Використовуючи інструменти математичних таблиць, побудуйте графік зміни температури пластин. Зробіть висновки.

Обговорення. Обговоріть гіпотези, які були сформульовані учнями перед дослідом. Сформулюйте та обговоріть додаткові запитання.

1. Які фізичні принципи пояснюють різницю у температурі для різних кольорів поверхонь?

2. Що може вплинути на точність вимірювань? Як можна зменшити вплив цих чинників?

3. Які інші фактори, окрім кольору, можуть впливати на ефективність поглинання тепла поверхнею? Як ці фактори можуть бути враховані в подальших дослідженнях?

Після дослідів варто провести обговорення на тему, яким чином можна впливати на альbedo планети. Проведіть у групах обговорення можливих шляхів впливу на альbedo Землі для сповільнення глобального потепління. Нехай кожна з груп представить своє рішення.

2.5. Парниковий ефект

Продовжимо міркування щодо енергетичного балансу. Оскільки джерелом енергії в системі океан – атмосфера є сонячне випромінювання, то важливо знати, як на цей баланс впливають атмосфера та океан. Розглянемо рівновагу, яка встановилась би без наявності атмосфери й океану. Поглинута енергія буде спричиняти прогрівання поверхні доти, поки її випромінювання в простір не стане рівним енергії, що поглинається. Це станеться, коли температура сягне величини T_e (температури випромінювання).

Щоб визначити кількість енергії, що випромінюється за одиницю часу, скористаємося **законом Стефана – Больцмана**:

$$I = \sigma T_e^4, \quad (2.8)$$

де I – потік випромінювання на одиницю площі поверхні,

$\sigma = 5,7 \times 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ – стала Стефана – Больцмана.

Енергія земного випромінювання

$$E_B = 4\pi R_E^2 \sigma T_e^4. \quad (2.9)$$

Прирівняємо $E_b = E_{\text{пр}}$, використовуючи формули (2.5) та (2.7):

$$4\pi R_E^2 \sigma T_e^4 = (1 - A) \pi R_E^2 S_0.$$

Звідси можемо отримати формулу для знаходження температури випромінювання:

$$T_e = \sqrt[4]{\frac{(1 - A) S_0}{4\sigma}}. \quad (2.10)$$

Завдання: порахувати T_e для поверхні Землі.

Якщо ми розрахуємо T_e за формулою (2.10), то для Землі вона буде дорівнювати $T = 255 \text{ K}$ ($-18 \text{ }^\circ\text{C}$), що на $33 \text{ }^\circ\text{C}$ менше, ніж $15 \text{ }^\circ\text{C}$ (середня глобальна температура Землі). Отже, наші спрощені розрахунки показали, що кількість сонячного тепла, яке отримує наша планета, є недостатньою для пояснення температури її поверхні.

Історична довідка. Подібні розрахунки у 1827 році зробив французький математик і фізик Жозеф Фур'є, який опублікував свою знамениту роботу «Записка про температуру земної кулі й інших планет», вперше запропонувавши теоретичну модель для визначення рівноважної температури планет. Фур'є використовував спрощену модель, щоб оцінити температуру, яку мала би планета, якби її нагрівання здійснювалося лише за рахунок сонячного випромінювання.

Фур'є врахував, що температура Землі визначається не тільки прямим сонячним випромінюванням, а і впливом атмосфери. Він зазначив, що існування атмосфери відіграє ключову роль у підвищенні температури поверхні планети. Основна ідея полягала в тому, що відмінність між теоретичними розрахунками та фактичними спостереженнями температури поверхні Землі може бути пояснена наявністю атмосфери, яка поглинає і зберігає частину сонячної радіації.

Фур'є також припустив, що рідка оболонка планети, зокрема океани, може впливати на її термічну рівновагу. Океани й атмосфера не тільки поглинають сонячну радіацію, а й переносять тепло з одних регіонів в інші, що може суттєво впливати на загальний енергетичний баланс планети.

У цьому розділі ми зосередимося на аналізі перших ефектів, пов'язаних із поглинанням сонячної радіації атмосферою. У наступних розділах ми будемо розглядати більш складні аспекти, зокрема динаміку атмосфери та океанів і їхній вплив на кліматичні процеси.

Парниковий ефект є ключовим явищем в атмосфері Землі та інших планет і полягає в тому, що енергія сонячних променів, відбиваючись від поверхні, не може повністю повернутися в космос. Молекули різних газів в атмосфері поглинають частину цієї енергії і затримують її, що веде до підвищення температури поверхні. Іншими словами, парниковий ефект утримує тепло на планеті, що є важливим фактором для підтримання життєздатного клімату.

Парниковими газами (*greenhouse gas*) називають гази в атмосфері Землі, що здатні поглинати теплове випромінювання планети і хмар і відбивати його назад, розігріваючи при цьому атмосферу.

До основних парникових газів належать:

- водяна пара (H_2O);
- вуглекислий газ (CO_2);
- закис азоту (N_2O);
- метан (CH_4);
- озон (O_3) та інші.

Ідеї Фур'є згодом розвинув британський фізик Джон Тіндаль, який досліджував, як різні гази поглинають інфрачервоне випромінювання. У своїй роботі 1859 року Тіндаль виявив, що водяна пара, метан і діоксид вуглецю значно затримують це випромінювання. Наступним кроком у вивченні парникового ефекту стала стаття 1896 року

шведського фізико-хіміка Сванте Арреніуса, який згодом, 1903 року, отримав Нобелівську премію за теорію електролітичної дисоціації. Арреніус у своїй роботі розрахував поглинання інфрачервоного випромінювання як діоксидом вуглецю, так і водяною парою окремо, а також у їх комбінації. Він врахував, що випаровування води сприяє утворенню хмар, які можуть як утеплювати атмосферу, так і відбивати сонячне світло. Результат залежить від площі, висоти й температури хмар. За умовами метеорології того часу Арреніус передбачив, що підвищення концентрації CO_2 удвічі може підвищити глобальну температуру атмосфери на $5,5^\circ\text{C}$. У свою чергу, нобелівський лауреат Сюкуро Манабе у дослідженні «Вплив подвоєння концентрації CO_2 на клімат за допомогою загальної моделі циркуляції» [19] дійшов висновку, що подвоєння рівня CO_2 призведе до підвищення температури на трохи більше ніж 2°C . Це значно уточнювало оцінки Сванте Арреніуса. Оскільки люди продовжують використовувати викопні енергоносії, то концентрація CO_2 в атмосфері постійно збільшується. Починаючи із середини XIX століття темп зростання концентрації двоокису вуглецю збільшувався і наприкінці 2000-х років відбувався зі швидкістю $2,20 \pm 0,01$ ppm/рік, або $1,7\%$ за рік. Згідно з окремими дослідженнями, сучасний рівень CO_2 в атмосфері є максимальним за останні 800 тис. років і, можливо, за останні 20 млн років. Концентрація CO_2 в атмосфері визначається такими процесами, як фотосинтез і дихання, обмін між океаном і атмосферою, а в сучасному світі ще й антропогенною діяльністю.

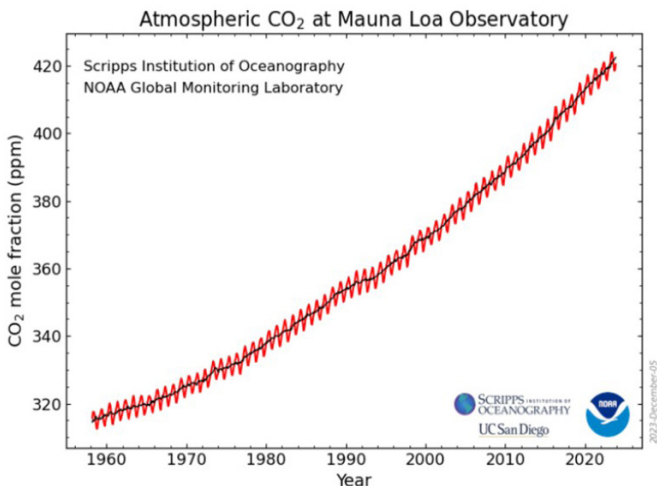


Рис. 2.12. Середній місячний рівень вуглекислого газу, виміряний в обсерваторії Мауна-Лоа, Гаваї (з <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html>)

Щоб зрозуміти механізм парникового ефекту, розглянемо експеримент з горизонтальним листом скла, розташованим над ґрунтом, як показано на рис. 2.13. Припустімо, що скло є прозорим для короткохвильового випромінювання, довжина хвиль якого менша за 4 мкм, але частково поглинає випромінювання з довгими довжинами хвиль.

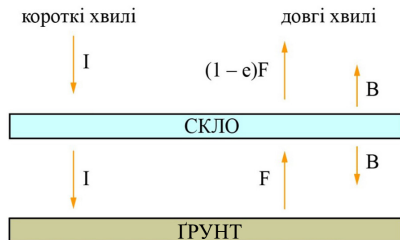


Рис. 2.13. Схема реалізації парникового ефекту [12]

У цьому експерименті скло пропускає короткохвильове сонячне випромінювання (потік I), яке досягає ґрунту і поглинається ним. Спрямований вгору від ґрунту потік, що врівноважує довгохвильову радіацію, дорівнює F , частина якого e поглинається склом та нагріває його, що спричиняє випромінювання тепла в обох напрямках B . Припустимо, що в початковий момент і скло, і ґрунт мають одну і ту саму температуру, а потім вмикається потік сонячного випромінювання I . Це випромінювання пройде через скло і буде поглинуте ґрунтом. Ґрунт нагріється до температури T_g та буде випромінювати вгору потік довгохвильової радіації F , що визначається за законом Стефана – Больцмана (2.8).

$$F = \sigma T_g^4. \quad (2.11)$$

Практично все випромінювання при характерній температурі атмосфери має довжини хвиль більше ніж 4 мкм, так що частина цього випромінювання буде поглинатися склом. Внаслідок цього скло також буде нагріватися та випромінювати радіацію. Припустимо, що потік в обох напрямках дорівнює B .

Рівновага буде досягатися, коли потік знизу буде дорівнювати потоку зверху, за умови:

$$I = (1 - e) F + B = F - B. \quad (2.12)$$

Тобто $I = (1 - e)F + B$ та $I = F - B$. Якщо ми додамо ці дві рівності, то отримаємо $2I = (2 - e)F$, із чого випливає співвідношення:

$$F = \sigma T_g^4 = I / (1 - e/2). \quad (2.13)$$

Тому температура випромінювання під склом T_g є вищою, аніж вона була б за відсутності скла. Саме на цьому принципі заснований парниковий ефект.

Розгляньмо спрощену модель парникового ефекту, коли земне випромінювання, що іде від Землі, F повністю поглинається шаром атмосфери, тобто коли коефіцієнт $e = 1$. Підставимо це в формулу (2.13) і скористаємося формулою (2.8). Маємо:

$$\sigma T_g^4 = 2 \sigma T_e^4. \quad (2.14)$$

Тобто $T_g = \sqrt[4]{2} T_e = 1,19 T_e$. $T_g = 303 \text{ K}$ (29°C), що є більше, ніж спостерігається.

Це означає, що ця модель є спрощеною і вона не враховує:

1) того, що не весь потік сонячної енергії у верхній частині атмосфери досягає поверхні Землі; як правило, 20 % – 25 % поглинається в атмосфері (в тому числі хмарами);

2) поглинання атмосферою не є повним, і коефіцієнт e є меншим за 1.

Перевіримо такий ефект за допомогою досліду.



Дослід 3. Дослідження парникового ефекту

Метою досліду є спостереження зміни температури чорної поверхні під час нагрівання в потоці випромінювання лампи розжарювання за наявності та відсутності покривного скла.

Обладнання: лампа розжарювання з рефлектором, плас-тина з чорною поверхнею, теплоізоляційна оболонка, шма-ток скла, термометр, ПК.

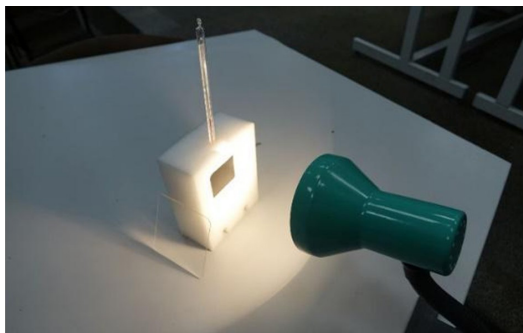


Рис. 2.14. Обладнання для проведення дослідів

Перед проведенням лабораторного дослідів запропонуйте учням ознайомитися з матеріалами з додатка 2 і сформулювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, щоб учні поділилися своїми прогнозами.

Експериментальна процедура

Підготовка до експерименту без скла. Розмістіть чорну пластину всередині теплоізоляційної оболонки. Прикріпіть термометр до пластини так, щоб він міг точно вимірювати її температуру. Запишіть початкову температуру пластини до таблиці. Це буде основа для порівняння з подальшими вимірюваннями.

Нагрівання пластини. Спрямуйте рефлектор лампи розжарювання на пластину, щоб забезпечити максимальне освітлення. Увімкніть лампу, щоб розпочати нагрівання. Щохвилини записуйте показання термометра в таблицю, щоб відстежувати зміни температури пластини під впливом лампи. Через 10 хвилин вимкніть лампу і припиніть запис температури.

Експеримент зі склом. Дайте пластині та термометру охолонути до кімнатної температури. Повторіть експеримент, помістивши шматок скла перед пластиною, щоб дослідити вплив покривного скла на зміни температури.

Порівняння температурних даних у двох умовах (із покритим склом і без нього) дасть змогу зрозуміти, як скло впливає на теплоізоляційні властивості системи, подібно до того, як це відбувається в природних умовах утворення парникового ефекту.

Альтернативний варіант. Якщо немає можливості провести експеримент, скористайтесь QR-кодом.

Аналіз отриманих даних

Для порівняння занотуйте температурні показання під час повторного експерименту і проаналізуйте, як наявність скла вплинула на результати. Сформуйте таблицю в Excel.

Таблиця результатів. Зростання температури в часі для відкритої поверхні та для поверхні за склом

Час t , хв	Температура відкритої поверхні, °C	Температура поверхні за склом, °C
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

За допомогою інструментів Excel побудуйте графіки зміни температури пластини та зробіть висновки.

Сформуйте кілька груп для роботи над завданням. Після завершення дослідів проведіть у межах груп обговорення,

яким чином можна зменшити парниковий ефект. За результатами обговорення кожна група представить свою пропозицію перед класом. Це дасть можливість зібрати різні ідеї та підходи до вирішення проблеми.

2.6. Зворотні зв'язки у глобальній кліматичній системі

Характеристики кліматичної системи постійно змінюються у різних часових масштабах — від хвилин до сотень років — через зміни кліматичних періодів. Динаміка клімату та погоди є результатом цих змін, на них впливають численні фактори, такі як вулканічні викиди, сонячна активність, викиди парникових газів та аерозольних частинок. Кожен новий вплив на атмосферу призводить до нових періодичних змін температури повітря. Зворотні зв'язки можуть як посилювати ці зміни, так і послаблювати їх. Позитивний зворотний зв'язок посилює ефект збурення, тоді як негативний зворотний зв'язок його ослаблює.

Позитивний зворотний зв'язок можна проілюструвати на прикладі гіпотези «Земля-сніжка» (Snowball Earth) [6], згідно з якою в далекому минулому Земля була повністю або майже повністю покрита льодом. Ця гіпотеза припускає існування періодів глобального льодового покриття, коли майже вся поверхня океанів замерзала. Як це могло статися? Якщо клімат почне охолоджуватися, сніг покриває більшу частину суші, а морський лід розширюється. Оскільки сніговий покрив має вище альбедо, ніж темна земля, а лід має вище альбедо, ніж вода, це початкове охолодження збільшує кількість відбитого від поверхні сонячного світла. Такий ефект створює позитивний зворотний зв'язок, що може призвести до глобального замерзання. Ще один приклад позитивного зворотного зв'язку — це парниковий

ефект і його взаємодія з водяною парою в атмосфері. Водяна пара відіграє ключову роль у визначенні прозорості атмосфери для довгохвильової радіації. Підвищення температури при достатньому рівні вологості сприяє збільшенню концентрації водяної пари в атмосфері. Це, своєю чергою, посилює поглинання довгохвильової радіації, що є основою парникового ефекту, і веде до подальшого підвищення температури нижніх шарів атмосфери. Таким чином, підвищення температури спричиняє збільшення кількості водяної пари, що посилює парниковий ефект і веде до ще більшого зростання температури.

2.7. Парниковий ефект і людина

Які чинники сприяють швидкому зростанню концентрації парникових газів в атмосфері? Ось кілька ключових факторів, зазначених у звіті Міжурядової панелі з питань зміни клімату (IPCC) [12].

Виробництво електроенергії та тепла. Виробництво електроенергії і тепла є однією з основних причин викидів парникових газів, включаючи природний газ, нафту та вугілля. Цей сектор відповідає приблизно за чверть усіх антропогенних викидів парникових газів у світі. Зокрема, близько 25 % викидів діоксиду вуглецю (CO_2) походять від спалювання викопного палива для генерування електроенергії та тепла. Спалювання цих видів палива призводить до викиду великої кількості CO_2 , який є основним парниковим газом і сприяє глобальному потеплінню. Споживання енергії у світі зростає постійно і подвоїлося за останні чотири десятиліття. Однак рівень споживання енергії значно варіюється залежно від країни, що впливає на загальний рівень викидів.

Сільське господарство. Сільське господарство та інші форми землекористування, включаючи збезлісення, ста-

новлять ще близько чверті світових викидів парникових газів. Основна частина цих викидів складається з метану, який утворюється під час розкладання гною та життєдіяльності великої рогатої худоби, а також закису азоту, що виділяється при використанні азотних добрив. Добрива, потрапивши в ґрунт, переробляються бактеріями, які виділяють N_2O . Основні викиди закису азоту здійснюють Індія, Китай та США, де широко використовуються азотні добрива, а також Південна Америка та Африка, де основне джерело N_2O — гній великої рогатої худоби.

Тваринництво також має значний вплив на клімат, оскільки жуйні тварини виділяють близько 20 г метану на кожен кілограм з'їденого корму.

Промисловість. Промисловий сектор утворює приблизно одну п'яту всіх глобальних антропогенних викидів і включає виробництво товарів і сировини, таких як цемент і сталь, а також харчову промисловість і будівництво.

Транспорт. Транспортний сектор спричиняє 14 % глобальних викидів парникових газів через спалювання нафтових продуктів, таких як бензин і дизель. Автомобільні вихлопи містять приблизно 10 % діоксиду вуглецю, також викидаються невеликі кількості метану та закису азоту. З огляду на те, що у світі вже налічується понад мільярд транспортних засобів, їхній внесок у глобальне потепління є значним.

Будівлі. Будівлі спричиняють приблизно 6 % світових викидів парникових газів. Ці викиди переважно складаються з вуглекислого газу та метану і виникають під час спалювання природного газу та олії для опалення і приготування їжі.

Інші джерела. Інші джерела включають викиди, пов'язані з енергетичним сектором, крім спалювання кам'яного вугілля, а також видобуток, переробку і транспортування нафти, природного газу та вугілля. Цей сектор забезпечує близько 10 % глобальних викидів парникових газів.

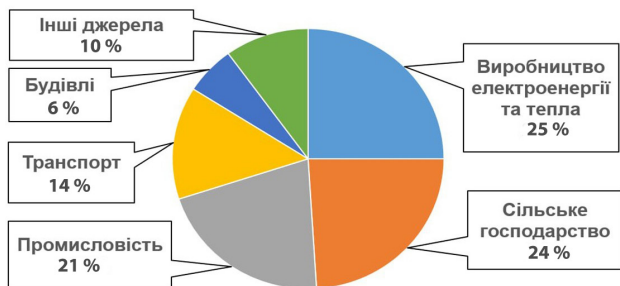


Рис. 2.15. Глобальні викиди парникових газів в економічному секторі (IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report)

Промислова революція, що розпочалася наприкінці XVIII століття, принесла безпрецедентні зміни в науку, економіку і політику. Ці перетворення мали значний вплив на всі сфери суспільства, від сільського господарства до медицини. Інновації в технологіях і виробничих процесах суттєво покращили стандарти життя, забезпечили масовий перехід від аграрного суспільства до індустріального. Один із найбільш значних наслідків цих змін — зростання населення планети, яке стало можливим завдяки підвищенню продуктивності сільського господарства та вдосконаленню медичних технологій. Це зростання населення збільшило навантаження на навколишнє середовище, посиливши вплив усіх попередніх факторів на кліматичні зміни.

Завдання. Розробіть стратегію зменшення викидів парникових газів із використанням симулятора En-ROADS, згаданого у розділі 2.1. Проаналізуйте вплив запропонованих заходів на кліматичні характеристики (температура, якість повітря, рівень моря) та оцініть їхню реалістичність, економічні й соціальні наслідки. Сформулюйте рекомендації для практичного впровадження ефективних рішень.

2.8. Обертання та його вплив на клімат і форму Землі

Циркуляція повітряних і водних мас на Землі визначається різними чинниками (як-от розподіл температури, атмосферний тиск, вплив океанічних течій), зокрема і її обертанням. Наша планета постійно обертається, здійснюючи два основних види руху: обертання навколо власної осі та обертання навколо Сонця. Обертання Землі навколо своєї осі викликає чергування дня і ночі, а також впливає на розподіл температури і погоду на планеті. Обертання навколо Сонця визначає сезонні зміни, такі як перехід від літа до зими. Обидва ці рухи мають значний вплив на кліматичні умови й атмосферні процеси. Обертання Землі навколо власної осі впливає на напрямок вітрів, формування океанічних течій, а також на розподіл опадів. Це обертання визначає щоденний цикл температури і погоди, а також відіграє ключову роль у глобальних кліматичних процесах. Земна вісь, уявна лінія, що проходить від Північного до Південного полюса, залишається практично незмінною під час обертання планети.

Важливо зауважити, що вісь Землі нахилена під кутом $23,5^\circ$ до площини її орбіти навколо Сонця. Цей нахил має значний вплив на сезонні зміни в кліматі, оскільки з ним пов'язана інтенсивність і тривалість сонячного освітлення на різних широтах протягом року. Нахил відіграє ключову роль у формуванні кліматичних зон і сезонних варіацій температури на всій планеті. Таким чином, обертання Землі не тільки визначає добовий ритм і сезонні зміни, а й формує глобальні кліматичні умови, впливаючи на атмосферну циркуляцію, океанічні течії та загальний баланс енергії на нашій планеті.

У Сонячній системі не тільки Земля обертається навколо Сонця. На її обертання впливають Місяць та інші планети, і цей вплив хоч і слабкий, але дуже важливий. Які саме процеси важливі?

1. Прецесія. Насправді земна вісь не завжди повернена в одному напрямку — вона повільно рухається круговим конусом. Цей ефект має назву «прецесія». На ньому заснована дія гіроскопа. Коли гіроскоп починає рухатися, він швидко обертається навколо своєї осі, при цьому сама вісь описує конус. Із землею віссю відбувається те саме, причому період повного обороту становить приблизно 26 тисяч років. Зараз Земля нахилена так, що в січні (коли Земля знаходиться ближче до Сонця) північна півкуля, де розташована основна частина суші, відвернута від Сонця.

2. Нутація. Разом із повільною прецесією Землі відбуваються невеликі коливання кута нахилу її осі — ці коливання називаються нутацією. Головною причиною нутації є нахил орбіти Місяця до площини екліптики (близько 5°), який змінюється протягом циклу тривалістю 18,6 років. Це призводить до того, що вісь Землі здійснює малі коливання, описуючи еліпс навколо середнього положення небесних полюсів. Радіус цього еліпса — приблизно 9,2 кутової секунди.

3. Зміна форми орбіти. Під впливом сили тяжіння інших планет з часом змінюється форма земної орбіти. Від еліпса, витягнутого в одному напрямку, вона перетворюється на коло, потім — на еліпс, витягнутий у напрямку, перпендикулярному вихідному, потім — знову на коло і т. д. Цей цикл триває приблизно 93 тисячі років.

Сербський інженер, кліматолог, геофізик, астроном, математик Мілутін Міланкович дійшов висновку, що кожен із цих чинників впливає на кількість сонячного світла, отриманого різними областями Землі. Відповідно, відбуваються циклічні зміни клімату. Це пояснило, з-поміж іншого, періодичні зледеніння, що мають місце в історії Землі. Тривалість цих циклів — десятки і сотні тисяч років, вони називаються циклами Міланковича.

Але помітити обертання доволі складно, тому що всі предмети також перебувають у русі. Лінійна швидкість обертання

Землі навколо осі – 465 м/с, або 1674 км/год, в екваторіальній зоні, а при віддаленні від екватора швидкість поступово зменшується, і на Північному й Південному полюсах вона дорівнює нулю. Час повного оберту Землі навколо осі – одна зоряна доба (23 години 56 хвилин 4 секунди).

У XVII столітті Християн Гюйгенс та Ісаак Ньютон дійшли висновку, що Земля сплюснута біля полюсів, згодом французький математик П'єр Луї де Мопертюї під час експедиції до Лапландії 1737 року довів це експериментально. Сплющення планет Сонячної системи залежить від їхньої густини та швидкості обертання. У Сонячній системі планети й супутники, що обертаються з меншою швидкістю, як-от Меркурій, Венера, мають незначну сплюснутість. Найбільш сплюснутими є газові гіганти – Сатурн і Юпітер. Через це кожне небесне тіло, що обертається, – не ідеальний сфероїд. Як ми вже зазначали, недосконалу геометричну форму Землі, що, зокрема, включає морські западини і гірські хребти, називають **геоїдом**. Математично описати точну форму Землі доволі складно, тому її апроксимують іншими поверхнями, зокрема еліпсоїдами обертання. Для опису поверхні під Україною використовують фігуру під назвою *референт-еліпсоїд Красовського Ф. М.* Форма поверхні Землі визначається впливом сил гравітаційного притягання та сили інерції, яка виникає внаслідок її обертання. Гравітаційне поле Землі характеризують гравітаційним потенціалом та напруженістю. Як і в будь-якому потенційному полі, в полі Землі виділяють поверхні, утворені точками з однаковим потенціалом. Їх називають *геопотенціальними поверхнями*. Напруженість гравітаційного поля є векторною величиною. Напрямок вектора напруженості завжди перпендикулярний до *геопотенціальної поверхні*. Модуль вектора напруженості дорівнює силі, що діє на одиничну масу, тобто його значення збігається із гравітаційним прискоренням. Силою тяжіння називають силу, з якою тіло діє на опору або підвіс. Сила

тяжіння за напрямком не збігається з силою гравітаційного притягання на поверхні Землі внаслідок ефекту обертання нашої планети навколо власної осі. Поле сил тяжіння тіл, що мають одиничну масу, називають *геопотенціальним полем сил ваги*. Напрямок ліній напруженості поля сил ваги на поверхні Землі визначається напрямком нитки виска або за допомогою бульбашкового рівня.

Внаслідок обертання Землі тіла на її поверхні рухаються по колу. Радіус кола визначається його відстанню l_E до осі, що проходить через полюси Землі. Довільне тіло, рухаючись по колу, зазнає доцентрового прискорення. Позначимо його $\vec{w}_{\text{ду}}$:

$$\vec{w}_{\text{ду}} = V^2 / l = \Omega_E^2 l_E = V \Omega_E, \quad (2.15)$$

де $V = l_E \Omega_E$ — лінійна швидкість тіла.

Джерелом доцентрової сили є складова сили гравітаційного притягання. Ця складова може бути знайдена як векторна різниця сили гравітаційного притягання $\vec{Q}$ та сили ваги $\vec{G}$ певного тіла (рис. 2.16). Протягом свого існування Земля постійно підлаштовує свою поверхню до такої, яка була би перпендикулярною до вектора сили тяжіння.

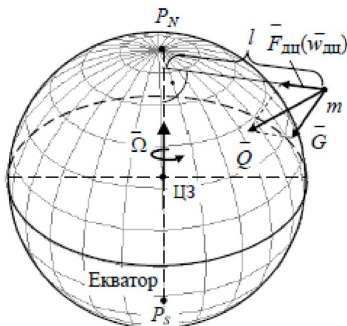


Рис. 2.16. Дія сил на тіло, що перебуває на поверхні Землі

Для ілюстрації утворення поверхонь з однаковим потенціалом, визначеним двома силами, розглянемо дослід на обертовій установці.



Дослід 4. Дослідження рівнопотенційних поверхонь у процесі обертання ємності з рідиною

Метою роботи є дослідження зміни форми вільної поверхні рідини в резервуарі, що обертається навколо вертикальної осі.

Обладнання: обертова платформа, плоский вертикальний резервуар, лінійки, відеокамера, ПК, Exel, Tracker (<http://physlets.org/tracker/>).

Перед проведенням лабораторного досліді запропонуйте учням ознайомитися з матеріалами з додатка 2 і сформулювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, щоб учні поділилися своїми прогнозами.

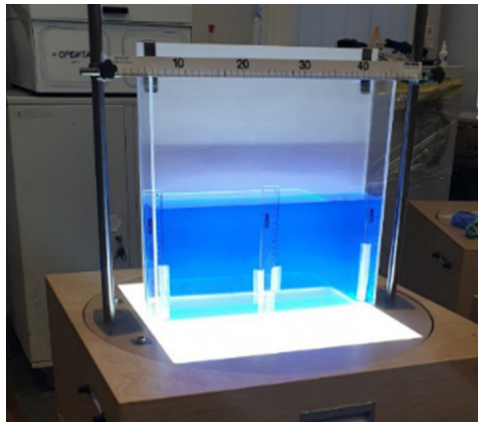


Рис. 2.17. Обладнання для проведення досліді

Експериментальна процедура

Заповнення резервуара. Налийте фарбовану воду в пластиковий вертикальний резервуар до половини об'єму.

Установка резервуара. Помістіть резервуар на обертову платформу, вирівнюючи його по осі обертання. Закріпіть три лінійки на площині резервуара, щоб можна було спостерігати зміни форми поверхні рідини.

Налаштування відеокамери. Розмістіть відеокамеру поряд із платформою в нерухомому положенні та увімкніть її для запису.

Запуск обертання. Встановіть частоту обертання платформи на 15 RPM (обертів за хвилину) та запустіть обертання.

Операційний час. Дайте платформі працювати протягом 5–10 хвилин, поки рідина в резервуарі не досягне стабільного стану обертання. Цей стан відомий як «жорстке обертання», коли частинки рідини мають нульову швидкість у системі координат, що обертається разом із резервуаром.

Зміна частоти обертання. Поступово збільшуйте частоту обертання з кроком 5 RPM та фіксуйте результати на відеокамеру. Робіть це до досягнення частоти 30 RPM.

Завершення експерименту. Після досягнення частоти 30 RPM зупиніть платформу і вимкніть відеокамеру. Перевірте записані дані для подальшого аналізу.

Альтернативний варіант. Якщо немає можливості провести експеримент, скористайтесь QR-кодом.

Аналіз отриманих даних

Після завершення експерименту проаналізуйте відеозапис для визначення форми вільної поверхні рідини при різних швидкостях обертання. Зверніть увагу на зміни в кривині поверхні і на співвідношення між швидкістю обертання та формою поверхні. Для цього виконайте зазначені нижче дії.

1. Сформуйте в математичних таблицях Excel таблицю результатів.

2. Завантажте на ПК відеозапис для RPM = 15. Знайдіть чіткий кадр, на якому велика площа резервуара буде перпендикулярною до осі камери.

3. За позначками на лінійках визначте $h_{\text{екс}}$ (м) на краю резервуара та занотуйте у таблиці.

4. Повторіть ці кроки для решти RPM.

5. Виміряйте радіус резервуара та для всіх випадків зробіть розрахунки для кутової швидкості та доданка $\frac{\Omega^2 r^2}{2g}$. Результат занотуйте до таблиці.

6. Використовуючи вираз

$$h(r) = h(0) + \frac{\Omega^2 r^2}{2g}, \quad (2.16)$$

де r – це відстань від осі обертання, розрахуйте інструментами Excel значення $h_{\text{теор}}$ (м).

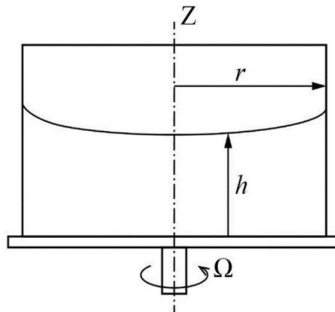


Рис. 2.18. Утворення рівнопотенційної поверхні при обертанні

7. Розрахуйте відхилення теоретичного значення від експериментального. Зробіть висновки.

Таблиця результатів. Максимальне відхилення
для різних швидкостей обертання

RPM	15	20	25	30
Ω				
$r(\text{м})$	0,195	0,195	0,195	0,195
$\Omega^2 r^2 / 2g$				
$h_{\text{теор}} (\text{м})$				
$h_{\text{екс}} (\text{м})$				
$\Delta h (\text{м})$				

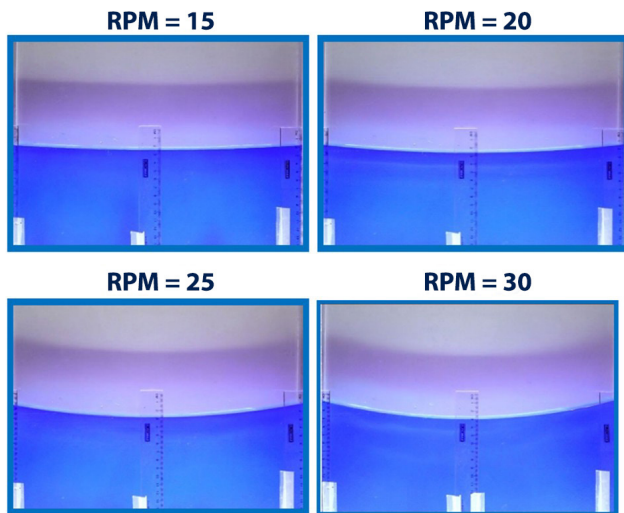


Рис. 2.19. Результати дослідів з утворення рівнопотенційних поверхонь
для різних значень RPM

8. За допомогою програми Tracker (<http://physlets.org/tracker/>) побудуйте графіки теоретичних функцій, що описують поверхню, та накладіть їх на зображення, отримане під час дослідів.

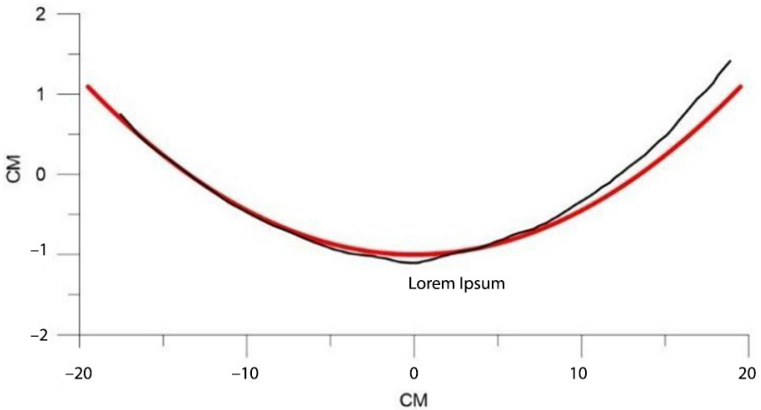


Рис. 2.20. Графіки залежності висоти підняття рідини (чорна лінія — експериментальні дані, червона — теоретична крива (2.16))

Обговорення. Обговоріть гіпотези, сформульовані учнями перед дослідом. Слід зауважити, що парабола, яка утворюється на поверхні рідини в обертовому резервуарі, має низку важливих властивостей. Однією з ключових характеристик є здатність фокусувати паралельні промені. Цю властивість параболи використовував Архімед у своїх експериментах, коли за допомогою параболічних дзеркал або системи дзеркал спрямовував концентровані сонячні промені на римські кораблі, що дало йому можливість знищити їх.

Історичний контекст. Архімед, видатний давньогрецький математик і інженер, вважався одним із перших, хто практично застосував властивості параболи у військових цілях. Легенда свідчить, що він спалив римські кораблі, використовуючи концентровані сонячні промені, зосереджені за допомогою параболічних дзеркал. Цей метод, попри деякі спірні моменти щодо його історичної точності, продемонстрував важливість оптичних властивостей параболи в практичному застосуванні.

Обговорення в групах. Обговоріть, як форма параболи на поверхні рідини впливає на фокусування променів. Які фізичні принципи лежать в основі цього явища? Які інші приклади фокусування променів можна знайти в природі або в техніці? Як вони порівнюються з використанням параболічних дзеркал? Визначте, наскільки реалістичною є гіпотеза про використання параболічних дзеркал Архімедом. Які наукові й технічні знання були доступні в той час? Це обговорення сприяє кращому розумінню застосування математичних і фізичних концепцій у реальних ситуаціях та спрямоване на розширення знань про використання оптичних властивостей.

2.9. Сила Коріоліса

Продовжимо тему обертання Землі і розкриємо поняття сили Коріоліса, яка названа на честь Гаспара-Гюстава де Коріоліса (1792–1843) — французького математика, інженера й науковця. Ця сила — одна із сил інерції, що діє під час руху в напрямку під кутом до осі обертання. Коли диск обертається, точки, що розташовані далі від центру, рухаються з більшою швидкістю, ніж ті, що містяться ближче до центру. Якщо ми хочемо перемістити певне тіло вздовж радіуса так, щоб воно залишалося на радіусі, то нам доведеться збільшити швидкість тіла. Якщо наша система відліку обертається разом із диском, то ми відчуваємо, що тіло «не хоче» залишатися на радіусі, а прагне зміститися — це і є сила Коріоліса. Якщо обертання відбувається за годинниковою стрілкою, то тіло, що рухається від центру обертання, прагне зійти з радіуса вліво. Якщо обертання відбувається проти годинникової стрілки — то вправо.

Відповідно до ефекту Коріоліса рух частинок маси (наприклад, води або повітря) буде відхилятися вправо (від-

носно напрямку на північ), якщо він відбувається в північній півкулі. Якщо рух відбувається в південній півкулі, то він відхилятиметься вліво (відносно напрямку на південь), звідси і напрямок обертання океанічних течій. Отже, на півночі Атлантики вода відхиляється вправо, тому Гольфстрім рухається за годинниковою стрілкою.

Варто зазначити, що вплив сили Коріоліса проявляється переважно у випадках, коли йдеться про явища великого просторового масштабу або про значні швидкості. Сила Коріоліса помітна в таких явищах.

1. **Поворот площини коливань маятника Фуко.** У системі координат «Земля» маятник із довгим підвісом поступово змінює напрямок коливань через обертання Землі.
2. **Асиметрія берегів річок.** У північній півкулі праві береги річок зазвичай крутіші за ліві через силу Коріоліса, яка спрямовує потоки води. У південній півкулі все навпаки.
3. **Вільне падіння тіл.** Об'єкти, що вільно падають у північній півкулі, злегка відхиляються на схід, тоді як у південній півкулі — на захід.
4. **Знос залізничних рейок.** На залізницях із одностороннім рухом у північній півкулі права рейка зазнає більшого тиску й зношується швидше, ніж ліва. У південній півкулі — навпаки.
5. **Відхилення траєкторії артилерійських снарядів.** У північній півкулі снаряди далекобійної артилерії відхиляються вправо від запланованої траєкторії, у південній — вліво. Додатково слід зазначити, що при пострілах вздовж екватора сила Коріоліса діє по-різному: якщо постріл здійснюється на схід, то влучають вище точки прицілювання, а при пострілі на захід — нижче.

На рис. 2.21 зображено гіпотетичні положення резервуара на Землі, що обертається. Великі значення швидкості обер-

тання будуть відповідати полярним регіонам, а мінімальні — положенню нашого обертового резервуара на екваторі.

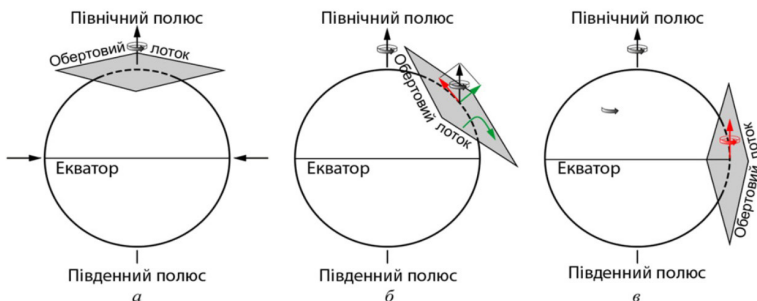


Рис. 2.21. Сила Коріоліса на різних широтах і модель обертового резервуара

Параметр Коріоліса f знаходиться як:

$$f = 2\Omega \sin\varphi, \quad (2.17)$$

де Ω — кутова швидкість обертання Землі навколо осі, φ — географічна широта місця.

Таблиця 2.3. Значення сили Коріоліса як функції широти

Широта	Сила Коріоліса $f(10^{-4} \text{ с}^{-1})$
90	1,46
60	1,26
45	1,03
30	0,73
10	0,25
0	0



Дослід 5. Дослідження сили Коріоліса

Метою роботи є дослідження впливу сили Коріоліса на рух кульки поверхнею, що обертається.

Обладнання: обертова установка, відеокамера, кулька, ПК, Tracker (<https://physlets.org/tracker/>).

Перед проведенням лабораторного досліді запропонуйте учням ознайомитися з матеріалами з додатка 2 і сформулювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, щоб учні поділилися своїми прогнозами.

Експериментальна процедура

Підготовка обладнання. Налаштуйте обертову установку з можливістю регулювання частоти обертання. Переконайтесь, що установка стабільна і не має механічних дефектів. Закріпіть відеокамеру на штативі так, щоб камера повністю охоплювала обертальну платформу і її поверхню було чітко видно на записі.

Налаштування експерименту. Увімкніть обертову установку і забезпечте освітлення платформи для отримання чітких відеозаписів. Встановіть початкову частоту обертання платформи на 5 обертів на хвилину (RPM).

Запуск експерименту. Запустіть відеозапис для документування руху кульки. Увімкніть обертання платформи на встановлену частоту (5 RPM).

Розташування кульки. Помістіть кульку точно в центрі платформи, щоб забезпечити її рух у всіх можливих напрямках.

Виконання експерименту. Після стабілізації частоти обертання легко зруште кульку, використовуючи незначний поштовх. Нехай кулька рухається по платформі, доки не досягне її краю.

Зупинка та запис результатів. Після того як кулька досягне краю платформи, зупиніть обертання платформи і відеозапис. Оцініть траєкторію руху кульки на основі відеозапису, звертаючи увагу на відхилення траєкторії, викликане силою Коріоліса.

Повторення експерименту. Повторіть експеримент кілька разів, кожного разу збільшуючи частоту обертання на 5 RPM (10 RPM, потім 15 RPM і так далі). Для кожної частоти обертання зафіксуйте, як змінюється траєкторія руху кульки і як сила Коріоліса впливає на неї.

Альтернативний варіант. Якщо немає можливості провести експеримент, скористайтесь QR-кодом.



Рис. 2.22. Обладнання для проведення дослідів «Сила Коріоліса»

Аналіз отриманих даних

1. Скопіюйте відеозаписи на ПК.

Завантажте відео у програму Tracker (<https://physlets.org/tracker/>). Уважно перегляньте інструкції по роботі з програмою Tracker. Якщо вам потрібна додаткова допомога, то ця програма має велику кількість навчальних ресурсів і відеоуроків, які можуть бути корисні для освоєння всіх функцій.

2. Перегляньте відеозапис та оберіть діапазон кадрів, на яких ви будете відслідковувати рух кульки. Для цього оберіть кнопку  та вкажіть у вікні номер початкового кадру (Start frame), кінцевого кадру (End frame) та проміжок між кадрами (step size).

3. Оберіть інструмент «Масштаб»  та виділіть вкладинку «калібрувальний відрізок».

4. Встановіть відрізок на стороні квадрата і вкажіть його довжину 0,4 м.

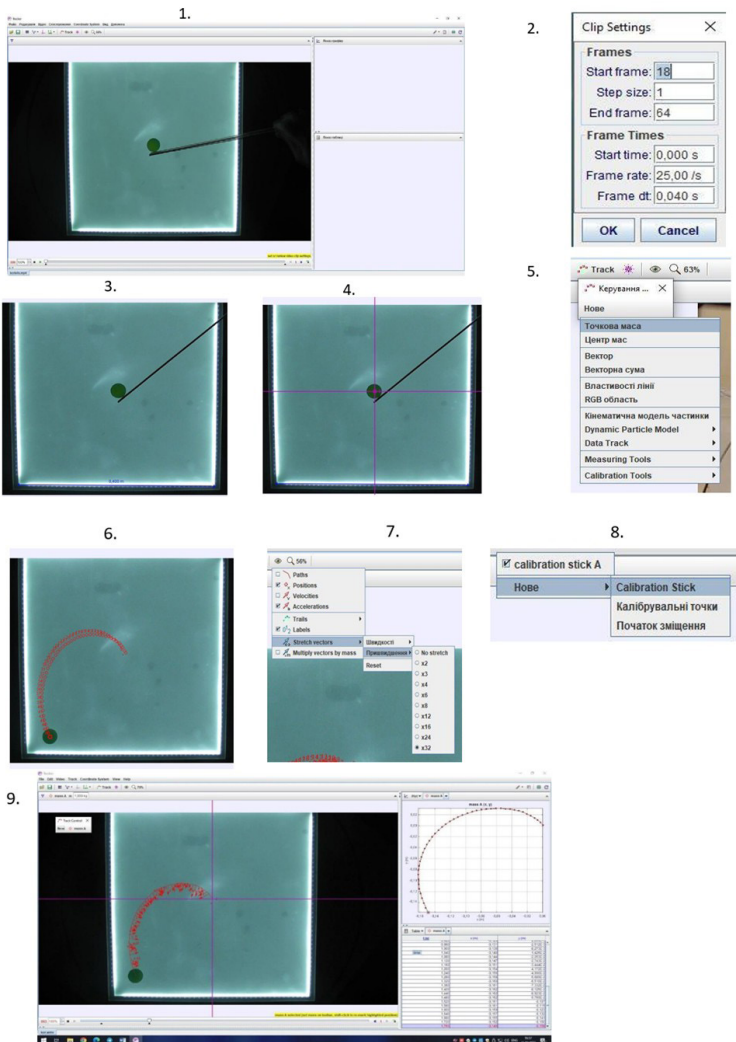
5. Оберіть кнопку  та встановіть початок відліку координат у початковому положенні кульки.

6. Для відслідковування руху кульки оберіть «Точкова маса» (рис. 2.23 (5)).

7. Утримуючи клавішу Shift, відзначаєте положення кульки на кожному кадрі. Кадри перемикаються автоматично.

8. Для відтворення на зображенні вектора прискорення оберіть шлях.

9. Інструментами програми побудуйте вектори прискорення. Зробіть висновок до роботи.



Обговорення після досліду. Обговоріть гіпотези, які були сформульовані учнями перед проведенням досліду. Організуйте дискусію щодо впливу сили Коріоліса на траєкторію артилерійських снарядів. За однією з версій, повна поразка російського флоту в Цусімській битві 1905 року може бути частково пов'язана з дією цієї сили. Є припущення, що артилерійські снаряди, які були пристріляні в Кронштадті (~60° пн. ш.), дали систематичні похибки при стрільбі в Цусімі (~35° пн. ш.), що й могло призвести до неточності стрільби та поразки. Запропонуйте обговорити цю гіпотезу та оцінити ймовірність такого впливу. Результати аналізуються та обговорюються в класі з метою оцінювання їхнього значення.

2.10. Вплив обертання на динаміку рідини. Критерії подібності для течій в обертовій установці

Необхідно визначити, на яких масштабах атмосфера, океан чи наш лабораторний експеримент «відчують ефекти обертання». Припустімо, що типові горизонтальні швидкості (атмосферні чи океанічні) дорівнюють U , а типова просторова відстань становить L . Тоді часовий масштаб руху становить L/U . В обертовій установці, яка має відтворювати процеси, що відбуваються на Землі, важливим є критерій подібності (або число) Россбі (таблиця 1.1). Він характеризує ступінь впливу на систему сили Коріоліса.

Безрозмірним числом Россбі позначають відношення інерційної складової U (лінійна швидкість) до сили Коріоліса f (2.17) та до просторового масштабу L :

$$\text{Ro} = \frac{U}{fL} . \quad (2.18)$$

Радіусом Россбі називається відношення лінійної швидкості до кутової швидкості:

$$L_{Ro} = \frac{U}{2\Omega}. \quad (2.19)$$

Якщо число Россбі Ro набагато більше, ніж 1, то часовий масштаб руху малий відносно періоду обертання і обертання не вплине суттєво на рух. Якщо ж число Ro набагато менше за одиницю, то рух буде «відчувати» обертання.

Оцінімо число Россбі Ro для атмосфери та океану.

Атмосфера (наприклад, для погодних систем у середніх широтах, де параметр Коріоліса має порядок 10^{-4} с^{-1}): масштаб $L = 5000 \text{ км}$, середні швидкості $U = 10 \text{ м/с}$, що дають Ro_{atm} :

$$Ro_{atm} = \frac{U}{fL} = \frac{10 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{10^{-4} \frac{1}{\text{с}} \cdot 5000 \cdot 10^3 \text{ м}} = 0,02.$$

Це означає, що обертання в цьому випадку є важливим.

Океан (наприклад, для великих вихорів Атлантичного або Тихого океанів у середніх широтах): масштаб $L = 1000 \text{ км}$, середні швидкості U приблизно $0,1 \text{ м/с}$, що дають Ro_{ocean} приблизно $0,01$. Тому для океанічних вихорів обертання є визначальним фактором.

$$Ro_{ocean} = \frac{U}{fL} = \frac{0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{10^{-4} \frac{1}{\text{с}} \cdot 1000 \cdot 10^3 \text{ м}} = 0,001.$$

Отже, бачимо, що обертання матиме першорядне значення при формуванні структури як повітряних, так і океанічних течій на досить великих масштабах. Для того, щоб моделювати відповідні процеси в обертовій установці, маємо брати до уваги відповідні значення числа Россбі.



Дослід 6. Дослідження впливу обертання на динаміку рідини

Ідею досліду взято з проекту Массачусетського технологічного інституту Weather in Tank (<http://weathertank.mit.edu/links/projects/dye-stirring-an-introduction>).

Метою роботи є дослідження характеру поведінки рідини, яка перебуває в обертовому русі, та розрахунок швидкостей обертання установки, для яких обертання впливатиме на рух рідини.

Обладнання: обертова установка, резервуар із квадратною основою, харчові барвники.

Перед проведенням лабораторного досліду запропонуйте учням ознайомитися з матеріалами з додатка 2 і сформулювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, щоб учні поділилися своїми прогнозами.

Експериментальна процедура

Підготовка установки. Розмістіть резервуар із квадратною основою на обертовій платформі. Переконайтесь, що резервуар встановлений стійко та рівно.

Заповнення резервуару. Наповніть резервуар водою до рівня 20 см (рідини має бути достатня кількість, аби було виразно видно ефекти обертання).

Налаштування відеокамери. Закріпіть відеокамеру над резервуаром таким чином, щоб він увесь потрапляв у кадр. Це дасть змогу детально фіксувати рух рідини під час обертання.

Підготовка до зйомки. Увімкніть підсвітку для забезпечення чіткої видимості та якості відеозапису. Розпочніть відеозапис, щоб зафіксувати початковий стан рідини до початку обертання.

Створення початкового хаотичного руху. Додайте харчовий барвник у кількох місцях резервуара, використовуючи різні кольори для підвищення контрастності. Створіть хаотичний рух у воді, провівши рукою або лінійкою по поверхні рідини. Це дасть можливість візуалізувати початковий стан та рівень перемішування.

Зміна води. Злийте стару воду з резервуара і заповніть його новою водою. Це забезпечить чистий старт для наступних вимірювань.

Дослідження на різних швидкостях. Увімкніть обертання установки на частоті 5 обертів на хвилину (RPM). Почекайте 10 хвилин, щоб рідина в резервуарі досягла стабільного стану. Увімкніть відеозапис і додайте харчові барвники в кількох місцях резервуара. Зафіксуйте рух рідини та спостереження за впливом обертання.

Повторення експерименту. Повторіть попередні дії для частот обертання 15 RPM та 25 RPM. Для кожної частоти обертання зафіксуйте відеозаписи та спостерігайте за змінами у поведінці рідини.

Альтернативний варіант. Якщо немає можливості провести експеримент, скористайтеся QR-кодом.

Аналіз отриманих даних

1. Перенесіть відеозаписи експерименту на комп'ютер. Переконайтеся, що всі файли успішно завантажені та доступні для перегляду і подальшого аналізу.

2. Відкрийте відеозапис з експериментом у нерухомому резервуарі. Оцініть характер руху рідини. Визначте, переважає тривимірний чи двовимірний турбулентність. Тривимірний турбулентність проявляється у вигляді складних хаотичних потоків у всіх трьох просторових напрямках. Двовимірний турбулентність спостерігається, коли рух рідини обмежується переважно двома напрямками, а третій напрямок (перпендикулярний до площини руху) залишається стабільним.

3. Занотуйте свої спостереження та зробіть висновки щодо типу турбулентності, яку ви спостерігали. Порівняйте ці результати із записами експерименту в рухомому резервуарі і визначте, чи є відмінності у типах турбулентності.

4. Розрахуйте радіус Россбі для кожного з випадків, використовуючи припущення, що горизонтальні швидкості становлять $U = 1-2$ см/с, а розміри резервуара $39,5 \times 39,5$ см. Занотуйте отримані результати в таблицю для подальшого аналізу та порівняння.

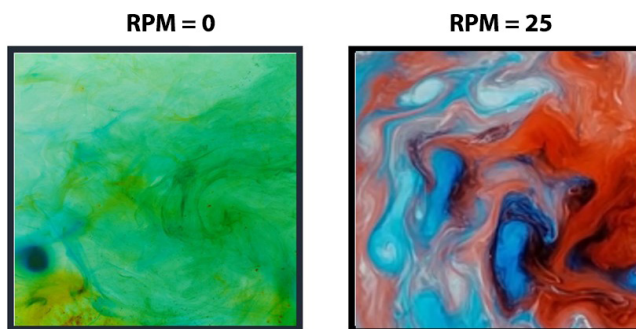


Рис. 2.24. Характер фарбованої течії без обертання та при обертанні

Таблиця результатів.

Радіус Россбі для різних швидкостей обертання

RPM	5 (об/хв)	15 (об/хв)	20 (об/хв)	25 (об/хв)
L_{ro} (м)				

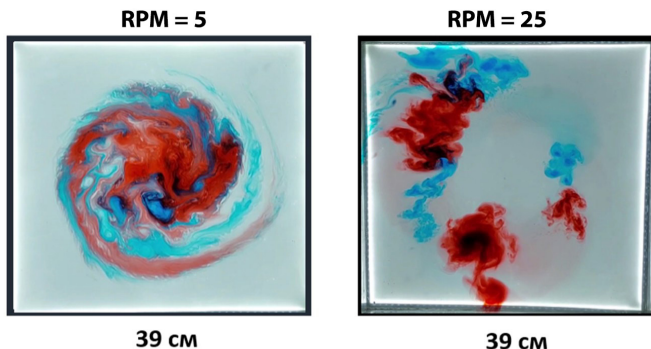


Рис. 2.25. Характер фарбованої течії для випадку обертання із $\text{RPM} = 5$ об/хв та обертання $\text{RPM} = 25$ об/хв

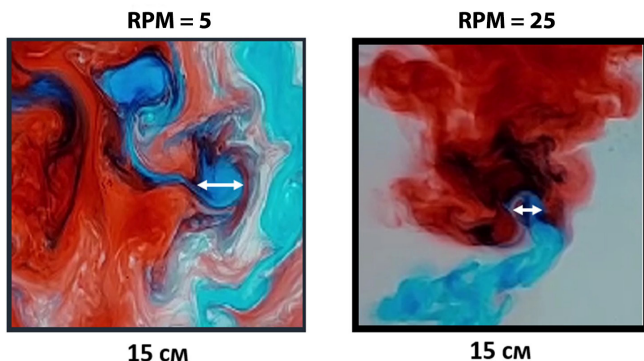


Рис. 2.26. Характерний розмір вихорів для випадків обертання з $\text{RPM} = 5$ об/хв та обертання $\text{RPM} = 25$ об/хв

Обговорення досліді: обговоріть гіпотези, сформульовані учнями перед проведенням досліді.

Порівняйте результати спостережень типів турбулентності в нерухомому і обертовому резервуарі. Зверніть увагу на те, як зміна умов впливає на динаміку рідини та характер руху. Оцініть, які відмінності спостерігаються в турбулентності між нерухомою та обертовою системами. Проаналізуйте

значення радіусів Россбі для кожного з випадків. Порівняйте ці значення і обговоріть, як радіус Россбі як критичний параметр відображає вплив обертання на поведінку рідини. Врахуйте, що радіус Россбі може бути використаний для визначення, чи є обертання домінуючим фактором у формуванні турбулентності і чи переходить система від тривимірної до двовимірної турбулентності.

Обговоріть також інші фактори, які могли вплинути на турбулентність, такі як розмір резервуара, швидкість обертання та властивості рідини. Розгляньте, як ці фактори взаємодіють і впливають на динаміку рідини. Які висновки можна зробити щодо загальних принципів поведінки рідин в умовах обертання?

Цей аналіз дасть можливість глибше зрозуміти вплив обертання та інших параметрів на турбулентність і динаміку рідини, що є важливим для розширення знань у галузі гідродинаміки та метеорології.

2.11. Маятник Фуко

Маятник Фуко є видатним експериментальним пристроєм, що ілюструє ефекти добового обертання Землі через демонстрацію обертання площини коливань маятника. Цей тип маятника, що часто називають нитяним маятником, розроблений французьким фізиком Леоном Фуко для візуалізації явища, яке раніше було важко продемонструвати. Перша публічна демонстрація маятника Фуко відбулася в березні 1851 року в Пантеоні в Парижі. Цей експеримент став знаковим моментом в історії фізики, оскільки він забезпечив наочний доказ того, що Земля обертається навколо своєї осі. Під куполом Пантеону було підвішено велику металеву кулю масою 28 кг, що була закріплена на сталевому дроті завдовжки 67 метрів. Важливою особливістю

цього маятника була його значна довжина, що давала можливість зменшити ефект гасіння коливань і забезпечити чіткіші спостереження. Площина обертання маятника Фуко, що є напрямком його коливань, зазнає поступового обертання внаслідок добового обертання Землі. Цей ефект викликаний тим, що сама Земля обертається під маятником, а не навпаки. Внаслідок цього, незалежно від того, як маятник коливається, його площина буде поступово змінювати своє положення відносно земної поверхні, створюючи враження обертання. Площина коливань маятника обертається в північній півкулі за годинниковою стрілкою згідно із законом:

$$\omega = \omega_0 \sin \varphi, \quad (2.20)$$

де ω_0 — кутова швидкість обертання Землі (15° за годину), φ — широта місцевості, де встановлений маятник. Маятник Фуко дає змогу вимірювати широту свого географічного розташування, а також пояснює існування сили Коріоліса.

Розглянемо аналог маятника Фуко — коливання математичного маятника на обертовій установці.



Рис. 2.27. Обладнання для проведення дослідів «Маятник Фуко»

Для випадку без обертання ми маємо звичайний математичний маятник, і траєкторією його руху буде відрізок. Період коливань математичного маятника T_{pend} знаходиться як:

$$T_{\text{pend}} = L_{\text{pend}} / U, \text{ де } T_{\text{pend}} = 2\pi \sqrt{\frac{L_{\text{pend}}}{g}}, \quad (2.21)$$

де L_{pend} — довжина маятника, U — лінійна швидкість.

При обертанні траєкторія маятника буде описуватися такими рівняннями:

$$\begin{cases} x(t) = \frac{U}{2\Omega} - \frac{U}{2\Omega} \cos 2t \\ y(t) = \frac{U}{2\Omega} \sin 2t \end{cases} \quad (2.22)$$

Траєкторією матеріальної точки є кола з радіусом $\frac{U}{2\Omega}$, тобто з радіусом Россбі, який дорівнює відношенню лінійної швидкості до кутової швидкості.

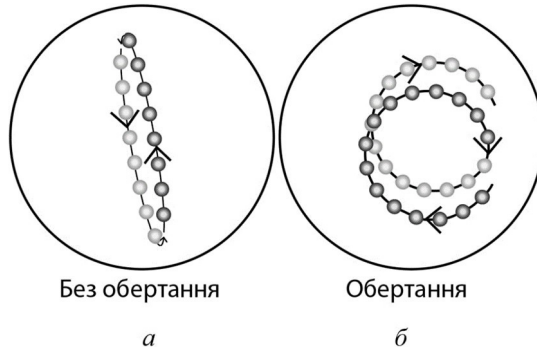


Рис. 2.28. Траєкторії маятника без та з обертанням

Коли швидкість обертання дорівнює нулю, радіус кола стає нескінченним і коло перетворюється на пряму лінію. При збільшенні швидкості обертання радіус кола починає зменшуватися. Це означає, що в умовах відсутності інших сил рівновага між силою Коріоліса та відцентровою силою призводить до того, що частинки або потік обертаються по дугах, які називаються «колами інерції». Ці кола мають радіус, який визначається як радіус деформації Россбі.

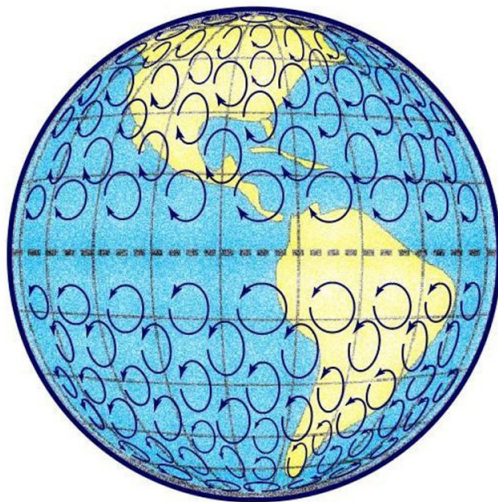


Рис. 2.29. Циркуляції на Землі по «колам інерції», що мають радіус деформації Россбі

Бачимо, що радіуси Россбі є радіусами траєкторій маятника при обертовому русі. На цьому прикладі можна наочно побачити ситуації, коли ефекти обертання суттєві, а коли ні. Ми вже розглядали безрозмірне число Россбі як масштаб, на якому ефекти обертання стають суттєвими.



Дослід 7. Дослідження коливань маятника Фуко

Метою роботи є дослідження траєкторії маятника на обертовій платформі та оцінка радіуса деформації Россбі для різних швидкостей обертання платформи.

Обладнання: обертова платформа, нитка, відеокамера, кулька, ПК.

Перед проведенням лабораторного досліді запропонуйте учням ознайомитися з матеріалами з додатка 2 і сформулювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, щоб учні поділилися своїми прогнозами.

Експериментальна процедура

Підготовка установки. Налаштуйте обертову платформу, прикріпивши до неї нитку з кулькою на кінці, щоб створити конфігурацію маятника.

Калібрування обладнання. Закріпіть відеокамеру на штативі так, щоб у кадр потрапляло все поле обертання платформи. Переконайтеся, що камера має чіткий огляд на траєкторію маятника.

Проведення експерименту. Увімкніть підсвітку платформи для покращення видимості і розпочніть обертання платформи. Налаштуйте платформу на частоту обертання $\text{RPM} = 15$ і почніть запис відео. Після 5–7 хвилин запису вимкніть обертання та зупиніть запис. Повторіть кроки з частотами обертання $\text{RPM} = 20$ і $\text{RPM} = 25$. Для кожної частоти проводьте запис не менше 5–7 хвилин, забезпечуючи стабільність роботи платформи.

Альтернативний варіант. Якщо немає можливості провести експеримент, скористайтеся QR-кодом.

Аналіз отриманих даних

1. Підключіть знімний носій даних, на якому зберігаються відеозаписи, до комп'ютера. Скопіюйте всі відеофайли

на жорсткий диск вашого ПК в зручне для вас місце, наприклад в окрему папку.

2. За допомогою програмного забезпечення Tracker (<https://physlets.org/tracker/>) прослідкуйте рух кульки на маятнику для кожного відеозапису та інструментами програми побудуйте траєкторію. Детальні інструкції надано у досліді 5 (дослідження сили Коріоліса).

3. Інструментами програми виміряйте характерний середній радіус для кожного запису та порівняйте з розрахунковим. Зробіть висновки до роботи.

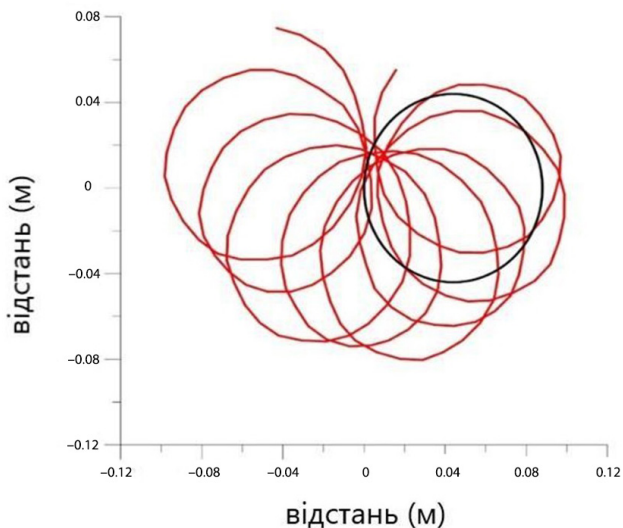


Рис. 2.30. Порівняння теоретичної кривої траєкторії маятника (позначена чорним кольором) та результатів експерименту для $\text{RPM} = 20$. $L_{\text{pend}} = 0,88$ м (червоним)

Обговорення дослідів. Обговоріть гіпотези, сформульовані учнями перед дослідом. Сформулюйте нові гіпотези щодо того, як зміниться траєкторія маятника при збільшенні (зменшенні) швидкості обертання платформи.

Сформулюйте додаткову задачу: в Києві для демонстрації обертання Землі в холі Науково-технічної бібліотеки ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» встановлено маятник Фуко. Його довжина $L = 22$ м, діаметр бронзової кулі — 28 см, вага — 43 кг.

Визначте інші характеристики цього маятника, як, наприклад, період коливань маятника, намалюйте траєкторії, які описує цей маятник. Обговоріть, як довжина маятника та маса кулі впливають на період коливань і характер траєкторії. Проаналізуйте, як результати можуть варіюватися залежно від точності вимірювань і наявних умов. Визначте можливі джерела похибок у проведених розрахунках і вимірюваннях. Розгляньте можливість впливу зовнішніх факторів на результати експерименту та запропонуйте способи їх усунення. Ці кроки допоможуть краще зрозуміти механізми, що стоять за демонстрацією обертання Землі за допомогою маятника Фуко, і оцінити точність та ефективність використовуваних моделей.

2.12. Питання та завдання до розділу 2

1. У чому полягає суть парникового ефекту?
2. Хто перший висунув ідею парникового ефекту?
3. Які парникові гази ви знаєте?
4. Які основні чинники спричиняють швидке зростання концентрації парникових газів в атмосфері?
5. Охарактеризуйте ключові атмосферні, океанічні та географічні процеси, які впливають на формування клімату. Які ще фактори можуть впливати на довгострокові зміни клімату (наприклад, вулканічна діяльність та зміни в орбіті Землі)?
6. Поясніть термін «зеніт» в астрономії та географії. Як зеніт визначається для конкретного місця на Землі і

- як він змінюється залежно від географічної широти?
7. Від чого залежить радіаційний баланс Землі?
 8. Який кут нахилу осі Землі відносно її орбіти навколо Сонця і як цей нахил впливає на сезонні зміни? Як нахил земної осі впливає на тривалість і інтенсивність сезонів у різних широтах?
 9. Як співвідносяться площа поверхні Землі та площа Земного диска?
 10. Визначте, як змінюється кут падіння сонячних променів залежно від широти. Для кожної вказаної широти (30° , 50° , 75° , 90°) розрахуйте кут падіння сонячних променів опівдні, коли Сонце в зеніті над екватором. Який вплив має цей кут на інтенсивність сонячного випромінювання і температурний режим?
 11. Опівдні Сонце знаходиться над обрієм під кутом $21^\circ 40'$ пд. ш. Під яким кутом падають сонячні промені в цей час на $50^\circ 27'$ пд. ш.?
 12. Опівдні Сонце на $15^\circ 45'$ пд. ш. знаходиться в зеніті. Під яким кутом падають сонячні промені того самого дня опівдні у точці на $47^\circ 50'$ пн. ш.?
 13. Охарактеризуйте поняття альбедо і його значення для кліматології. Який вплив має альбедо на глобальний і локальний клімат?
 14. Яким чином альбедо впливає на поглинання та відбиття сонячної радіації? Чому дорівнює альбедо для сніжного покриву? Поясніть, як цей параметр змінюється залежно від типу снігу та його стану (свіжий, старий, чи зледенілий).
 15. Яке буде альбедо поверхні за таких показників: падаючий потік енергії — $200 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, розсіяний потік енергії — $100 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ та відбитий потік $150 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$?
 16. Зараз температура випромінювання Землі становить 255°K , а її альбедо 30 %. Як змінилась би температура випромінювання, якби:

- а) альbedo було зменшено до 20 %;
 - б) альbedo було зменшено до 5 %?
17. Високе альbedo снігу діє як позитивний зворотний зв'язок — якщо Земля стане прохолоднішою, висока відбивальна здатність снігу може зумовити подальше охолодження Землі. Сьогодні частина Землі покрита снігом і льодом. Чи можете ви описати механізм, за допомогою якого тепліші температури також дадуть позитивний зворотний зв'язок — цього разу нагріваючи Землю далі — за допомогою подібного механізму альbedo?
18. Марс холодніший за Землю, тоді як Венера значно спекотніша, із середньою температурою поверхні близько 450 °C. Венера розташована ближче до Сонця, ніж Земля, і тому отримує приблизно вдвічі більше сонячної радіації. Атмосфера Венери також відрізняється від земної, оскільки вона набагато товстіша і в основному складається з вуглекислого газу. Використовуючи знання про парникові гази, чи можете ви запропонувати причини, чому Венера така гаряча?
19. Кисень становить понад 20 % атмосфери Землі, тоді як вуглекислий газ становить менш ніж 0,04 %. Кисень багато в чому прозорий як для видимого, так і для інфрачервоного світла. Поясніть, чому вуглекислий газ є більш важливим парниковим газом в атмосфері Землі, ніж кисень, хоча кисню набагато більше, ніж вуглекислого газу.
20. Уявімо собі, що Земля все-таки пласка, тобто є тонким диском із радіусом 6370 км. Такий плаский диск обертається навколо Сонця на однаковій відстані, як і Земля; планетарне альbedo дорівнює 30 %. Векторна нормаль до однієї грані цього диска завжди вказує прямо до Сонця, і диск зроблений так, що ідеально проводить тепло, тобто обидві сторони диска мають однакову температуру. Яка буде температура випромінювання цього диска? Порівняйте її зі значеннями для сферичної Землі.

21. Середній радіус орбіти Венери в 0,72 раза більший, аніж орбіта Землі; сонячний потік S зменшується як квадрат відстані від Сонця і має значення $1367 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (див. формулу (2.1)) на середній навколоземній орбіті. Планетарне альbedo Венери = 0,77. Яка буде температура випромінювання планети Венери?
22. Розрахунки показують, що кількість сонячного тепла, яке отримує наша планета, є недостатньою для пояснення температури її поверхні. У чому причина?
23. Використайте дані, зображені на графіку 2.12, і знайдіть лінійне наближення для моделювання середньорічних рівнів CO_2 в атмосфері з 1950 по 2017 рік (використовуючи записи даних <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/data.html>).



24. Порівняйте та проаналізуйте швидкість зміни рівнів CO_2 в атмосфері. Відповідно до наявних тенденцій оцініть, яким буде рівень CO_2 в атмосфері у 2100 році?
25. Враховуючи, що прискорення за рахунок сили тяжіння зменшується з висотою від центра Землі за обернено квадратичним законом, знайдіть, на скільки (у відсотках) зміниться g від поверхні землі до висоти 100 км?
26. Обчисліть середній тиск на поверхні Землі, використовуючи масу атмосфери Землі $M_a = 5,1 - 5,3 \times 10^{18} \text{ кг}$, прискорення сили тяжіння g і радіус Землі a (табл. 2.1).
27. Яке теоретичне значення має Δh в експериментальному лотку при $\text{RPM} = 15,25$?
28. Що характеризує прискорення Коріоліса?
29. Як ефект Коріоліса впливає на напрямок руху в північній півкулі?
30. Як ефект Коріоліса впливає на напрямок руху в південній півкулі?

31. Які прояви сили Коріоліса ви знаєте?
32. Де прискорення сили Коріоліса буде більшим — у Києві чи в Одесі?
33. Від удару гравця футбольний м'яч перемістився на відстань 60 м на футбольному майданчику на 45° північної широти. М'яч рухається з постійною швидкістю 15 м/с. Горизонтальна складова швидкості 15 м/с. Визначте відхилення м'яча від прямої траєкторії через ефект Коріоліса (нехтуємо всіма аеродинамічними ефектами).
34. Оцініть числа Россбі для таких процесів та зробіть висновки, як впливає на ці процеси обертання Землі:
 - а) вихор у раковині;
 - б) торнадо;
 - в) циклон.
35. Дослідіть ефект Коріоліса в невеликих резервуарах. Наберіть повну ванну води і дайте їй відстоятися не менше 7–8 годин, а ще краще — 10–12 годин. Це необхідно, щоб не відбувалися хаотичні рухи води. Перевірити їх наявність легко: киньте у воду кристал барвника; він прокреслить бузкову лінію від поверхні до дна. Якщо лінія залишається прямою, це означає, що вода вже спокійна. Потім дуже акуратно, не занурюючи руку у воду, витягніть за ланцюжок пробку. Підіймайте її повільно і вертикально. Тепер чекайте. Майже вся вода витече спокійно, без видимих рухів. Якщо ви все зробили правильно, то останні 2–3 літри води продемонструють вихор у правильному напрямку. Для фіксації фізичних параметрів киньте у воду папірці-маркери та зробіть відеозапис. Ви зафіксуєте, що у процесі зливу води, коли вона наближається до отвору, її швидкість зростає. Виміряйте її за допомогою Tracker (<https://physlets.org/tracker/>), як це було описано в деяких дослідях цього розділу. Обчисліть число Россбі та визначте, чи має обертання Землі значний вплив у цьому експерименті.

Розділ 3. ОКЕАН І КРІОСФЕРА

У ЦЬОМУ РОЗДІЛІ МИ:

1. Дізнаємося, що таке глобальна кліматична система.
2. Який з її компонентів найбільш впливовий.
3. Опишемо вертикальну структуру океану.
4. Відтворимо конвекцію тепла і солі.
5. Дізнаємося, що таке гіпотеза MSI.
6. Дізнаємося про причини і наслідки підвищення рівня океану.
7. Зрозуміємо різницю впливу на підвищення рівня океану від танення континентальних та морських льодовиків.
8. Згенеруємо внутрішні хвилі, які перемішують океан.
9. Зрозуміємо, що рушійною силою для течій в океані є різниця густини і вітер.
10. Змоделюємо термохалінну циркуляцію, яка виникає завдяки різниці густини.
11. Змоделюємо Гольфстрім та дізнаємося, чи може він зупинитися.
12. Подивимось, як вітер впливає на океанічну циркуляцію.
13. Відтворимо циркуляцію Екмана.
14. Зрозуміємо механізми утворення Великої тихоокеанської плями.
15. Відтворимо стовпчики Тейлора.
16. Зрозуміємо, чому в полярних регіонах більш холодна вода утримується над підводними горами, де внаслідок цього уповільнюється танення льоду.

3.1. Глобальна кліматична система. Відмінність фізичних властивостей океану та атмосфери

Термін «глобальна кліматична система» охоплює комплексну систему взаємопов'язаних складників, які разом формують кліматичні умови на Землі. Основні компоненти цієї системи включають:

Атмосферу — повітряну оболонку Землі, яка є джерелом поглинання і випромінювання енергії, формує погодні умови і кліматичні патерни. Вона взаємодіє з іншими складниками системи, передаючи тепло і вологу.

Гідросферу, тобто всі води Землі, як поверхневі (океани, моря, ріки, озера), так і підземні. Гідросфера впливає на клімат через процеси випаровування, конденсації і транспортування тепла, їй належить ключова роль у формуванні океанічних течій і циркуляцій.

Кріосферу, яка охоплює всі заморожені частини Землі, такі як льодовики, полярні шапки і сніг. Кріосфера регулює кліматичні умови завдяки альбедо (відбивальній здатності), а також впливає на рівень світового океану.

Літосферу — тверду частину Землі, а саме кору і верхній шар мантії. Літосфера безпосередньо впливає на клімат через вулканічну діяльність, виверження, ерозію і геологічні процеси, які змінюють склад атмосфери і впливають на рівень вуглекислого газу.

Біосферу, яка охоплює всі живі організми на Землі та їхні взаємодії з навколишнім середовищем. Біосфера відіграє важливу роль у поглинанні і викиді газів, як-от вуглекислий газ і метан, а також у процесах фотосинтезу і дихання, що безпосередньо впливають на кліматичні умови.

Ці компоненти глобальної кліматичної системи взаємодіють між собою через складні прямі і зворотні зв'язки. Наприклад, зміни в температурі океанів можуть впливати на атмо-

суферні умови, що, своєю чергою, змінює кліматичні умови на суші. Також зміни в біомасі можуть вплинути на рівень вуглекислого газу в атмосфері, що змінює температуру планети.

Кожен із цих складників системи має унікальні фізичні властивості, які визначають їхню роль у кліматичній системі. Наприклад, атмосфера має різний склад газів і температурний режим на різних висотах, гідросфера містить величезні резервуари тепла, а кріосфера має високе альбедо, що впливає на поглинання сонячної радіації. Це створює динамічну і змінну систему, в якій кожна частина впливає на інші, формуючи загальний клімат планети.

До прикладу, об'єм атмосфери, що містить 99,8 % її маси, обмежується висотою до 60 км і дорівнює $3,82 \times 10^{12}$ км³. Маса повітря в цьому об'ємі становить $5,26 \times 10^{18}$ кг. Океан має об'єм $1,335 \times 10^9$ км³ і масу $1,3 \times 10^{21}$ кг. Таким чином, маса океану в 275 разів більша за масу атмосфери, а його об'єм менший за об'єм атмосфери майже в 279 разів. Вода має приблизно в 4 рази більшу питому теплоємність, ніж повітря, а теплопровідність повітря приблизно у 20 разів менша, аніж теплопровідність води. Отже, океан є гарним акумулятором сонячної енергії, значна частина якої передається потім в атмосферу у вигляді потоків прихованого та явного тепла. Крім того, чинники океанічної циркуляції відрізняються від атмосферних. Атмосфера значною мірою прозора для сонячного випромінювання, тому нагрівається переважно знизу, тоді як океан обмінюється теплом з атмосферою через свою поверхню. Важливою відмінністю є те, що вітри керують циркуляцією верхніх шарів океану, а в атмосфері такого механізму немає.

Океан і атмосфера по-різному поведуться як рідини, що обертаються: вода майже нестислива, що суттєво змінює її термодинаміку порівняно з повітрям. Також океан обмежений материками, тоді як атмосфера вільно циркулює навколо всієї планети.

Океан відіграє ключову роль у глобальній кліматичній системі завдяки своїй здатності накопичувати і зберігати значну кількість тепла протягом тривалого часу. Ця характеристика робить океан важливим регулятором клімату Землі, особливо в межах сезонних та міжсезонних змін, а також на довгостроковій основі, що може тривати століттями. Він поглинає значну частину сонячної радіації, що досягає Землі, і повільно віддає це тепло, впливаючи на температурний режим атмосфери. Цей процес допомагає згладжувати кліматичні коливання, запобігаючи різким змінам температури та регулюючи кліматичні умови на планеті. Крім того, океанічні течії переносять тепло з одних частин світу в інші, що також має велике значення для клімату. На відміну від океану, атмосфера має значно меншу теплоємність, що означає, що вона швидше реагує на зміни температури і не здатна зберігати тепло так довго, як океан. Це створює різницю в швидкості, з якою різні компоненти кліматичної системи можуть змінюватися.

Для демонстрації різниці в теплоємності океану та атмосфери можна провести дослід із повітряними кульками [4]. Наприклад, заповнивши кульки водою і надувши їх, ви зможете спостерігати, як різні об'єми і температури води впливають на їхній теплообмін. Це допоможе краще зрозуміти, чому океан так ефективно зберігає і передає тепло в атмосферу і як ці процеси взаємодіють для підтримки глобального клімату.

Демонстрація 1.

Порівняння теплоємності води та повітря

Мета: порівняння теплоємності води та повітря.

Обладнання: повітряні кулі, свічки, вода.

Хід демонстрації.

Підготовка до демонстрації. Надувайте одну кульку повітрям до звичайного розміру. Іншу кульку заповніть водою,

залишаючи її частково надutoю, щоб вода могла вільно рухатися всередині.

Проведення демонстрації.

Запаліть свічку або розмістіть інше джерело нагрівання. Спочатку піднесіть кульку з повітрям до полум'я. Продовжуйте тримати її поблизу джерела тепла, поки не побачите, як вона лусне або почне деформуватися. Потім піднесіть кульку з водою до полум'я. Спостерігайте, як вона реагує на тепло. Ви помітите, що ця кулька не лускає і залишається цілою навіть після тривалого контакту з теплом.

Обговорення результатів.

Кулька з повітрям представляє спрощену модель земної атмосфери. Атмосфера, подібно до кульки з повітрям, швидко реагує на зміни температури: вона швидко нагрівається і охолоджується, що призводить до швидкого накопичення тепла і можливого розриву під впливом високих температур. Кулька з водою ілюструє властивості океану, який має вищу питому теплоємність. Це означає, що океан повільно поглинає і віддає тепло, забезпечуючи більш стійкий температурний режим. Як результат, кулька з водою залишається цілою навіть при тривалому нагріванні.

Висновки.

Цей простий експеримент наочно демонструє різницю між атмосферою і океаном у здатності зберігати тепло. Атмосфера (модель із повітрям) реагує на зміни температури швидше і може зазнати значних коливань температури, тоді як океан (модель з водою) має більшу здатність до накопичення та збереження тепла, що допомагає стабілізувати кліматичні умови на планеті. Розуміння цих властивостей важливе для вивчення кліматичних процесів і прогнозування змін клімату, оскільки океани й атмосфера взаємодіють, щоб підтримувати глобальну термодинамічну рівновагу.

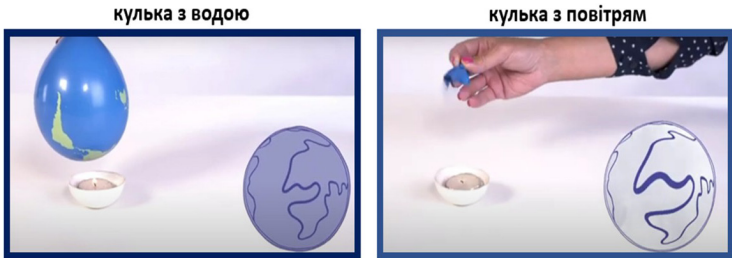


Рис. 3.1. Демонстрація порівняння теплоємності води і повітря

3.2. Характеристики світового океану і криосфери

Світовий океан покриває 70,8 % земної поверхні, має середню загальну глибину 3,7 км та масу близько $1,34 \times 10^{21}$ кг (0,022 % від маси Землі). Неперервність океану як водної маси забезпечується його безперервним рухом як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямку. В океані діє глобальний механізм перетворення енергії, спричинений нерівномірним нагріванням поверхні води й атмосфери сонцем.

Світовий океан дедалі активніше стає центром людської господарської діяльності, зокрема через розширення використання його біологічних і мінеральних ресурсів. Це призводить до виникнення нових екологічних проблем та поглиблення існуючих, серед яких ключовими є глобальні зміни в океанічних системах:

- 1) зумовлене змінами клімату підвищення рівня океану, що має значні наслідки для прибережних територій;
- 2) інтенсивна урбанізація прибережних зон океану: до кінця ХХІ століття приблизно дві третини населення Землі, ймовірно, проживатиме в межах 100-кілометрової берегової смуги, що збільшить антропогенний вплив на ці регіони.

Щоб зрозуміти, яку роль відіграє океан у глобальних кліматичних змінах, необхідно докладно вивчити його фізичні властивості та процеси, що в ньому відбуваються. Океан є неоднорідною системою, яка перебуває в постійному русі та перемішується по вертикалі, що суттєво впливає на його динаміку і властивості. У цьому розділі будуть описані фізичні характеристики океану, властивості морської води, глобальні патерни розподілу температури та солоності, а також процеси, які зумовлюють рух і перемішування водних мас. Ці знання є ключовими для розуміння складних взаємозв'язків між океаном і глобальним кліматом.

Історична довідка

Доказ того, що океани Землі взаємопов'язані, європейці отримали у 1522 році, коли іспанська каравела «Вікторія» повернулася з першого навколосвітнього плавання Фернана Магеллана. Примітивні карти течій для окремих частин океанів почали з'являтися приблизно із середини XVII століття, а у 1770 році Бенджамін Франклін створив першу карту, близьку до реального відображення течії Гольфстрім.

Однією з перших книг з океанографії була праця італійського вченого Луїджі Марсильї «Фізична історія моря», опублікована в Амстердамі 1725 року. Ми ще повернемося до експериментів, які проводив Марсильї, у наступних розділах. До кінця XVIII століття гідрографічні служби великих морських держав уже накопичили значну кількість інформації про вітри та течії на основних морських шляхах у вигляді записів у корабельних журналах.

У XIX столітті лейтенант американського флоту М. Ф. Морі зібрав та систематизував усі наявні матеріали спостережень течій. Результатом його роботи стала перша карта океан-

ських течій, опублікована у книзі «Фізична географія та метеорологія моря». За ініціатииви Морі в 1853 році була організована Морська міжнародна конференція, яка встановила єдину систему судових спостережень, невдовзі прийняту всіма зацікавленими країнами.

Одним із важливих стимулів для розвитку океанографії стало прокладення трансатлантичного телеграфного кабелю через дно Атлантичного океану у XIX–XX століттях. Значною подією була експедиція на вітрильно-паровому корветі «Челленджер», що тривала з 1872 по 1876 роки і принесла безліч відкриттів, які стали основою сучасної океанографії.

Протягом трьох з половиною років «Челленджер» подолав близько 130 000 км в Атлантичному, Індійському та Тихому океанах, здійснивши масштабне навколосвітнє плавання і провівши 362 океанографічні станції. Цей знаменний рейс довгі роки служив зразком комплексних морських наукових експедицій і вважається початком сучасної океанографії.

Таблиця 3.1. Характеристики Світового океану

Маса Світового океану	$1,3 \times 10^{21}$ кг
Площа поверхні Світового океану	$3,619 \times 10^{14}$ м ²
Об'єм Світового океану	$1,335 \times 10^{18}$ м ³
Середня глибина	3711 м
Найбільша глибина	11022 м
Середня температура	4 °C

3.3. Морська вода. Рівняння стану

Континенти та великі архіпелаги ділять Світовий океан на чотири основні частини: Атлантичний, Індійський, Тихий та Північний Льодовитий океани. Кожен із цих океанів має свої унікальні особливості та відіграє важливу роль у глобальній кліматичній системі, біологічному різноманітті та циркуляції океанічних течій. У 2000 році Міжнародна гідрографічна організація запропонувала виділити п'ятий океан — Південний океан, що оточує Антарктиду. Це рішення підкреслює важливість Південного океану в регулюванні клімату планети та його вплив на глобальну екосистему. На рис. 3.2 зображено вертикальний розріз уздовж (приблизно) 25° зх. д. через Атлантичний океан, що демонструє складність рельєфу дна. Об'єм Світового океану дорівнює $1,33 \times 10^{18} \text{ м}^3$, маса становить приблизно $1,3 \times 10^{21} \text{ кг}$, теплоємність у 1000 разів більша, ніж у атмосфери. Як уже зазначалось вище, це одна з причин, чому океан відіграє таку важливу роль у кліматі нашої планети.

На рис. 3.2, а, що показує вертикальний перетин Атлантичного океану, видно, що середня температура води становить приблизно 4 °С. Проте температура океанських вод суттєво змінюється з глибиною. У поверхневому 200-метровому шарі температура води значною мірою залежить від географічної широти: вона коливається від 2 °С в полярних зонах до 30 °С у тропіках. На глибинах понад 1000 м температурні зміни стають менш вираженими і температура водних мас стабільно не перевищує 5 °С. Ці температурні градієнти в океані впливають на циркуляцію водних мас, а також на розподіл тепла та солоності, що має вирішальне значення для глобальних кліматичних процесів.

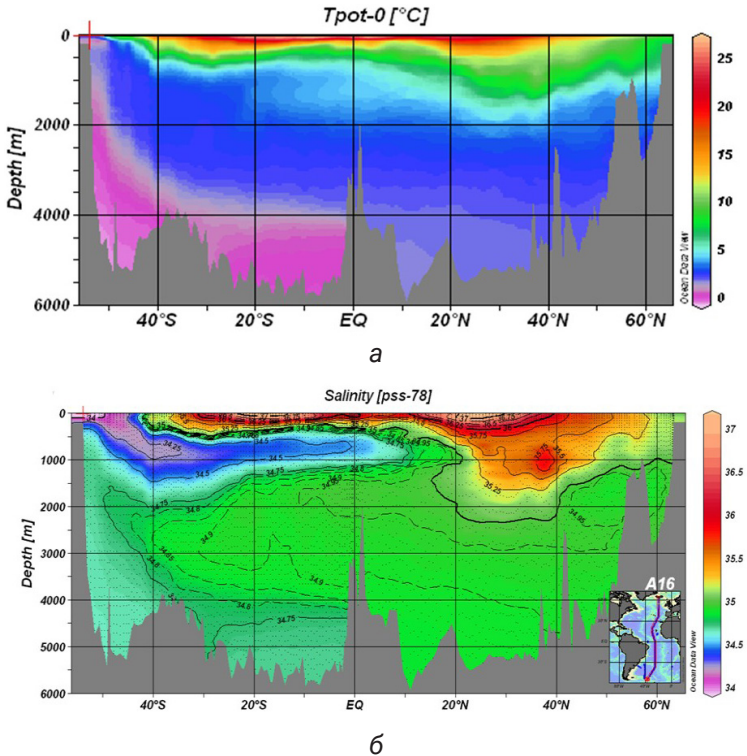


Рис. 3.2. Гідрографічний розріз уздовж (приблизно) 25° зх. д. через Атлантичний океан: а — температура (°C); б — солоність (PSU) (джерело: Ocean Data View)

Відносна частка розчинених у морській воді солей не сильно змінюється у просторі. Це тому, що солі значною мірою надходять при вимиванні материків, що є дуже повільним процесом порівняно зі швидкістю перемішування всього океану (100 000 років порівняно з 1000 років). Разом зі змінами солоності води визначаються зміни густини по вертикалі, які є функцією від солоності і температури, тобто:

$$\rho = \rho(S, T, p) = \rho_w \left[1 - \frac{p}{A + Bp + Cp^2} \right]^{-1}, \quad (3.1)$$

де S – солоність, T – температура, p – тиск, а A , B , C , ρ_w – деякі функції від температури T та солоності S . Це рівняння називають **рівнянням стану**.

Солоність – сумарний вміст усіх твердих розчинених речовин (близько 85 % яких є хлорид натрію), що містяться в 1 кг морської води, виражений у грамах. Солоність вимірюється в проміле, або одиницях PSU (Practical Salinity Units). Визначити густину за заданою температурою, солоністю та тиском [14] можна за допомогою онлайн-калькуляторів, як, наприклад:

UNESCO equation of state



Морська вода зазвичай має солоність близько 34,5, тобто в одному кілограмі морської води міститься приблизно 34,5 г розчинених солей. Солоність може дещо змінюватися залежно від регіону та умов, але загалом цей показник залишається відносно стабільним. Густина морської води, на відміну від повітря, варіюється в океані лише на кілька відсотків, але навіть ці незначні зміни відіграють ключову роль у динаміці океану. Зміни густини спричинені варіаціями температури та солоності води, що, своєю чергою, впливає на океанічні течії та вертикальні переміщення водних мас. Наприклад, тепла, менш щільна, вода має тенденцію підніматися, тоді як холодна, більш щільна, вода опускається на глибину. Ці процеси призводять до формування термохалінної циркуляції, яка є важливим складником глобальної кліматичної системи.

Крім того, морська вода майже нестислива, тобто навіть при значних змінах тиску на великих глибинах її об'єм залишається майже незмінним. Це забезпечує стабільність фі-

зичних характеристик води в різних умовах і сприяє передбачуваності процесів, що відбуваються в океані. Саме через ці особливості солоність і густина морської води є критично важливими параметрами, які визначають поведінку океану і його вплив на глобальну кліматичну систему.

Ось деякі важливі властивості океанічної води.

1. Солоніша вода має більшу густину, ніж прісна; тепла вода (майже завжди) має меншу густину, ніж холодна вода.

2. *Аномалія густини води.* Прісна вода (солоність = 0) має максимальну густину при температурі близько 4 °C (див. рис. 3.3), тому прісна вода, яка є холоднішою за цю, має меншу густину. Для глобального клімату Землі велике значення має те, що вода є аномальною рідиною: вона розширюється при замерзанні і це призводить до того, що лід має меншу щільність, ніж вода, і плаває на її поверхні. Якби вода мала стандартні властивості рідини і стискалася при замерзанні, то лід опустився би на дно, повністю заповнивши значні ділянки океану.

3. У Світовому океані температура зазвичай впливає на густину більше, ніж солоність.

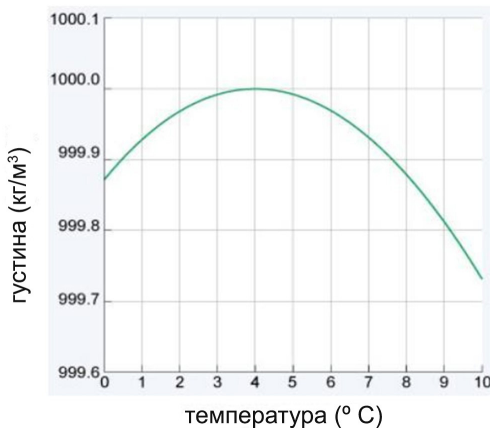


Рис. 3.3. Залежність густини прісної води від температури

Розгляньмо два різних процеси переносу речовин і енергії, що відрізняються за механізмом і умовами, в яких вони відбуваються, — дифузію і конвекцію.

Дифузія — це процес взаємного проникнення молекул або атомів однієї речовини поміж молекул або атомів іншої, що зазвичай приводить до вирівнювання їх концентрацій у всьому займаному об'ємі.

Конвекція — це процес переносу тепла або маси за рахунок руху рідини або газу, що викликаний різницею температур або густини.

Обидва процеси (дифузія і конвекція) можуть взаємодіяти й доповнювати один одного.

Дифузія відбувається через випадковий рух частинок, тоді як конвекція викликана великим масштабом руху рідини або газу через різницю температур або густини.

Розгляньмо два шари води, чітко розділені на межі. Верхній шар тепліший і солоніший, а нижній холодніший і менш солоний. На перший погляд, така система може здаватися стабільною. Однак через те, що тепло дифундує швидше за сіль, на межі між двома шарами виникає тонкий холодний і солоний шар, який буде мати більшу густину, ніж холодний менш солоний шар води внизу. Цей щільний шар води починає занурюватися в менш щільний нижній шар. Через те, що шар досить тонкий, вода буде занурюватися у формі вузьких вертикальних струменів, діаметром близько одного сантиметра. Ці струмені відомі як «соляні пальці», а явище називається подвійною дифузійною конвекцією.

Хоча «соляні пальці» здаються незначними через малий розмір, їхня роль у вертикальному перемішуванні океанських вод є суттєвою. Це постійний процес, який за тривалий час сприяє значним змінам в океані. Подвійна дифузійна конвекція, зокрема утворення «соляних пальців», може бути одним із ключових механізмів, що впливають на вертикальне перемішування на великих океанічних просторах.

Для дослідження температурної конвекції потрібний безрозмірний критерій, який називається *число Релея*, що визначає поведінку рідини під впливом градієнта температури.

$$Ra = \frac{L^3 g \beta \Delta T}{\nu a}, \quad (3.2)$$

де g — прискорення вільного падіння, L — характерна довжина, ΔT — характерна різниця температур, ν — кінематична в'язкість рідини, a — коефіцієнт температурної дифузії, β — температурний коефіцієнт об'ємного розширення рідини. Якщо число Релея перевищує певне критичне значення (теоретичні оцінки показують, що нестійкий стан рідини настає при Ra приблизно 660–700), рівновага рідини стає нестійкою і виникають конвективні потоки. Для виникнення конвекції необхідно, щоб перепад температури, що у формулі (3.2), існував деякий час. Якщо цей перепад буде дуже малим, то поле густини не зможе перебудуватися і конвективне перемішування не розвинеться. Проведемо дослід, у якому продемонструємо феномен подвійної дифузійної конвекції.



Дослід 8. Дослідження подвійної дифузійної конвекції рідини

Метою досліду є відтворення феномену подвійної дифузійної конвекції.

Обладнання: плаский вертикальний резервуар, барвники, сіль, лід, губка.

Перед проведенням лабораторного досліду запропонуйте учням ознайомитися з матеріалами з додатка 2 і сформулювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, під час якого учні зможуть поділитися своїми прогнозами.

Експериментальна процедура

Дослід 8.1: Теплова дифузія

Підготовка води. Наповніть резервуар до половини холодною водою та додайте кілька кубиків льоду.

Охолодження. Зачекайте 10 хвилин, щоб вода в резервуарі охолола до температури льоду.

Додавання гарячої води. Підфарбуйте склянку гарячої води за допомогою барвника. Акуратно вилийте гарячу воду на губку, яка розташована на поверхні холодної води.

Спостереження. Слідкуйте за розміщенням шару теплої води і за тим, як вона поступово дифундує у холодну воду.

Дослід 8.2: Дифузія солі

Підготовка резервуара. Наповніть резервуар до половини прісною водою.

Додавання солоної води. Підфарбуйте склянку солоної води за допомогою барвника. Акуратно вилийте цю солону воду на губку, розташовану на поверхні прісної води.

Спостереження. Спостерігайте за розташуванням шару солоної води, як вона занурюється у резервуар.

Дослід 8.3: Подвійна дифузія

Підготовка резервуара. Наповніть резервуар до половини прісною водою.

Додавання солоної та теплої води. Підфарбуйте склянку теплої і трохи солоної води за допомогою барвника. Акуратно вилийте її на губку, розташовану на поверхні прісної води.

Спостереження. Слідкуйте за поведінкою верхнього шару теплої солоної води. Зверніть увагу на те, як процеси теплової і сольової дифузії взаємодіють і як це впливає на рух рідини в резервуарі.

Альтернативний варіант. Якщо немає можливості провести експеримент, скористайтесь QR-кодом.

Аналіз отриманих даних

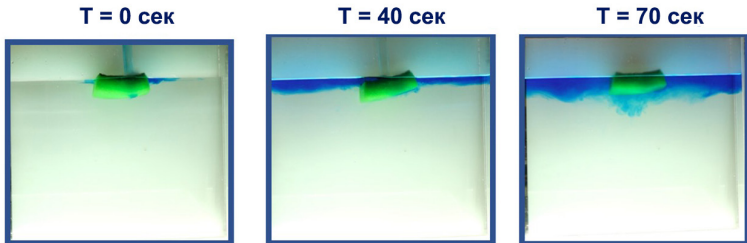


Рис. 3.4. Результати дослідів 8.1

Дослід 8.1. У цьому експерименті спостерігається стійка температурна стратифікація. Гаряча фарбована вода утворює верхній шар, що плаває над холоднішою нефарбованою водою в нижньому шарі. Такий розподіл температури призводить до формування чіткого термоклина — поверхні розділу між теплим і холодним шарами.

Якщо до системи внести певні збурення, наприклад легкими рухами води або зміщенням резервуара, на термоклині починають генеруватися внутрішні хвилі. Ці хвилі виникають через різницю в густині між теплим і холодним шарами води та добре помітні на рис. 3.4 при $t = 70$ секунд. Такий феномен внутрішніх хвиль демонструє, як енергія передається через межі різних температурних шарів, що має важливе значення в океанографії та атмосферних процесах.

В експерименті важливо звернути увагу на те, що характер і амплітуда цих внутрішніх хвиль можуть змінюватися залежно від сили і частоти збурень, що дає змогу вивчати різні аспекти теплової дифузії та її вплив на поведінку рідин.

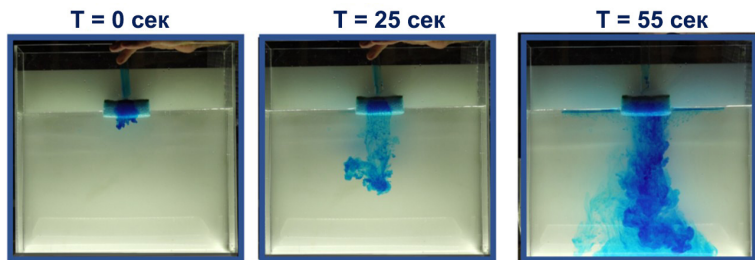


Рис. 3.5. Результати дослід 8.2.

Дослід 8.2. Конвекція солі

Фарбована солоня вода, маючи більшу густину, одразу занурюється на дно резервуара. Відтак починає розтікатися по дну, утворюючи шар із підвищеною концентрацією солі. Цей процес призводить до стійкої стратифікації за солоністю. Шар, де відбувається різкий перехід у солоністі, називається пікнокліном. Така стратифікація важлива для розуміння процесів, що відбуваються в океанах, де подібні шари можуть суттєво впливати на циркуляцію води та її властивості.

Дослід 8.3. Подвійна дифузійна конвекція тепла і солі

Експеримент із подвійною дифузійною конвекцією, що включає одночасний вплив тепла і солі, спочатку виглядає схожим на перший дослід із тепловою дифузією. На початку спостерігається звичайна стратифікація: тепла солоня вода утворює верхній шар. З часом у системі відбувається цікавий процес — утворення так званих соляних пальців. Невеликі об'єми теплої солоні води починають поступово опускатися вниз у холоднішу та пріснішу частину резервуара.

Це відбувається тому, що температура у цих об'ємах знижується швидше через теплообмін, ніж концентрація солі зменшується внаслідок дифузії. В результаті «соляні пальці» продовжують занурюватися, що створює унікальну фор-

му змішування і перерозподілу тепла та солоності у воді. Такий феномен подвійної дифузійної конвекції має важливе значення в природних умовах, особливо в океанічних системах, де він впливає на вертикальну циркуляцію водних мас і формування кліматичних умов.

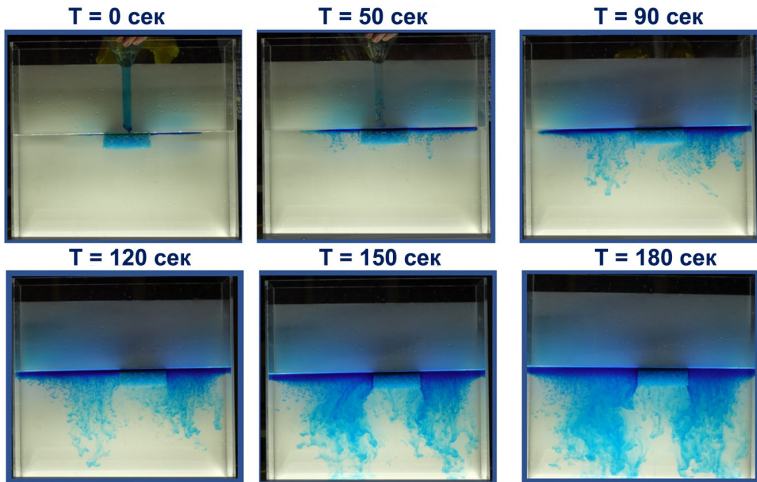


Рис. 3.6. Результати дослід з подвійною дифузійною конвекцією

Обговорення дослідів. Обговоріть гіпотези, які були сформульовані учнями перед дослідом. У групах обговоріть важливість явища «соляних пальців» і подвійної дифузійної конвекції для океанічних систем. Ці процеси сприяють підйому поживних речовин з глибин океану до поверхні, що є критично важливим для підтримки морської флори та фауни. Під час обговорення зверніть увагу на те, що «соляні пальці» сприяють вертикальному переміщенню води, тепла та солі, що, своєю чергою, впливає на циркуляцію океанічних течій. Цей процес впливає на клімат, оскільки перенесення тепла та солі з глибин до поверхні океану може впливати на глобальні погодні системи та океанічні течії. Крім того, він

важливий для біологічного кругообігу в океанах, оскільки сприяє доставці поживних речовин, необхідних для розвитку морських екосистем. Розуміння цих процесів дає можливість краще прогнозувати зміни клімату та вдосконалювати моделі, що описують динаміку океанів, а це критично важливо для боротьби зі зміною клімату та збереження біорізноманіття океанів.

3.4. Зростання рівня океану. Теплове розширення

Згідно з даними Національного управління океанічних і атмосферних досліджень (NOAA), з 1880 року середній глобальний рівень моря піднявся на 21–24 сантиметри. Цей підйом не є лінійним: швидкість глобального підвищення рівня моря прискорюється. Протягом більшої частини XX століття рівень моря зростав із середньою швидкістю 1,4 міліметра на рік, однак з 2006 по 2015 рік цей показник зріс до 3,6 міліметра на рік, що свідчить про суттєве прискорення процесу. Навіть якщо глобальне потепління вдасться стабілізувати, процеси, що вже були запущені в кліматичній системі, й надалі впливатимуть на рівень моря протягом кількох наступних століть. Це пов'язано з тривалим глибоководним потеплінням океану і таненням льодовикових покривів. Ці фактори сприятимуть збереженню високого рівня моря ще протягом тисячі років.

Прогнози щодо підвищення рівня моря на довготривалу перспективу варіюються залежно від того, наскільки ефективно вдасться обмежити глобальне потепління. Якщо потепління буде обмежено до 1,5 °C, наступні 2000 років глобальний середній рівень моря може піднятися приблизно на 2–3 метри. Якщо ж потепління буде обмежено до 2 °C, цей підйом може становити 2–6 метрів.

Такий сценарій підвищення рівня моря матиме значний вплив на прибережні зони, що призведе до затоплення низинних територій, ерозії узбережжя, загрози для інфраструктури та населених пунктів. Для оцінки цих ризиків використовуються карти затоплення, які є важливим інструментом для управління ризиками повеней.



(<https://www.floodmap.net>)

Такі карти допомагають оцінити потенційний вплив підвищення рівня моря на конкретні регіони та планувати заходи з адаптації та мінімізації наслідків, як-от захист берегових ліній, будівництво захисних дамб та розробка планів евакуації.

Отже, підняття рівня океану зумовлене двома чинниками, пов'язаними з глобальним потеплінням:

- 1) термальним розширенням морської води завдяки її нагріванню;
- 2) припливом води внаслідок танення крижаних покривів і льодовиків.

Розглянемо спершу термальне розширення, а про танення крижаних покривів йтиметься у наступному розділі.

Теплове розширення — це зміна лінійних розмірів та форми тіла, яке відбувається при зміні його температури. Ця властивість характерна для всіх речовин. При нагріванні речовини її частинки починають інтенсивніше рухатися, що призводить до збільшення середніх відстаней між ними. На цьому принципі зміни об'єму рідини (ртуті або спирту) працює більшість термометрів. Але, як уже зазначалося вище, є і відхилення від цього правила, і це стосується води, яка в діапазоні від 0 °C до 4 °C зменшує свій об'єм.

Ідею теплового розширення (об'єм речовини змінюється пропорційно до кількості наявного матеріалу та зміни температури) можна виразити математично:

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T, \quad (3.3)$$

де ΔV – зміна об'єму, ΔT – зміна температури, V_0 – початковий об'єм, β – коефіцієнт об'ємного теплового розширення (розмірність K^{-1}).



Дослід 9. Дослідження теплового розширення води

Мета досліді – отримати графічну залежність коефіцієнта об'ємного розширення води від температури та дослідити поведінку води на ділянці аномального розширення.

Обладнання. Тригорла сферична колба об'ємом 0,5 л, корки з отворами, цифровий термометр, одноразовий шприц, піпетки об'ємом 5 мл та 1 мл, мірний циліндр, пластикова посудина, магнітний перемішувач, штатив, лід, кухонна сіль, ємність для змішування.

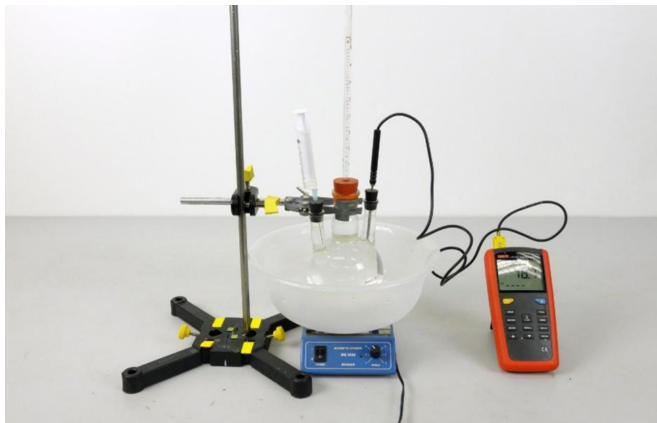


Рис. 3.7. Експериментальна установка для дослідження теплового розширення води

Перед проведенням лабораторного досліджу запропонуйте учням ознайомитися з матеріалами з додатка 2 і сформулювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, під час якого учні зможуть поділитися своїми прогнозами.

Експериментальна процедура

Підготовка установки.

Зберіть експериментальну установку відповідно до зображення на рис. 3.7. Переконайтеся, що всі компоненти налаштовані правильно, а колба міцно закріплена.

Закріпіть піпетку об'ємом 5 мл у корку, пересвідчившись, що вона тримається надійно і що немає щілин, які можуть вплинути на точність вимірювань. Наповніть тригорлу колбу дистильованою водою, стежачи за тим, щоб не залишалося бульбашок повітря під корком. Це важливо для забезпечення точних вимірювань об'єму води. Заповніть колбу водою і зафіксуйте точний об'єм води, що вмістився в колбу. Наприклад, у нашому випадку цей об'єм становив 675 мл. Занотуйте це значення в таблиці 1.

Підготовка до вимірювань. Помістіть колбу в пластикову посудину, яка буде використовуватися для контролю температури води. Закріпіть колбу таким чином, щоб вона залишалася нерухомою протягом експерименту.

Підключення температурного датчика. Підключіть температурний датчик до цифрового термометра, увімкніть його та виміряйте початкову температуру води. Це значення буде відправною точкою для ваших спостережень.

Занесення даних. Заповніть колонку таблиці 1 значеннями температури від 0 °C до виміряного вами значення з кроком у 1 °C.

Початок експерименту. Увімкніть перемішувач і перевірте, чи буде обертатися якір, щоб забезпечити рівномірне перемішування води під час експерименту. Це допоможе підтримувати стабільну температуру всередині колби.

Встановлення початкового рівня. Використовуючи шприц, встановіть рівень стовпчика води в піпетці на позначці 5 мл. Це значення буде початковим для подальших вимірювань.

Приготування охолоджувальної суміші. В окремій посудині змішайте кухонну сіль з льодом у співвідношенні масорієнтовно 1:15. Ця суміш дасть можливість поступово охолоджувати воду в колбі до необхідної температури.

Охолодження води. Заповніть простір у пластиковій посудині навколо колби отриманою сумішшю та увімкніть перемішувач, щоб рівномірно розподілити охолодження.

Фіксація даних. Спостерігайте за зміною рівня води в піпетці з кроком в 1 °C та занотуйте ці значення до таблиці 1. Це дасть можливість отримати графічну залежність коефіцієнта об'ємного розширення від температури.

Дослідження аномального розширення. Для спостереження аномального розширення води повторіть попередні кроки, замінивши піпетку об'ємом 5 мл на піпетку об'ємом 1 мл. Початкова температура води для досліду має становити 6–7 °C. Початковий рівень води доберіть за допомогою шприца навпроти найвищої поділки на піпетці. Занотуйте отримані значення до таблиці 2.

Альтернативний варіант. Якщо немає можливості провести експеримент, скористайтеся QR-кодом.

Аналіз отриманих даних. Після завершення експерименту побудуйте графік залежності коефіцієнта об'ємного розширення води від температури. Зверніть увагу на ділянку аномального розширення в інтервалі температур близько 4 °C. Це явище є ключовим для розуміння поведінки води і може бути пояснене на молекулярному рівні. Порівняйте отримані результати з теоретичними даними та зробіть висновки щодо специфіки поведінки води в цих умовах.

Аналіз отриманих даних**Таблиця 1**

V (мл)	T (°C)	$V_{\text{піпет}}$ (мл)	ΔV (мл)	β ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
	0			
	1			
	2			
	3			
	...			

У таблиці 1 розрахуйте за допомогою інструментів математичних таблиць значення коефіцієнта об'ємного розширення β для всіх сусідніх пар значень температури. Побудуйте графічну залежність коефіцієнта об'ємного розширення від температури.

Таблиця 2

T (°C)	$V_{\text{піпет}}$ (мл)
0	
1	
2	
3	
...	

За даними таблиці 2 побудуйте графічну залежність об'єму води в піпетці об'ємом 1 мл від температури.

Застосуйте формулу (3.3) із знайденим коефіцієнтом об'ємного теплового розширення β до прогнозів щодо підняття рівня океану і порахуйте підняття рівня океану для різних сценаріїв потепління.

$\Delta T (^{\circ}\text{C})$	$\Delta V (\text{м}^3)$	Підняття рівня океану (м)
0,2		
0,3		
1		
2		

Обговорення після досліду. Обговоріть гіпотези, які були сформульовані учнями перед дослідом.

3.5. Кріосфера та її компоненти. Танення морських та континентальних льодовиків

Кріосфера — це одна з найважливіших частин глобальної кліматичної системи, що охоплює всі замерзлі водні ресурси планети. Її назва походить від грецького слова *kryos*, що означає *мороз* або *холод*. У кріосфері зосереджені величезні обсяги прісної води, які перебувають у вигляді льодовикових покривів, льодовиків, морського льоду, снігу та вічної мерзлоти. Вона охоплює майже 2 % усієї води на Землі та містить приблизно 80 % світових запасів прісної води. Кріосфера виконує кілька життєво важливих функцій. Льодові покриви та сніг мають високе альbedo, тобто здатність відбивати сонячне світло, що допомагає підтримувати низькі температури та стабілізує клімат Землі. Морський лід діє як природний «ковпак» на поверхні океанів, регулюючи теплообмін між океаном і атмосферою, а також впливає на циркуляцію океанічних течій. Розуміння ролі кожного компонента кріосфери та їх змін у відповідь на глобальне потепління є ключовим для прогнозування майбутнього клімату планети. Танення льодовикових покривів та підвищення

рівня моря — лише частина тих процесів, які впливають на стабільність кліматичної системи. У цьому розділі ми детально розглянемо основні елементи кріосфери, їхню роль у підтримці кліматичної рівноваги та вплив на навколишнє середовище. Кріосфера включає в себе різні компоненти.

Льодовикові щити — величезні масиви льоду, що покривають великі території суші, площею понад 50 000 квадратних кілометрів. Льодовикові щити знаходяться в Антарктиді та Гренландії і містять більшу частину прісної води планети. Вони є настільки важкими, що спричиняють деформацію земної кори.

Льодовикові покриви — великі масиви льоду, розташовані на суші, але менші за льодовикові щити. Вони трапляються у гірських районах, таких як Альпи, Гімалаї, Анди, і забезпечують довготривале зберігання прісної води, що поступово надходить до річок та озер.

Морський лід — лід, що утворюється на поверхні океанів і морів у полярних регіонах. Він буває сезонним (тане і замерзає щороку) або багаторічним (зберігається понад один рік). Морський лід має важливе значення для регулювання теплообміну між океаном і атмосферою, збереження солоності та стабілізації полярного клімату.

Сніг — замерзла вода, що накопичується на поверхні суші внаслідок снігопадів. Сніг може зберігатися протягом кількох сезонів, особливо у високогірних районах та полярних регіонах, а також значно впливає на альбедо поверхні, відбиваючи сонячне світло.

Вічна мерзлота (пермафрост) — це постійно мерзла земля або гірська порода з температурою нижче 0 °C, зазвичай закута в лід. Вона може існувати від декількох років до сотень тисяч років. У відповідь на потепління атмосфери температура вічної мерзлоти зростає в Арктиці та гірських регіонах. Якщо температура вічної мерзлоти перевищує 0 °C, земля відтає. Це має два наслідки:

- ґрунт стає нестійким, що може призвести до руйнування будівель та доріг в Арктиці або до зсувів ґрунту у гірських регіонах;

- при розмерзанні відбувається розпад органічної речовини, що міститься у вічній мерзлоті, таким чином вивільняються парникові гази (CO_2 і метан) і потенційно навіть віруси та бактерії.

Кількість парникових газів, що вивільняються з вічної мерзлоти, у XXI столітті залежатиме від рівня глобального потепління. За прогнозами, викиди можуть становити десятки або навіть сотні гігатонн.

Альпійські льодовики — льодовики, що утворюються у високогірних районах. Вони менші за континентальні льодовики, але є важливими джерелами прісної води для гірських екосистем і мешканців гірських регіонів.

Танення льодових мас, особливо в полярних регіонах, є критичним процесом, який впливає на підвищення рівня моря. Танення льодовиків у Гренландії та Західній Антарктиді викликає серйозне занепокоєння вчених через потенційно швидке зростання рівня океану. Оскільки ці процеси відбуваються на значних площах та охоплюють величезні об'єми льоду, навіть незначні зміни температури можуть мати серйозні наслідки для глобальної системи клімату. У зимовий період моря втрачали б значну кількість тепла, якби не льодовий покрив, що слугує ефективним тепловим бар'єром. Льодовий покрив захищає поверхневі води від подальшого охолодження та запобігає втратам тепла. Влітку ж він виконує протилежну функцію, зменшуючи надмірне нагрівання морських вод, завдяки чому температура води залишається стабільнішою. Таким чином, морський лід відіграє критичну роль у регулюванні теплових процесів в океанах, впливаючи на кліматичну систему планети.

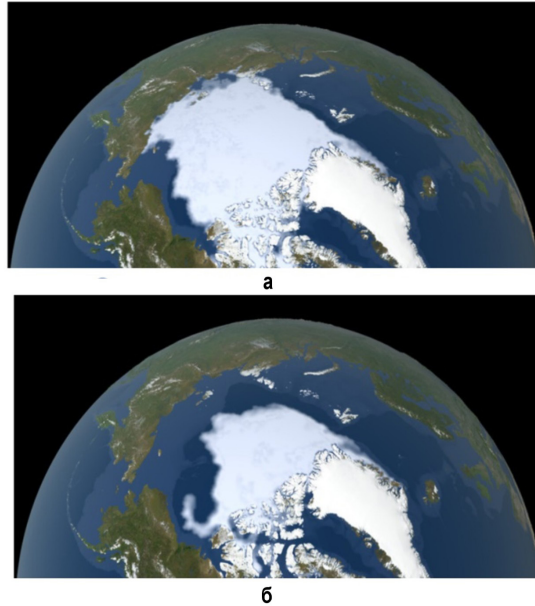


Рис. 3.8. Супутникові спостереження льодового покриву:
а) 1979 рік; б) 2022 рік
(із сайту <https://www.nasa.gov/>)

Гляціологія та кліматичний архів планети

Гляціологія — це наука, яка досліджує льодовики, їхнє походження, розвиток, склад, будову, фізичні властивості та взаємодію з навколишнім середовищем. Перші систематичні дослідження в цій галузі розпочав швейцарський учений Орас Соссюр у своїй праці «Подорож до Альп» (1779–1796). Попри важливість наукових питань, знань про льодовики було недостатньо, методи дослідження залишалися примітивними, а фізичні характеристики льоду не були належно вивчені.

Справжній прорив у гляціології стався на початку ХХ століття завдяки розвитку методів вивчення крижаних кернів — зразків льоду, добутих із льодовикових свердловин.

Ці керни є неоціненним архівом кліматичної історії Землі, що дає можливість, дослідивши зміни складу льоду, вмісту вуглекислого газу, метану, пилу та інших компонентів, отримати інформацію про минулі кліматичні умови на планеті. Завдяки крижаним кернам науковці можуть відтворити історію температурних коливань, оцінити вплив активності Сонця та вулканів, а також вивчити рівень парникових газів протягом сотень тисяч років.

Вміст крижаних кернів дає можливість відстежувати навіть незначні зміни клімату, що сприяє розумінню довгострокових тенденцій і відтворенню історії розвитку нашої цивілізації під впливом природних умов. Наприклад, дослідження показали, що впродовж льодовикових періодів концентрація вуглекислого газу в атмосфері збільшувалася разом із потеплінням, проте темпи її підвищення були значно повільнішими, ніж зараз. Сьогодні рівень CO_2 підвищується значно швидше, що є серйозною загрозою для кліматичної стабільності планети: якщо в доіндустріальний період збільшення концентрації на 10 ppm могло тривати століття, то тепер це може статися лише за 4–5 років.

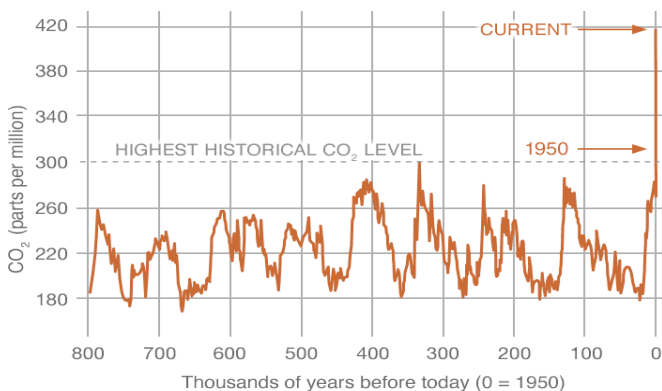


Рис. 3.9. Вміст CO_2 за даними крижаних кернів
(Data source: Reconstruction from ice cores. Credit: NOAA)

Ці дослідження надають важливу інформацію для розроблення моделей майбутніх кліматичних змін, що допомагає передбачити їхній вплив на біологічні системи, економіку та суспільство. Гляціологія стає важливим інструментом не тільки для вивчення минулого, а й для захисту майбутнього — розуміння кліматичної спадщини, збереженої в льодовиках, дає змогу вчасно реагувати на сучасні екологічні виклики та ухвалювати науково обґрунтовані рішення для сталого розвитку нашої планети.

Гіпотеза про нестабільність морського льодовикового покриву (Marine ice sheet instability, MISI)

Нестабільність морського льодовикового покриву, або гіпотеза MISI (Marine Ice Sheet Instability), — це наукова концепція, яка пояснює механізм прискореного танення льодовиків у деяких регіонах Антарктики та інших полярних зонах. Хоча наразі внесок Антарктиди в підвищення рівня моря є незначним порівняно з іншими чинниками, існує велика невизначеність через можливу нестабільність Західно-Антарктичного льодовикового щита. Наукові дослідження вказують на ймовірну нестабільність морського льодовикового покриву в цьому регіоні.

MISI пов'язана з процесами, що відбуваються в місцях, де льодовиковий покрив взаємодіє з океаном, особливо з так званими *шельфовими льодовиками*, які являють собою великі маси льоду, що є продовженням льодовикового щита і простягаються від суші до океану, утворюючи плавучий лід на його шельфі.

Ключовим елементом гіпотези є *лінія основи* (див. рис. 3.10), або межа між частиною льодовика, що лежить на суші, і його плавучою частиною. За теорією MISI, через проникнення тепліших циркумполярних глибинних вод під шельфовий льодовик відбувається його танення знизу, лінія основи починає зміщуватися вглиб континенту. Це зменшує опору

льодовикового покриву, даючи льодовикам змогу рухатися до океану швидше. Так само відбувається нагрівання поверхні від атмосферного повітря. Це подвійне джерело тепла робить їх особливо вразливими до впливу глобального потепління. Рух льоду над береговою лінією суттєво залежить від його товщини: більша товщина зумовлює інтенсивніший рух льоду та формування айсбергів. Цей процес є позитивним зворотним зв'язком і триває до досягнення нового стабільного стану. Особливо вразливою є Західна Антарктида, яка вже зазнає інтенсивного танення під впливом теплих циркумполярних глибинних вод, що може прискорити танення Західно-Антарктичного льодовикового щита й спричинити глобальне підвищення рівня моря на кілька метрів.

Через цей процес льодовик починає втрачати масу швидше, що призводить до прискореного утворення айсбергів і танення льодовика. Гіпотеза MISI передбачає, що цей процес може продовжуватися і навіть прискорюватися, оскільки танення збільшує потік льоду в океан. Ця позитивна зворотна реакція може значно підвищити рівень Світового океану, якщо стабільність льодовикового покриву буде порушена на великих площах, як, наприклад, у Західній Антарктиці. Згідно з аналізом у разі його повного танення рівень Світового океану може піднятися приблизно на 60 метрів.

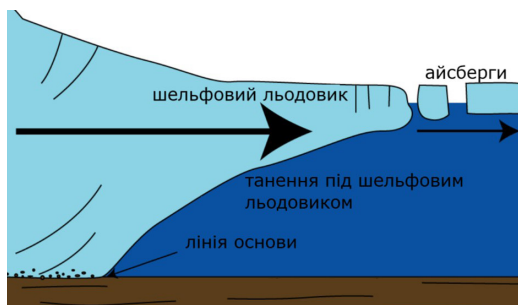


Рис. 3.10. Спрощена схема, яка пояснює, що таке лінія основи
(www.AntarcticGlaciers.org)

Розуміння механізмів, які стоять за нестабільністю морського льодовикового покриву, є надзвичайно важливим для прогнозування майбутніх змін клімату та їхнього впливу на глобальний рівень моря. Це питання залишається предметом інтенсивних наукових досліджень, які допомагають краще передбачити можливі сценарії розвитку подій в умовах змін клімату. Прогнози підняття рівня Світового океану порівняно з 1900 роком за гіпотетичним сценарієм, що враховує гіпотезу втрати стабільності льодовикового покриву, зображено на рис. 3.11.

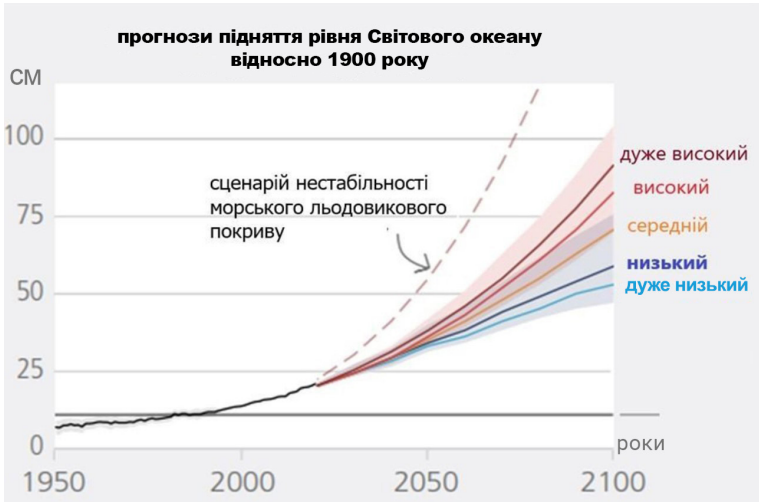


Рис. 3.11. Прогнозовані зміни глобального рівня Світового океану порівняно з 1900 роком (IPCC)

Питання про вплив континентальних та плавучих льодовиків на підвищення рівня Світового океану є важливим для розуміння того, які наслідки матиме танення льоду для глобального клімату і прибережних екосистем.

Чи однаковий вплив на підвищення рівня моря мають континентальні та плавучі льодовики?

Льодовики, що тануть на континентах, додають воду до океану, підвищуючи його рівень. Але чи збільшать масу та об'єм океану льодовики, які вже плавають у воді?

Для цього нам потрібно згадати закон Архімеда, який пояснює поведінку тіла, частково зануреного в рідину. Закон дає нам вагу витісненої рідини, яка знаходиться за формулою:

$$P = \rho g V, \quad (3.4)$$

де g — прискорення вільного падіння, ρ — густина рідини (газу), V — витіснений об'єм.

Як закон Архімеда пояснює вплив танення морських льодовиків на рівень океану? Чи зміниться рівень води, якщо розтане лід, що вже плаває в океані?

Можна висунути різні гіпотези. Але щоб їх перевірити, проведемо досліди.



Дослід 10. Вплив танення льоду на зміну рівня океану: наземний і морський лід

Мета — дослідити зміну рівня води в посудині для випадку танення льоду, що вільно плаває у воді, та для випадку танення «на суходолі».

Обладнання: дві ємності із вставками «суходолу», однакові кубики льоду.

Перед проведенням лабораторного дослідження запропонуйте учням ознайомитися з матеріалами з додатка 2 і сформулювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, під час якого учні зможуть поділитися своїми прогнозами.

Експериментальна процедура

Підготовка. У дві однакові посудини помістіть вставки, що імітують суходіл. Вставки мають бути ідентичними за розміром і формою (рис. 3.12, а).

Розміщення льоду. В одній посудині помістіть кубики льоду на вставку, яка імітує суходіл. У другій посудині розмістіть кубики льоду на поверхні води так, щоб вони плавали (рис. 3.12, б).

Додавання води. Додайте воду в обидві посудини так, щоб рівень води був однаковим і льодові кубики в другій посудині плавали на поверхні води (рис. 3.12, в).

Танення льоду. Залиште посудини в спокійному місці до повного танення льоду в обох випадках. Після того як весь лід розтане, зафіксуйте рівень води в кожній посудині.

Альтернативний варіант. Якщо немає можливості провести експеримент, скористайтеся QR-кодом.

Аналіз отриманих даних.

Порівняння рівнів води. Після повного танення льоду порівняйте рівень води в обох посудинах.

Пояснення результатів

Танення льоду на поверхні води. Лід, що плаває, займає певний об'єм води. Коли він тоне, вода заміщає об'єм льоду, що перебуває у воді, і загальний рівень води не змінюється. Це пов'язано із законом Архімеда. Тобто витіснений об'єм рідини дорівнює об'єму зануреного у воду тіла.

Танення льоду на суходолі. Лід, розташований на суходолі, не взаємодіє безпосередньо з водою в момент танення. При таненні льоду, розміщеного на суходолі, вода, що утворюється, не заміщує об'єм льоду, а просто додається до води, що вже є в посудині. Тому рівень води в такій посудині, ймовірно, підвищиться.

Висновок. Рівень води в посудині з льодом, що плаває, залишиться незмінним після танення льоду, тоді як у посудині

ні з льодом «на суходолі» рівень води підвищиться, оскільки лід, розтанувши, додасть нову воду до посудини (рис. 3.12, г).

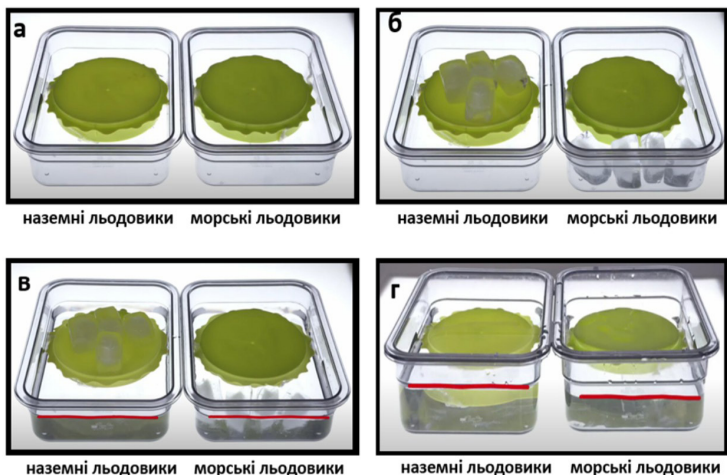


Рис. 3.12. Результат дослідіу про танення морського та наземного льоду

Обговорення після дослідіу. Обговоріть гіпотези, які були сформульовані учнями перед дослідіом. Зрозуміло, що лід, який плаває у морі (та лотку), згідно із законом Архімеда витісняє стільки води, скільки важить. Тому за його танення рівень води не підніметься.

Обговоріть можливі варіації експерименту, наприклад, як вплинуть різні типи льоду або зміна температури на результат. Також можна дослідіти, як на результати вплинуть інші чинники, як-от наявність інших частинок або домішок у воді.

Підсумуйте, як ці експерименти і результати допомагають зрозуміти вплив льодових покривів на рівень води в різних умовах і як це пов'язано з реальними екологічними та кліматичними змінами, зокрема таненням льодовиків в умовах глобального потепління.

Дослід 11. Швидкість танення льоду у морській і прісній воді

Метою дослідів є порівняння швидкості танення льоду в прісній і солоній воді.

Обладнання: дві склянки, сіль, лід, харчовий барвник.

Перед проведенням лабораторного дослідів запропонуйте учням ознайомитися з матеріалами з додатка 2 і сформулювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, під час якого учні зможуть поділитися своїми прогнозами.

Експериментальна процедура

Підготовка льоду. Підготуйте два однакові шматки льоду. Щоб полегшити спостереження, можна використовувати зафарбований лід.

Приготування розчинів. Наповніть одну склянку водою кімнатної температури. Другу склянку також наповніть водою кімнатної температури, але додайте в неї сіль і добре розмішайте, щоб утворився насичений розчин.

Поміщення льоду. Помістіть по одному шматку льоду в кожен зі склянок.

Спостереження. Спостерігайте за процесом танення льоду в кожній склянці.

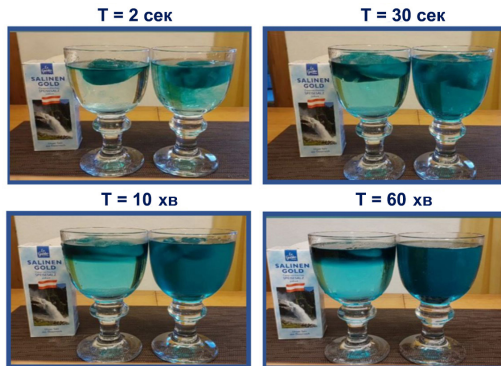


Рис. 3.13. Результати дослідів із танення льоду у солоній та прісній воді

Аналіз отриманих даних

Як бачимо, лід швидше розтанув у прісній воді. Але це була не очевидна гіпотеза. При обговоренні могли бути висловлені ідеї щодо того, що сіль має прискорити танення (посипають же сіллю ожеледицю!). Якщо маєте термометр або тепловізор, то зафіксуйте температуру в обох склянках.

На рис. 3.14 зображено схему процесу танення льоду у прісній воді. При цьому холодна прісна фарбована вода з крижаного кубика занурюється на дно і створює циркуляцію. Вода стає перемішаною та однорідною, і крижаний кубик оточений водою температури, яка є лише холоднішою, аніж та, що була у склянці.

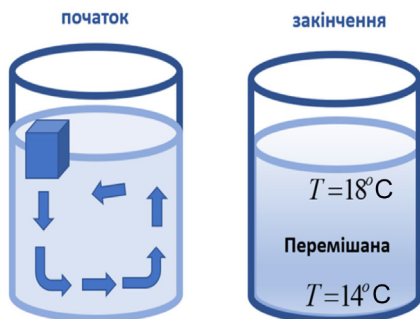


Рис. 3.14. Схематичне зображення дослідів танення льоду у прісній воді

На рис. 3.15 зображено процес танення льоду у солоній воді. При цьому холодна прісна фарбована вода з крижаного кубика, яка є легшою за солону воду, розтікається по поверхні та не занурюється на глибину. Таким чином, вода навколо крижини — це холодна вода. Тому в холодній воді крижина тоне повільніше.

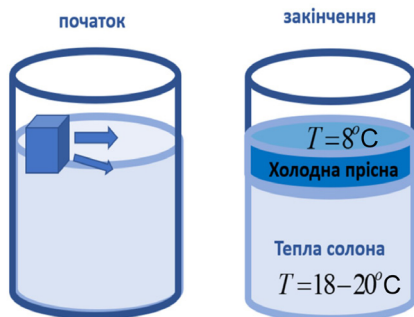


Рис. 3.15. Схематичне зображення дослідження танення льоду у солоній воді

Обговорення після дослідів. Обговоріть гіпотези, які були сформульовані учнями перед дослідом. Обговорюючи результати експерименту, важливо врахувати кілька ключових аспектів. Основна ідея цього експерименту полягає в тому, що солоня вода має більшу густину порівняно з прісною. Під час танення льоду, який плаває в солоній воді, утворюється шар прісної холодної води, який розташовується поверх солоні води. Це явище чітко видно в експерименті.

Результати у солоній воді. Коли лід тоне у солоній воді, утворюється прісна холодна вода, яка, маючи меншу густину, піднімається на поверхню. Солоня вода при цьому зберігає свій рівень під прісною водою. Це відображає ситуацію, що спостерігається у північних фіордах та інших полярних регіонах, де танення льодовиків також призводить до утворення прісних водяних мас поверх солоні води. Лід, що перебуває у солоній воді, тоне в середовищі, де температура навколишньої води залишається відносно стабільною завдяки формуванню цього шару. Внаслідок цього танення може тривати довше, ніж у прісній воді, де рівень температури може варіюватися.

Результати у прісній воді. Коли лід тане у прісній воді, холодна вода, що утворюється, занурюється на дно склянки, створюючи циркуляцію. Це призводить до перемішування води і забезпечує однорідний розподіл температури і кольору в склянці. Отже, в експерименті спостерігається, що прісна вода швидше досягає стану, в якому вся рідина має однакову температуру і колір, завдяки ефекту перемішування.

Висновки

Вплив густини. Густина солоної води є вищою, що дає змогу створювати прісний водяний шар над солоною водою. Це може уповільнити процес танення льоду, оскільки тепло розподіляється менш ефективно порівняно із прісною водою.

Циркуляція води. У прісній воді спостерігається швидше танення льоду завдяки активній циркуляції, яка забезпечується зануренням холодної води на дно і перемішуванням води. Це призводить до однорідного розподілу температури та швидшого танення льоду.

Природні аналогії. Експеримент ілюструє процеси, що відбуваються в природі, зокрема в північних фіордах та інших льодовикових регіонах, де танення льодовиків і взаємодія між прісною і солоною водою впливають на морську циркуляцію та клімат.

Подальші дослідження

Для глибшого розуміння цього явища можна розглянути вплив інших чинників, таких як температура води, концентрація солі або наявність інших хімічних додатків, що можуть вплинути на швидкість танення льоду. Важливо також дослідити, як ці процеси впливають на екологічні системи та характеристики клімату в реальних природних умовах.

3.6. Роль полярних регіонів у змінах клімату

Полярні регіони відіграють критично важливу роль у стабілізації глобальної кліматичної системи. Арктика і Антарктика є ключовими областями, де відбувається інтенсивне охолодження планети, що має глобальні наслідки для клімату. Полярні регіони отримують мінімум сонячної енергії через їхнє географічне положення, що зумовлює низькі температури і замерзання води. Цей процес охолодження важливий для підтримки температурного балансу Землі. Крижаний покрив Арктики і Антарктики не лише охолоджує атмосферу, а й відіграє роль у формуванні глобальних погодних умов. Льодовики і морський лід у полярних регіонах функціонують як відбивачі сонячної радіації. Лід має високе альbedo, тобто він відбиває велику частину сонячної енергії назад у космос. Це знижує поглинання тепла і допомагає підтримувати низькі температури в цих регіонах. Як наслідок, полярні регіони підтримують глобальний температурний баланс і запобігають надмірному нагріву планети. Клімат у полярних регіонах є прикладом системи з позитивним зворотним зв'язком (підрозділ 2.6). Коли лід тане через підвищення температури, зменшується альbedo і більше сонячної енергії поглинається океаном або сушею, що сприяє подальшому потеплінню і подальшому таненню льоду. Цей процес може призвести до прискореного підвищення температури і зменшення льодового покриву. Полярні регіони впливають на глобальні атмосферні й океанічні течії. Через різницю температури та тиску між теплими і холодними зонами формуються атмосферні течії, які переносять тепле повітря і океанські течії з тропіків до полярних регіонів. Ці потоки допомагають перенести тепло з екватора до полюсів, де воно охолоджується і повертається назад до тропіків у вигляді льодових мас, які плавають у океані.

Сучасні дослідження полярних регіонів

Полярні регіони є одними з найбільш вразливих до змін клімату, тому їх дослідження в сучасному світі набуває особливого значення. Яскравим прикладом таких досліджень є міжнародний проєкт *PolarRES* [27], втілюваний за підтримки найбільшої програми Європейського Союзу з фінансування науки та інновацій «Горизонт 2020», у межах якого вчені, зокрема, моделюють різні сценарії кліматичних змін для Арктики та Антарктики. Проєкт використовує новітні комп'ютерні кліматичні моделі для створення сценаріїв, що дають можливість прогнозувати майбутній стан клімату в полярних регіонах і оцінювати вплив змін клімату на льодовики, морський лід, біорізноманіття та екосистеми океанів. *PolarRES* є прикладом того, як міжнародні наукові команди працюють над створенням інструментів для глибшого розуміння та точнішого прогнозування кліматичних процесів у полярних регіонах, а також для підготовки до майбутніх викликів. Українські дослідники також роблять свій внесок у дослідження Антарктики. На антарктичній станції «Академік Вернадський», розташованій на острові Галіндез, українські вчені проводять дослідницьку діяльність, зокрема й у межах проєкту *PolarRES*. Ця станція є центром для українських досліджень, що охоплюють як кліматичні зміни, так і вивчення місцевих екосистем, зокрема морської біоти та льодових процесів.

Наведемо приклади напрямів досліджень проєкту *PolarRES* та питань, на які вчені шукають відповіді.

1. Як зміни клімату впливають на ліси?

У межах проєкту *PolarRES* створюються прогнози майбутніх умов для лісів та щодо підготовки до можливих екологічних і соціальних проблем. Через потепління клімату лісові пожежі в північних лісах стають частішими. Ці ліси, які є одними з найбільших на планеті, нагріваються швидше за інші місця, що подовжує сезон пожеж і висушує рослини.

Це сприяє росту нової, більш легкозаймистої рослинності, тобто утворенню більшої кількості палива для вогню.

Науковці в проєкті *PolarRES* досліджують, як клімат вплине на кількість і силу пожеж. Вчені розглядають два сценарії. *Сильне потепління* — підвищена небезпека пожеж через спеку і посухи. *Помірне потепління* — більше опадів, які можуть зменшити ризик пожеж.

2. Як потепління змінює життя в Арктиці?

Зміни клімату загрожують морським екосистемам Арктики, які важливі для природи, клімату, рибальства та життя місцевих народів. Танення морського льоду змінює середовище існування білих ведмедів, нарвалів і китів — вони змушені шукати нові місця для життя. Рибальство стає непередбачуваним, бо через потепління багато риб змінюють місця перебування. Зменшення кількості морського льоду може навіть мати позитивні наслідки — влітку у воду потрапляє більше сонячного світла, що збільшує ріст фітопланктону, а це корисно для морських харчових ланцюгів. Вчені моделюють, як клімат змінюватиметься до 2100 року, щоб зрозуміти, які наслідки це матиме для Арктики.

3. Чи є загроза радіоактивного забруднення?

Сценарії, спрогнозовані в межах проєкту *PolarRES*, моделюють, що відбуватиметься з радіоактивними речовинами в Карському морі під час змін клімату. У 1957–1963 роках у льодовиках Арктики накопилися радіоактивні речовини через ядерні випробування на архіпелазі Нова Земля. Танення льоду може вивільнити ці небезпечні речовини у воду, що загрожуватиме морським тваринам і людям, які займаються рибальством у цих районах.

Танення льоду в Арктиці та Антарктиці

Антарктида і Арктика являють собою два радикально різні середовища, що суттєво впливає на поведінку льоду в кожному з регіонів.

Антарктида — континент, повністю оточений океаном. Великий обсяг льоду тут зосереджено на суші у вигляді величезного льодовикового щита, що покриває континент. Льодовики Антарктики є основним компонентом глобальної системи льодових покривів, і їх танення має значний вплив на підвищення рівня світового океану. Зокрема, максимальний льодовий покрив в Антарктиці досягає рекордно високих значень у зимовий період, частково завдяки сезонному розширенню морського льоду в навколишньому океані.

Арктика, з іншого боку, є океаном, що оточений сушею. Тут більшість льодових утворень — морський лід, який плаває на поверхні океану. Протягом останніх десятиліть ми спостерігаємо значне зменшення площі арктичного морського льоду. Зменшення льодовикового покриву в Арктиці відбувається швидше, ніж зростання льодовикового покриву в Антарктиці. Це зменшення морського льоду в Арктиці є результатом глобального потепління і підвищення температури океану, що безпосередньо впливає на товщину та площу льодовикового покриву.

Основні чинники, що впливають на танення льоду в обох регіонах

Підвищення температури океану. В Арктиці океанічні води зазнають більш безпосереднього впливу підвищення температури, що призводить до танення морського льоду. Натомість у Антарктиці більшість льоду розташована на суші, і хоча танення льоду відбувається, воно менш помітне порівняно з арктичними умовами.

Різниця в альбедо. Арктичний морський лід має високе альбедо, тобто відбиває значну частину сонячної радіації. Проте, коли лід тоне, він відкриває темніші океанські поверхні, які поглинають більше сонячної енергії, сприяючи подальшому потеплінню і таненню льоду. В Антарктиці аль-

бедо льодовикового щита зберігається більш стабільним завдяки великій площі льоду і снігу.

Вплив океанічних течій. В Арктиці океанічні течії і вітри можуть зумовлювати перенесення теплих водних мас, що впливає на танення морського льоду. В Антарктиці основним джерелом тепла для льодовиків є теплі океанські течії, що рухаються під льодовиковим шельфом, впливаючи на їхню стабільність.

Сезонні коливання. В Арктиці спостерігається більше сезонних коливань площі морського льоду, що робить його чутливішим до змін клімату. Антарктика має менші сезонні коливання, але загальне танення льодовиків, особливо в західній частині, відбувається через підвищення температури води під льодовиковими шельфами.

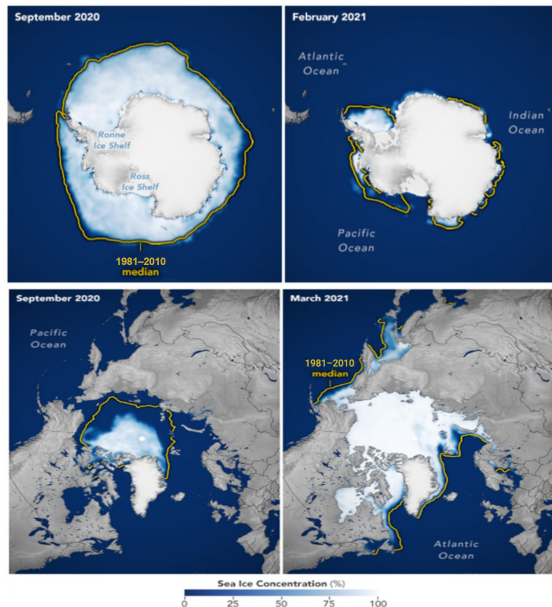


Рис. 3.16. Зміна льодового покриття в Антарктиці (взимку і влітку)
та Арктиці (взимку і влітку)
(<https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/sea-ice-antarctic>)

В результаті глобального потепління лід в Антарктиді тоне із середньою швидкістю близько 150 мільярдів тонн на рік, а Гренландія втрачає приблизно 270 мільярдів тонн на рік, що сприяє підвищенню рівня моря.

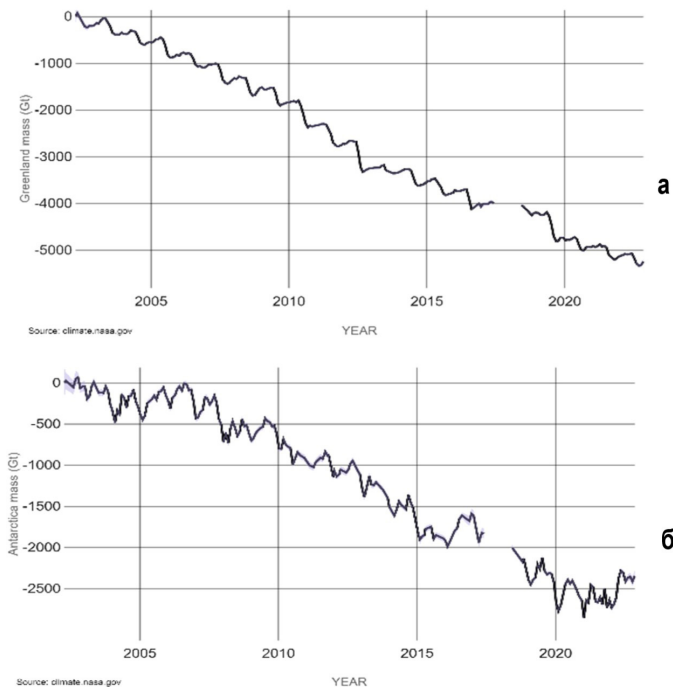


Рис. 3.17. Втрата маси льодових покривів із 2002 року: а) Гренландії; б) Антарктики (<https://climate.nasa.gov/vital-signs/ice-sheets/>)

Чому Арктика швидше нагрівається?

Глобальне потепління спричиняє зростання середньої температури на Землі, але цей процес відбувається з різною швидкістю в різних регіонах. У розділі 2.1 (рис. 2.2) ми вже зауважували про той факт, що Арктика буде нагріватися

швидше, ніж інші регіони Землі, що є прикладом явища, яке називають арктичним посиленням. Дані NASA за 2022 рік (рис. 3.18) показують, що, хоча глобальна температура з 2000 по 2009 роки зросла на 0,6 °C порівняно з періодом 1951–1980 років, в Арктиці середня температура піднялася на 2 °C. Це значне відхилення має кілька ключових причин.

Однією з основних причин швидшого потепління Арктики є втрата морського льоду. Коли світлий морський лід тане, він поступається місцем темнішому океану, який поглинає більше сонячної енергії, ніж відбиває її назад у космос. Це зменшення відбивної здатності, або альбедо, посилює нагрівання, оскільки темніша океанічна поверхня поглинає більше тепла від Сонця, ніж світла поверхня льоду. Чим менше альбедо, тим більше тепла накопичується в океані, що сприяє подальшому таненню льоду і посилює загальне потепління.

Зменшення льодового покриву впливає не лише на літній сезон, коли альбедо зменшується через відкриті водні площі, а й на зимову тепловіддачу. Відсутність льодового покриву в зимові місяці дає можливість океану віддавати більше тепла в атмосферу, підвищуючи температуру повітря над Арктикою. Це створює позитивний зворотний зв'язок: чим більше льоду тане, тим більше тепла повертається в атмосферу, що додатково нагріває регіон і пришвидшує процес танення.

Крім того, підвищення температури в Арктиці сприяє таненню вічної мерзлоти, яка містить величезні запаси органічної речовини. Коли мерзлота розтає, органічні речовини розкладаються, виділяючи вуглекислий газ і метан — потужні парникові гази. Це посилює парниковий ефект і додатково впливає на клімат, сприяючи ще більшому нагріванню Арктики та пришвидшенню танення льодового покриву.

Проект *PolarRES* вивчає ці та інші процеси, використовуючи кліматичні моделі, щоб зрозуміти, як саме кліматичні

зміни впливають на Арктику і які наслідки це має для навколишнього середовища та людства. Використовуючи підхід «сторілайн», *PolarRES* розробляє різні сценарії майбутніх змін в Арктиці, щоб надати науковцям та суспільству інструменти для оцінки ризиків, пов'язаних із глобальним потеплінням.

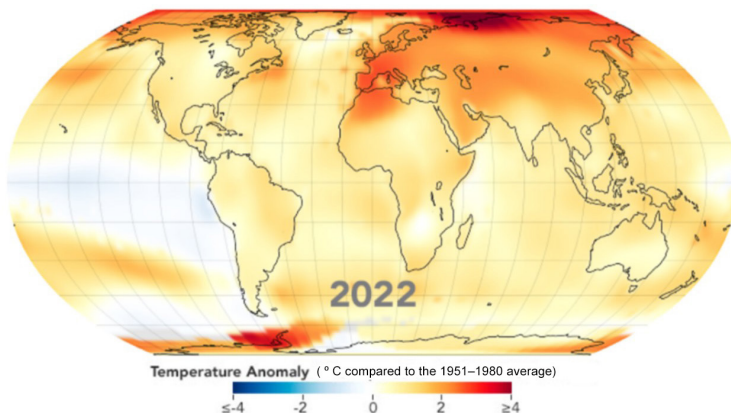


Рис. 3.18. Відхилення середньої температури у 2022 році від середньої температури у 1951–1980 роках (із сайту <https://www.nasa.gov/>).

Таким чином, швидше потепління Арктики та зменшення площі льодовикового покриву мають значний вплив на кліматичну систему Землі. Це викликає інтерес до вивчення процесів танення льоду, оскільки швидкість танення залежить від багатьох чинників, зокрема від того, де саме лід розташований — на суші чи у воді. Щоб краще зрозуміти ці процеси і їхній вплив на глобальний рівень моря, проведемо наступний дослід, у якому порівняємо швидкість танення льоду на суші та у воді.



Дослід 12. Швидкість танення льоду на суші та у воді

Метою дослідів є спостереження за швидкістю танення льоду, що вільно плаває у воді, та танення на «суходолі».

Обладнання: дві ємності із вставками, які імітують сухо-діл, однакові кубики льоду, годинник, термометр. (Далі повторення дослідів 11.)

Перед проведенням лабораторного дослідів запропонуйте учням ознайомитися з матеріалами з додатка 2 і сформулювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, щоб учні поділилися своїми прогнозами.



Рис. 3.19. Дослідження швидкості танення льоду на суші та у воді

Додавання води. Додайте в обидві посудини воду кімнатної температури так, щоб її рівень був однаковим і льодові кубики в другій посудині плавали на поверхні (рис. 3.19).

Танення льоду. Залиште посудини в спокійному місці до повного танення льоду в обох випадках. Зафіксуйте, в якій посудині лід розтанув швидше.

Аналіз отриманих даних

Якщо температура повітря і води однакова, лід тоне швидше у воді. Це явище можна пояснити кількома основними

чинниками: 1) молекули води перебувають ближче одна до одної порівняно з молекулами повітря, що забезпечує більший контакт із льодом, а отже, ефективнішу передачу тепла від води до льоду; 2) вода має більшу теплоємність, ніж повітря, що означає, що вона може поглинати більше тепла без значних змін температури. Це дає воді можливість забезпечити більш інтенсивний процес танення льоду.

Обговорення досліду. Обговоріть гіпотези, які були сформульовані учнями перед проведенням досліду.

3.7. Вертикальна структура водних мас океану. Термоклин

З досліду 11 (про швидкість танення льоду у морській і прісній воді) ми бачимо, що над солоною водою, яка має більшу густину, утворився шар прісної води, яка має меншу густину. Як уже зазначалося раніше, густина морської води залежить як від температури, так і від солоності. Шар рідини, який розділяє теплу і холодну воду, називають *термоклин*ом. Шар між більш та менш солоною водою називають *галоклин*ом. Коли ж ідеться про різницю в густині, це — *підклин*ом. Моряки-підводники називають його рідким ґрунтом, оскільки підводний човен при потраплянні в цей шар може перебувати на глибині без ходу. Біля полюсів різниця густин по вертикалі (тобто стратифікація) в океані виникає внаслідок танення льодовиків. *Фрітьоф Нансен* під час подорожі на дослідницькому судні «Фрам» («Вперед») так описує стратифіковану воду: «Вода, взята з поверхні, була придатна навіть для того, щоб пити, а вода, що надходила через кінгстон, була занадто солона навіть для котла».

На поверхні океану є чітко визначений перемішаний шар, що перебуває у прямому контакті з атмосферою. Саме в цьому шарі відбувається інтенсивне перемішування, причиною

якого є вітри та конвекція. Ці чинники дуже впливають на оцінки та передбачення нагрівання поверхні океану і його закислення, що спричиняється зростанням CO_2 в атмосфері. Глибина цього перемішаного шару, змінюючись залежно від широти та пори року, як правило, дорівнює 50–100 м. Термоклин відіграє важливу роль у фізиці водойм та впливає на їхні екосистеми. Він перешкоджає вертикальному водообміну та призводить до дефіциту мінеральних речовин у поверхневих шарах води. У водоймі стратифікація може бути багатшаровою та мати не один термоклин, а декілька. Але головний термоклин — це такий, що відділяє приповерхневий перемішаний прогрітий шар води від нижчих більш холодних шарів.

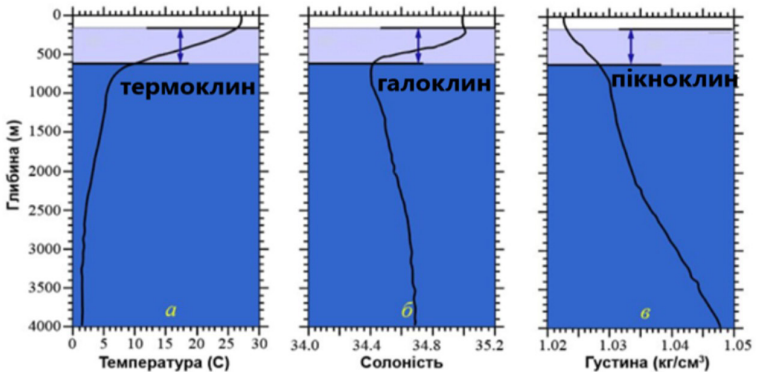


Рис. 3.20. Стратифікація води: а) за температурою; б) за солоністю; в) за густиною

Те, що рідина в океанах та морях має шарувату структуру, було продемонстровано італійським ученим *Луїджі-Фернандо Марсильї* (1658–1730). Італійський учений зробив спробу вимірювання температури води на різних глибинах та визначення густини, хімічного складу і властивостей морської води.



Рис. 3.21. Малюнки з трактату Марсильї [22]

До цих вимірювань Марсильї спонукала таємниця, яка була пов'язана з протокою Босфор, що з'єднує Чорне та Мармурове моря. Рибалки стверджували, що існує подвійна течія: на поверхні вода йде з Чорного моря в Мармурове, а на глибині — у протилежному напрямку. І коли Марсильї перебував у Константинополі у 1697 році, він вирішив все перевірити власноруч. Він виконав дослід за допомогою відерця, що було занурене у Босфор на глибину із човна. В результаті це відерце почало дивовижним чином буксувати човен проти потужної поверхневої течії. Марсильї дійшов висновку, що буксування човна проти поверхневої течії було спричинене різницею в густинах у верхньому та нижньому шарах. Він порахував, що вода з Чорного моря на 29,25 гра на (0,0648 г) легша за воду із Середземного, а різниця між верхнім та нижнім шарами у Босфорі становить 10 гран. Задля того, щоб остаточно впевнитися в у своїй гіпотезі, Марсильї провів лабораторний експеримент. Він використовував резервуар, розділений вертикальною перегородкою на дві частини і заповнений фарбованими рідинами з різною густиною. В одній половині резервуара густина рідини була більша за рахунок доданої в резервуар солі. Після усунення вертикальної перегородки рух більш густої рідини відбувався в нижньому шарі, а рух легшої рідини — у поверхнево-

му шарі. Ми відтворимо цей дослід Марсильї для кращого розуміння, що ж відбувається як у протоках, так і в місцях, де стикаються водні маси з різною густиною, наприклад у гирлах річок, де прісна річкова вода стикається із солоною морською.



Дослід 13. Експеримент Марсильї

Ідею досліду взято з проєкту Массачусетського технологічного інституту *Weather in Tank* (<http://weathertank.mit.edu/links/projects/density-currents-introduction>).

Метою є відтворення експерименту Марсильї для дослідження і розуміння процесів, які впливають на течії в протоках. Цей експеримент ілюструє, як різниця в густині води на різних ділянках може спричинити виникнення течій, подібних до тих, які спостерігаються в природних протоках.

Обладнання: плаский вертикальний резервуар із пластикою вставкою, два однакових ареометри, харчовий барвник, сіль.

Перед проведенням лабораторного досліду запропонуйте учням ознайомитися з матеріалами з додатка 2 і сформулювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, щоб учні поділилися своїми прогнозами.

Експериментальна процедура

Підготовка пластикової вставки. Закрийте всі отвори на вставці за допомогою скотчу, щоб під час підготовки водні розчини не змішувалися.

Приготування соляного розчину. Наповніть вставку водою, змішайте її з сіллю та додайте харчовий барвник, щоб рідина була добре видимою. Цей розчин імітуватиме морську воду з більшою густиною.

Підготовка резервуара. Наповніть великий резервуар до половини звичайною водою, яка має нижчу порівняно із соляним розчином густину.

Встановлення вставки. Обережно розмістіть пластикову вставку з фарбованою водою у великому резервуарі, переконавшись, що вода у вставці не змішується з водою у резервуарі.

Розташування ареометрів. Помістіть однакові ареометри у вставку з фарбованою водою та у зовнішній резервуар, щоб фіксувати зміни густини та рівня води під час експерименту.

Запуск експерименту. Обережно відкрийте отвори на вставці, які раніше були закриті скотчем. Фарбована вода зможе переміщатися зі вставки у резервуар і змішуватиметься з водою меншої густини, утворюючи течію.

Спостереження. Спостерігайте за циркуляцією рідини між двома ємностями та змінами у зануренні ареометрів. Відмітьте, як змінюється рівень води і густина розчинів.

Альтернативний варіант. Якщо немає можливості провести експеримент, скористайтесь QR-кодом.

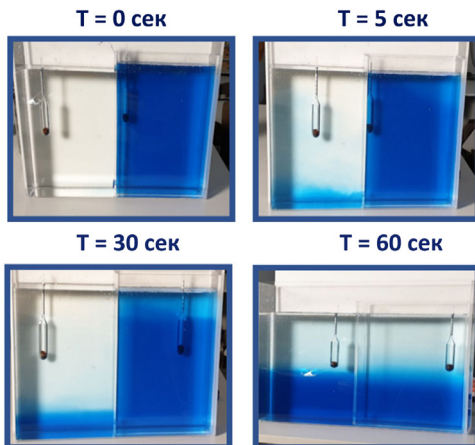


Рис. 3.22. Хід та результат експерименту Марсильї

Аналіз отриманих даних

У процесі експерименту бачимо, як більш солоні блакитна вода перетікає в нижньому шарі до іншої частини резервуара, а більш легка нефарбована вода перетікає у зворотному напрямку у приповерхневому шарі. Таким чином цей дослід повністю відтворив течію в протоці Босфор, як і міркував Марсильї. В експерименті ми використовували *ареометр* — прилад для вимірювання густини рідин і твердих тіл, принцип роботи якого ґрунтується на законі Архімеда.

Як і в попередньому досліді із таненням льоду в солоній воді, ми в результаті отримали стійку стратифікацію: солоні важка вода в нижньому шарі та легка прісна вода у верхньому.

У наступному розділі ми побачимо, що, як і на поверхні океану, так і в глибинах між шарами води різної густини виносять хвилі та шторми. І океан, який може здаватися спокійним на поверхні, водночас може приховувати потужні підводні бурі.

Обговорення після досліду. Обговоріть гіпотези, які були сформульовані учнями перед дослідом.

3.8. Внутрішні хвилі і перемішування океану

В експерименті Марсильї з двома рідинами різної густини були утворені чітко розділені шари. Коли в системі починається рух, на межі цих шарів утворюються хвилі, які видно завдяки використанню барвників. Подібний процес відбувається і в океані, де вода також має шарувату структуру через відмінності в температурі та солоності. Ці хвилі подібні до тих, що ми бачимо на поверхні океану. Вони називаються **внутрішніми хвилями**, адже поширюються не поверхнею, а всередині водної товщі, уздовж горизонтальних границь між шарами з різною густиною.

Такі хвилі є причиною явища, відомого морякам ще з давніх часів як «мертва вода». Це явище описав Пліній Старший у своїй праці «Природнича історія», де згадує про ситуацію, коли корабель, що рухався повільно, раптово зупинявся, ніби чиясь невидима рука тримала його знизу. «Мертва вода» виникає на пікнокліні, коли він розташований приблизно на глибині кіля судна. При цьому під час руху судна з невеликою швидкістю утворюються не лише видимі хвилі на поверхні, а і внутрішні хвилі на межі різних шарів води. Вітрильні судна під впливом «мертвої води» часто збивалися з курсу і втрачали керованість.

Першим задокументованим спостереженням лабораторного дослідження внутрішніх хвиль є лист Бенджаміна Франкліна від 1 грудня 1762 року. Під час перебування на Мадейрі Франклін використав склянку, наповнену водою та олією, для спостереження хвиль, і зауважив, що поверхня олії залишалася спокійною, тоді як вода під олією була в активному русі, утворюючи хаотичні хвилі.

Наукове дослідження ефекту «мертвої води» розпочалося після знаменитої полярної експедиції 1893–1896 років, під час якої Фрітьоф Нансен детально описав збурення на поверхні води при потраплянні судна в зону «мертвої води» в норвезьких фіордах і біля берегів Таймиру [14]. Нансен відзначив значне зменшення швидкості судна «Фрам» — з 6 до 1,5 вузлів, що зумовило початок серії експериментальних досліджень внутрішніх хвиль, які поглинають енергію руху судна. Ці дослідження були проведені океанологом Вагном Вальфрідом Екманом на початку XX століття. Екман зауважив: «Якщо прісна вода знаходиться над солоною, корабель не тільки викликає звичайні видимі хвилі на межі води і повітря, а й породжує невидимі хвилі на межі солоної та прісної води. Я припускаю, що величезний опір, який відчуває корабель, зумовлений роботою, витраченою на утворення цих невидимих хвиль».

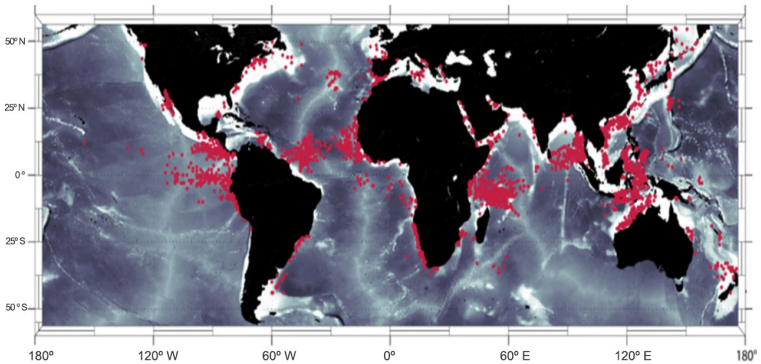


Рис. 3.23. Спостереження внутрішніх хвиль на супутникових зображеннях сонячних відблисків Modis (спектрорадіометр із зображенням середньої роздільної здатності) [17]

Внутрішні хвилі, що постійно генеруються припливами в Світовому океані, відіграють ключову роль у перемішуванні водних мас. Ці хвилі спостерігаються в багатьох регіонах Світового океану. Хоча вони слабо проявляються на поверхні, їх можна побачити на супутникових зображеннях у вигляді сонячних відблисків. За даними досліджень [17], було виявлено понад 3500 нелінійних внутрішніх хвиль (рис. 3.23).

Великі внутрішні хвилі в океанах утворюються головним чином внаслідок припливів, тоді як у замкнених морях та озерах — під впливом вітру. Оскільки різниця густини між двома шарами рідини незначна (порівняно з різницею густини між водою та повітрям), амплітуди внутрішніх хвиль значно більші за амплітуди поверхневих хвиль і можуть досягати сотень метрів. Наприклад, щоденно у водах між островом Тайвань та Філіппінами утворюється хвиля з амплітудою до двохсот метрів, яка протягом кількох днів рухається через Південно-Китайське море, а потім руйнується при підході до шельфової зони. Коли внутрішні

хвилі проходять через океан і руйнуються біля узбережжя, холодна вода з нижнього шару підіймається наверх, а тепліша вода з поверхневого шару занурюється вниз. Без внутрішніх хвиль розподіл температури та солоності в океані був би зовсім іншим – поверхневі води були б теплішими, а глибинні шари – холоднішими. Вивчення цих хвиль є важливим для розуміння майбутніх змін температури Світового океану.

У цьому дослідженні ми розглянемо стоячі внутрішні хвилі, відомі як сейші. Як уже зазначалося, вони зазвичай виникають в озерах або в замкнутих і напівзамкнутих морях під впливом вітру. Вивчення сейш є важливим для розуміння поведінки водних мас в таких умовах та їхнього впливу на кліматичні та екологічні процеси.

Спочатку наведемо теоретичні міркування. Розглянемо прямокутний басейн, що має довжину L та висоту H , заповнений двошаровою рідиною з глибинами шарів з різною густиною (ρ_1 та ρ_2) h_1 та h_2 відповідно. Якщо ми перехилимо цей басейн на невеликий кут, то межа між шарами зміститься і перестане бути горизонтальною. Нехай це відхилення дорівнює η_{0i} .



Рис. 3.24. Схема прямокутного лабораторного лотка з двошаровою стратифікацією

У випадку, коли відхилення η_{0i} маленьке, $\eta_{0i} < 0,1 h_1$, то зміну в часі лінії розділу між шарами h_1 та h_2 можна описати у вигляді суми ряду:

$$\eta_i(x) = -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{8\eta_{0i}}{(n\pi)^2} \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{c_{oi}\pi n x}{L}t\right), \quad (3.5)$$

де c_{oi} — це швидкість довгих внутрішніх хвиль, яка знаходиться за формулою:

$$c_{oi} = \sqrt{\frac{h_1 h_2}{H} \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} g}. \quad (3.6)$$

І період таких хвиль визначається за формулою:

$$T_L = \frac{2L}{c_{oi}}. \quad (3.7)$$



Дослід 14. Дослідження процесу генерації внутрішніх хвиль

Метою цієї роботи є утворення та дослідження внутрішніх стоячих хвиль, що генеруються на межі розділу двох рідин різної густини. Такі хвилі є важливим об'єктом вивчення, оскільки вони відображають складні процеси перемішування в природних водних масах, таких як океани, моря та озера, де різниця в густині шарів води може суттєво впливати на динаміку водного середовища.

Обладнання: плаский високий резервуар, сіль, харчовий барвник, відеокамера, ПК.

Перед проведенням лабораторного дослідження запропонуйте учням ознайомитися з матеріалами з додатка 2, щоб вони могли сформулювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, щоб учні поділилися своїми прогнозами.

Експериментальна процедура

Приготування солоного розчину. Заповніть частину пластикового резервуара розчином солоної води. Рекомендована концентрація — приблизно 60 грамів солі на 1 літр води. Додайте харчовий барвник до розчину, щоб зробити солону воду видимою та легше спостерігати за процесом.

Додавання прісної води. Обережно налейте прісну воду поверх шару солоної води. Це потрібно робити повільно і обережно, щоб уникнути змішування шарів. Висота шарів (h_1 для солоної води та h_2 для прісної) має бути приблизно рівною, близько 0,1 м.

Підготовка до спостереження. Установіть відеокамеру так, щоб вона була спрямована прямо на резервуар. Це дасть змогу записати процес утворення хвиль та їхню подальшу поведінку. Розпочніть запис відео.

Генерація хвиль. Обережно підніміть один із торців резервуара на висоту не більш ніж 0,01 м. Це викличе невелике збурення на межі розділу двох рідин. Швидко поверніть резервуар у горизонтальне положення. Ця дія спричинить утворення внутрішніх стоячих хвиль на межі солоної та прісної води.

Спостереження та аналіз. Спостерігайте за хвилями, що генеруються на межі розділу солоної та несолоної рідини. Записуйте всі деталі: амплітуду, частоту, поведінку хвиль. Після завершення експерименту зупиніть запис та перенесіть відео на ПК для подальшого аналізу.

Альтернативний варіант. Якщо немає можливості провести експеримент, скористайтесь QR-кодом.

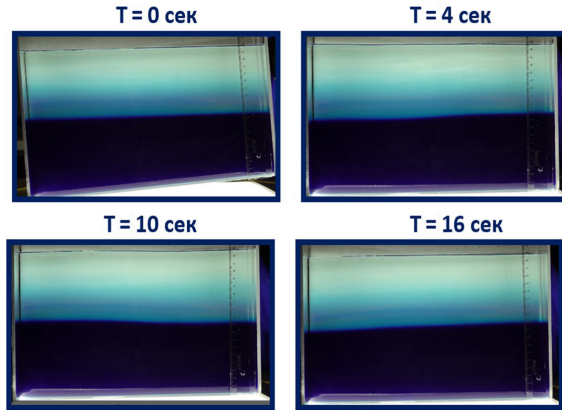


Рис. 3.25. Спостереження внутрішніх стоячих хвиль

Аналіз отриманих даних

Перенесення відео на ПК. Після завершення експерименту перенесіть відеозапис на персональний комп'ютер. Це забезпечить доступ до відео для подальшого перегляду та аналізу, а також дасть можливість використовувати програмне забезпечення для обробки відео та даних.

Відтворення відео та вибір чіткого кадру. Відтворіть відео на ПК, звертаючи увагу на моменти, коли хвилі на межі солоної та прісної води найбільш виразно проявляються. Виберіть кадри, на яких хвилі чітко видимі і де можна точно виміряти їхню амплітуду, довжину та інші параметри. Це важливо для порівняння з теоретичними результатами.

Побудова теоретичної кривої. Використовуючи задані параметри експерименту, такі як висота шарів рідини, концентрація солі та початкова амплітуда збурення, побудуйте теоретичну криву внутрішніх хвиль. Це можна зробити за допомогою математичних моделей, що описують поведінку хвиль на межі двох рідин з різною густиною (3.5).

Порівняння зображення в кадрі з теоретичною кривою. Порівняйте експериментальні дані, отримані з відео (напри-

клад, форма хвилі, амплітуда, довжина хвилі), з побудованою теоретичною кривою. Зверніть увагу на відповідність форми хвилі, її розміру та поведінки в динаміці.

Аналіз похибок та невідповідностей. Якщо є відхилення між експериментальними даними та теоретичними прогнозами, проаналізуйте можливі причини таких невідповідностей. Вони можуть включати варіації в густині рідин, неточності у вимірах, втрати енергії через тертя, нестабільність шару або інші чинники. Визначте, як ці чинники могли вплинути на результати експерименту.

Формування висновків. На основі порівняння експериментальних даних з теоретичними результатами сформулюйте висновки щодо характеру внутрішніх хвиль, їхньої поведінки та відповідності теоретичним моделям. Розгляньте можливості поліпшення експериментальної установки або уточнення моделі для більш точного відтворення реальних умов.

Цей детальний аналіз дасть змогу отримати глибше розуміння фізичних процесів, що відбуваються при взаємодії шарів рідин різної щільності, а також оцінити точність експериментальних даних порівняно з теоретичними прогнозами.

Напишемо розв'язок (3.5) для перших двох членів ряду:

$$\eta_i = -\frac{8 \cdot \eta_{0i}}{\pi^2} \cos\left(\frac{\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{c_{oi} x}{L} t\right) - \frac{2 \cdot \eta_{0i}}{\pi^2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{2c_{oi} x}{L} t\right), \quad (3.8)$$

де $L = 0,39$ м (довжина резервуара). Припустімо, що відхилення $\eta_{0i} = 0,01$ м, тоді швидкість довгих внутрішніх хвиль

$$c_{oi} = \sqrt{\frac{0,1 \cdot 0,1 (1044 - 998)}{0,2 \cdot 998}} \cdot 9,8 = 0,15 \text{ м/с}$$

$$\eta_i = -\frac{0,08}{\pi^2} \cos\left(\frac{\pi x}{0,39}\right) \cos\left(\frac{0,15 \cdot x}{0,39} t\right) - \frac{0,02}{\pi^2} \cos\left(\frac{2\pi x}{0,39}\right) \cos\left(\frac{0,3 \cdot x}{0,39} t\right). \quad (3.9)$$

Розв'язок (3.9) показано на рис. 3.26 для деяких моментів часу ($T = 5, 15, 40, 60$ секунд). Порівняйте теоретичну криву та результати, отримані під час дослідів.

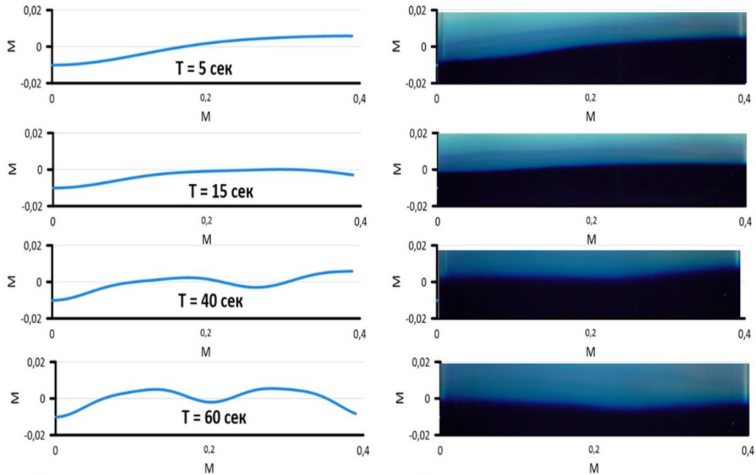


Рис. 3.26. Результат експерименту

Обговорення після дослідів. Обговоріть гіпотези, які були сформульовані учнями перед дослідом.

У процесі експерименту ми спостерігали утворення внутрішніх хвиль при невеликих відхиленнях піноклину в прямокутному резервуарі. Однак важливо зазначити, що при зміні умов експерименту, таких як значні відхилення піноклину або зміна форми резервуара, і характер утворення та поширення внутрішніх хвиль може суттєво змінитися.

Якщо відхилення піноклину збільшити, внутрішні хвилі набуватимуть більш виразної амплітуди, а їхня динаміка стане складнішою. Хвилі можуть демонструвати нелінійну поведінку, що буде відображатися на формі хвильового фронту та швидкості поширення хвиль. Крім того, якщо форма резервуара буде іншою, наприклад, якщо резервуар ма-

тиме нерівне дно або перешкоди, це також вплине на поведінку внутрішніх хвиль. Такі хвилі можуть взаємодіяти одна з одною або з перешкодами, створюючи складні картини руху, які важко передбачити без детального дослідження. У наступній демонстрації ми плануємо показати, як внутрішні хвилі змінюватимуть свою форму при більших відхиленнях пікноклину, а також в умовах, коли на дні резервуара будуть перешкоди. Це дасть нам змогу краще зрозуміти складні процеси, що відбуваються в природних умовах, наприклад у морях або океанах, де хвилі натрапляють на різні природні перешкоди, як-от підводні гори, рифи або континентальні шельфи.

Демонстрація 2. Вплив неоднорідностей рельєфу дна на внутрішні хвилі

Мета: візуалізувати та дослідити поширення хвиль над плоским дном і дном із перешкодами.

Обладнання. Дві пляшки: одна з гладкими стінками, інша зі звуженням посередині. Олія, вода.

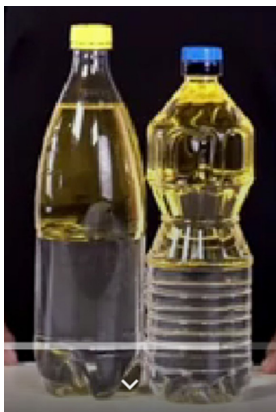
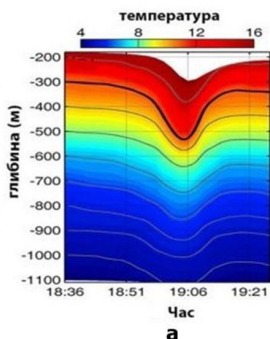


Рис. 3.27. Дві пляшки, наповнені водою і олією: одна з гладкими стінками, інша зі звуженням посередині

Хід демонстрації. Наповніть кожную пляшку водою приблизно на третину, а решту об'єму заповніть олією, наслідуючи приклад Бенджаміна Франкліна (який був описаний вище). На відміну від попереднього експерименту, де рідини змішувалися, зараз вони залишатимуться окремими шарами, і ми чітко побачимо межу між водою та олією. Ця межа розділу відіграватиме важливу роль у подальших спостереженнях. Після того як пляшки будуть підготовлені, покладіть їх горизонтально на рівну поверхню. Далі почніть поступово нахилити кожную пляшку, створюючи коливання на межі розділу між водою та олією. Спершу зафіксуйте на камеру рухи, які відбуваються при невеликих відхиленнях. На цьому етапі ви повинні побачити стоячі хвилі, подібні до тих, що спостерігалися у попередньому експерименті з прямокутним резервуаром. Після того як ви зафіксуєте характер хвиль на цьому етапі, почніть поступово збільшувати кут нахилу пляшок. Зверніть увагу на те, як змінюється характер руху внутрішніх хвиль у пляшці зі звуженням при збільшенні початкового відхилення. При значних відхиленнях на межі розділу між водою та олією почнуть генеруватися нелінійні внутрішні хвилі, відомі як солітони.

Солітони — це особливий тип хвиль, що мають структурну стійкість і зберігають свою форму на великих відстанях, без розсіювання енергії. Яскравим прикладом солітонних хвиль на поверхні океану є хвилі цунамі, які можуть зберігати свою форму і силу протягом сотень кілометрів. Висновок цього експерименту допоможе краще зрозуміти природу солітонів і їхню важливу роль у різних природних процесах, зокрема в динаміці океанів. Ці хвилі мають значний вплив на морську навігацію та екосистеми, тому їх дослідження є важливим для подальшого розвитку океанографії та прибережної інженерії.

солітон внутрішньої хвилі



солітон поверхневої хвилі



б

Рис. 3.28. Профіль температури в Південно-Китайському морі, що демонструє солітон внутрішньої хвилі [7], та солітон поверхневої хвилі

Ця демонстрація сприяє кращому розумінню складних процесів, що відбуваються у природних умовах, коли хвилі взаємодіють із підводними перешкодами, такими як рифи, підводні гори чи шельфи. Демонстрація також допоможе усвідомити, як такі перешкоди впливають на поширення енергії хвиль. Отримані знання мають практичне значення для розуміння хвильових процесів у реальних умовах, що є важливим у галузях, пов'язаних із морською навігацією, прибережною інженерією та охороною морських екосистем.

Обговорення після демонстрації. Ми можемо спостерігати суттєву різницю в поведінці внутрішніх хвиль у двох пляшках: одній із гладкими стінками та іншій зі звуженням. У випадку зі звуженням пляшки, окрім горизонтальних швидкостей, виникає значне збільшення вертикальних швидкостей завдяки звуженню. Це призводить до того, що внутрішні хвилі в такій пляшці мають більші амплітуди і починають формуватися значно раніше, ніж у пляшці з гладкими стінками. Звуження в пляшці сприяє концентрації енергії в обмеженій області, що змушує хвилі швидше досягати

критичних параметрів для виникнення нелінійних явищ. Як результат, ми можемо бачити, що хвилі в пляшці зі звуженням не тільки мають вищі амплітуди, а й проявляються інтенсивніше, що робить їх більш помітними та динамічними порівняно з хвилями в гладкій пляшці. Це явище показує, як зміна геометрії простору, в якому відбувається рух рідин, може суттєво впливати на характер утворення і розвитку хвиль, підкреслюючи важливість таких факторів, як форма і звуження, у формуванні хвильових процесів.

Утворення внутрішніх хвиль у пляшці без звуження



Утворення внутрішніх хвиль у пляшці зі звуженням

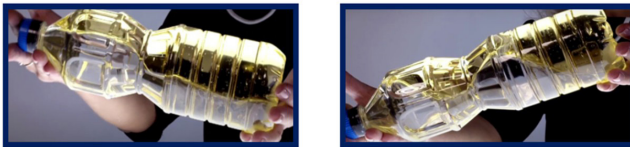


Рис. 3.29. Результати дослідження впливу неоднорідності дна на внутрішні хвилі

3.9. Океанічні течії. Термохалінна циркуляція

Одним із ключових механізмів, який приводить в рух водні маси в океані, є різниця густини води. Ця різниця може виникати з різних причин, які ми дослідили в попередніх експериментах. Такі рухи утворюють складну систему замкнутих морських течій, що діють як своєрідні «річки в океанах» на глобальному рівні. Ця система відома як океанічна циркуляція.

Двигун, який забезпечує рух океанічних вод і викликає горизонтальні переміщення водних мас на великі відстані, є результатом комбінованої дії кількох факторів: вітру, припливів та відпливів, а також різниці густини води. Особливо важливою є **термохалінна циркуляція**, яка формується в полярних широтах. Через охолодження поверхневих вод та збільшення солоності, викликане утворенням льодовикового покриву, ці води стають більш щільними і опускаються на глибину, утворюючи потужні глибинні течії. Ці процеси є важливими елементами глобальної кліматичної системи, оскільки вони сприяють розподілу тепла та солоності в океані, впливаючи на клімат Землі.

Термохалінна циркуляція — це частина великомасштабної океанічної циркуляції, що виникає як наслідок різниці густини води, зумовленої потоками прісної води та тепла. Поняття «термохалінний» складається з двох компонентів: «термо» — температура, «халін» — солоність. Як ми вже зауважували, разом ці два чинники, температура та солоність, визначають густину морської води. Поверхневі вітрові течії, такі як Гольфстрім, переміщують воду з екваторіальних районів Атлантичного океану на північ. Переміщуючись, ці води охолоджуються і завдяки збільшенню густини занурюються на глибини (формуючи Північно-Атлантичну глибинну водну масу). Таким чином води більшої густини на глибинах рухаються у протилежному напрямку щодо дії вітрових течій. Внаслідок такого безперервного перемішування між різними океанічними басейнами зменшується різниця між характеристиками різних океанів і вони з'єднуються в єдину глобальну систему. До термохалінної циркуляції надходять холодні води з двох локальних джерел — Північно-Атлантичного та Антарктичного. У цих осередках утворення глибинних вод відбувається за рахунок охолодження на поверхні та осолонення, внаслідок чого води із більшою густиною занурюються на дно. Термохалінна циркуляція сприяє пом'як-

шенню термічних контрастів між екватором та полюсом та регулює кліматичну мінливість у масштабах від десятиліть до тисячоліть.

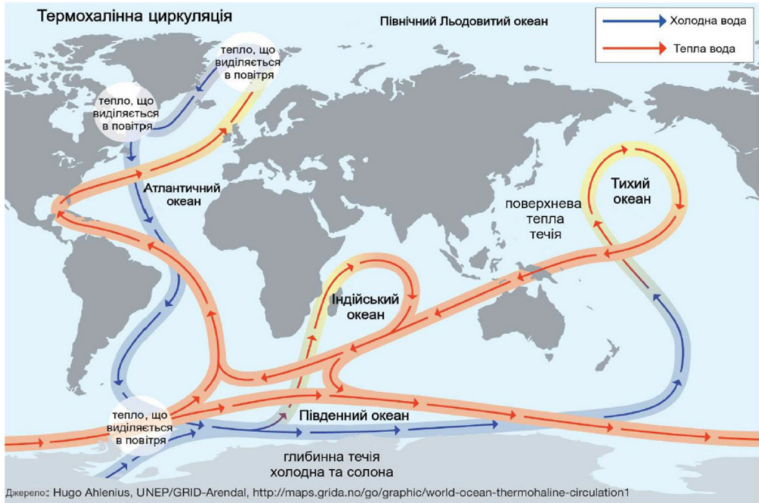


Рис. 3.30. Термохалінна циркуляція

Швидкість руху глибинних, придонних вод значно нижча, ніж швидкість поверхневих течій, і в середньому становить близько 10 см/с. Отже, загальна горизонтальна циркуляція Світового океану складається з двох основних систем течій: поверхневої та глибинної. Фізична природа поверхневої циркуляції визначається як вітровими, так і термохалінними процесами, тоді як глибинна циркуляція є виключно термохалінною.

Межа між поверхневими та підводними течіями, як правило, перебуває на глибині близько 1500 метрів. Ці дві системи течій з'єднуються на півдні Антарктичною циркумполярною течією — найпотужнішою у Світовому океані, що грає ключову роль у глобальному перемішуванні водних мас.

Із цього випливають кілька важливих теоретичних висновків.

1. Глибинні течії надзвичайно повільні — їхня швидкість у кілька разів менша, ніж у поверхневих течій.

2. Утворення вод із підвищеною густиною відбувається в кількох локалізованих регіонах океану, таких як північна Атлантика та Антарктика. Ці регіони є джерелами термохалінної циркуляції, що викликає занурення вод на значні глибини. Однак кожен об'єм води, що занурюється, повинен компенсуватися об'ємом, що повертається на поверхню. Це вказує на існування масштабних компенсаційних течій, що охоплюють цілі океанські басейни.

Щоб перевірити ці теоретичні припущення, ми створимо спрощену модель термохалінної циркуляції та спробуємо простежити ці течії, використовуючи барвник. Це дасть нам змогу наочно спостерігати, як саме відбувається переміщення водних мас у різних шарах океану і як взаємодіють між собою поверхнева і глибинна циркуляції.



Дослід 15. Термохалінна циркуляція

Метою досліджу є відтворення елемента термохалінної циркуляції, зокрема процесу занурення холодних вод на дно і формування замкнутої течії в океані.

Обладнання: плаский вертикальний резервуар, лід, харчовий барвник.

Перед проведенням лабораторного досліджу запропонуйте учням ознайомитися з матеріалами з додатка 2, щоб вони могли сформулювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, щоб учні поділилися своїми прогнозами.

Експериментальна процедура

Наповніть плаский вертикальний резервуар чистою водою, залишивши невеликий простір від верхнього краю, щоб уникнути переливання.

Обережно покладіть на поверхню води шматочки льоду. Слідкуйте, щоб лід розміщувався ближче до одного краю резервуара, щоб забезпечити спостереження за локалізованим процесом охолодження.

Зачекайте кілька хвилин, поки лід почне танути. Це спричинить охолодження води біля поверхні та формування вертикальної течії, спрямованої донизу, оскільки холодна вода більш густа і опускається на дно резервуара.

Додайте харчовий барвник поруч із льодом, щоб візуалізувати утворення цієї холодної течії. Спостерігайте, як забарвлена холодна вода опускається на дно і починає переміщуватися горизонтально уздовж дна резервуара.

Спостерігайте за циркуляцією води, щоб побачити, як холодна течія впливає на загальний рух водних мас у резервуарі. Трохи згодом додайте барвник іншого кольору з протилежного краю резервуара. Це дасть можливість спостерігати утворення поверхневої течії, яка рухатиметься в напрямку, протилежному до холодної течії на дні.

Відстежуйте, як обидві течії взаємодіють, утворюючи замкнутий цикл циркуляції, що нагадує глобальні океанічні процеси.

Альтернативний варіант. Якщо немає можливості провести експеримент, скористайтеся QR-кодом.

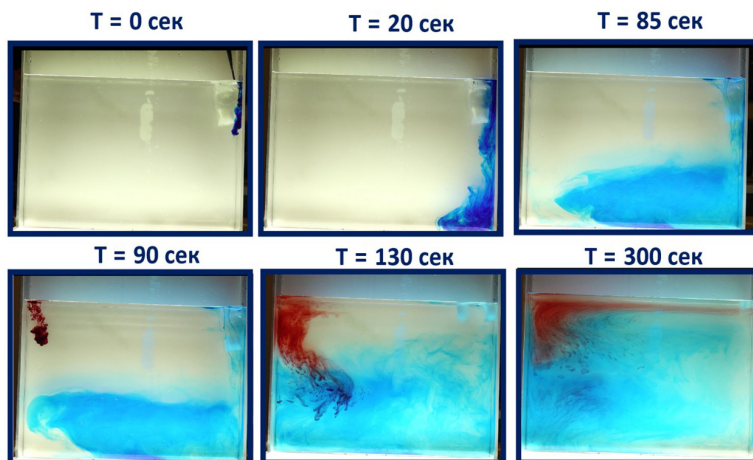


Рис. 3.31. Хід дослідів з моделювання термохалінної циркуляції

Аналіз отриманих даних

Намалюйте схему течій. Зробіть спостереження за рухом води в резервуарі, створюючи схематичне зображення течій. Включіть у схему зазначені нижче елементи.

Верхня частина резервуара: позначте область, де розташований лід і де розташовується поверхневий барвник. Покажіть, як холодна забарвлена вода опускається на дно.

Нижня частина резервуара: відобразіть, як холодна вода розтікається горизонтально по дну резервуара, а також як відбувається підйом більш теплої води з протилежного боку.

Циркуляція: покажіть шлях, який проходять водні маси від моменту занурення холодної води до її підняття та переміщення поверхню.

З'ясуйте, чи виникає замкнута циркуляція.

Оцінка вертикальної течії. Перевірте, чи спостерігається постійне опускання холодної води на дно та підйом теплої води на поверхню.

Оцінка горизонтальної течії. Визначте, чи утворюється горизонтальна течія на поверхні після додавання барвника з протилежного боку резервуара. Проаналізуйте, як ці течії взаємодіють із вертикальною циркуляцією.

Виявлення замкнутої циркуляції. Перевірте, чи утворюється замкнута циркуляція, коли холодна вода опускається вниз, а тепла піднімається вгору і переміщується по поверхні назад до місця, де почалась циркуляція. Замкнута циркуляція вказує на те, що вода переміщується у формі циклу, подібно до глобальної термохалінної циркуляції.

Обговорення досліду. Намалюймо схему течій, яка виникає в резервуарі.

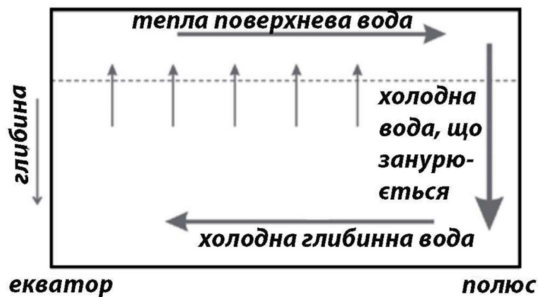


Рис. 3.32. Спрощена схема термохалінної циркуляції в лабораторному басейні

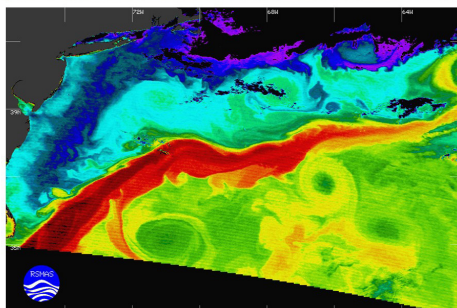
3.10. Поверхнева течія Гольфстрім

Гольфстрім є частиною глобальної циркуляції, про яку йшлося в попередніх розділах: тепла вода з Мексиканської затоки та Карибського басейну тече на північ. Вода в Гольфстрімі рухається з величезною швидкістю — понад 6 кілометрів на годину. Біля берегів Гренландії вода, що охолола, опускається на дно, і на глибині частина її рухається на південь, а інша частина — знову вгору на поверхню. На своє-

му шляху до Європи Гольфстрім втрачає значну кількість енергії через випаровування, охолодження та численні бічні відгалуження, які зменшують головний потік. Однак він усе ще постачає достатньо тепла до Європи, щоб створити тут незвичний для цієї широти м'який клімат. Температура Гольфстріму біля поверхні становить $+25 \dots +26^{\circ}\text{C}$, а довжина течії до Шпіцбергену становить близько 10 000 км.



а



б

Рис. 3.33: а) карта Гольфстріму Франкліна – Фолджера;
б) зображення Гольфстріму, зроблене за допомогою інфрачервоного
спектрорадіометра із середньою роздільною здатністю (MODIS)

На рис. 3.33 зображена приблизна карта Гольфстріму, створена Бенджаміном Франкліном та його двоюрідним братом Тімоті Фолджером. Коли Бенджамін Франклін був

поштмейстером колоній, він помітив, що поштові кораблі, які вирушали з англійського порту Фалмут до Нью-Йорка, витрачали на подорож на два тижні більше, ніж звичайні торгові судна, які прямували з Лондона до Ньюпорта, розташованого трохи на схід від Нью-Йорка. Після розслідування Франклін з'ясував, що причиною цього була течія Гольфстрім. Поштовими суднами командували англійські моряки, які мало були знайомі з Гольфстрімом і не враховували його під час плавання. Натомість торговими суднами керували американські моряки, які з дитинства брали участь у морських промислах біля берегів Америки і добре знали цю течію. За ініціативою Франкліна моряки почали наносити свої спостереження за Гольфстрімом на карти, що дало змогу створити першу детальну карту цієї течії.

Ця карта мала важливе значення для мореплавців того часу, адже вона допомогла значно скоротити час плавання через Атлантику. Використання знань про Гольфстрім дало можливість не лише прискорити доставку пошти, а й значно підвищити ефективність торгівлі між Європою та Америкою. Франклінська карта Гольфстріму стала одним із перших прикладів того, як наукові спостереження можуть мати практичне застосування у мореплавстві та економіці.

Температура води в районі Гольфстріму коливається від 7 °С до 22 °С. Як показано на рис. 3.33, основна течія Гольфстріму, відображена на карті темно-червоним кольором, являє собою найтеплішу воду. Вона відходить від узбережжя біля мису Гаттерас у Північній Кароліні. Прохолодні шельфові води з півночі поступово змішуються з теплішими потоками, що надходять з Чесапікської та Делаверської заток. Північна межа Гольфстріму має складну структуру, обумовлену фронтальними нестійкостями, які сприяють обміну теплом між Гольфстрімом та прибережними водами.

Варто зазначити, що в умовах глобальних змін клімату течія Гольфстрім уповільнюється, і ця тенденція, за про-

гнозами, триватиме й надалі. Таке порушення має назву *термохалінна катастрофа* — і воно означає зміну глобальної океанічної циркуляції, спричинену змінами температури (термо-) та солоності (гало-) води. Та згідно з наявними кліматичними моделями, якщо викиди парникових газів продовжуватимуть зростати, північноатлантична мережа течій може ослабнути на третину до кінця цього століття. Це може мати серйозні наслідки для клімату Європи та Північної Америки, включаючи можливе зниження температури в цих регіонах.

Подібна тепла течія існує і в басейні Тихого океану. Це течія Куросіо, яка прямує на північний схід уздовж західного краю північної частини Тихого океану, починаючи від східних берегів Північних Філіппін і аж до східних берегів Японії. Куросіо, як і Гольфстрім, відіграє важливу роль у регуляції клімату регіону, впливаючи на погодні умови та морське життя вздовж свого маршруту.

Але що змушує Гольфстрім та Куросіо текти вузькими теплими струменями, які зберігаються в океані на відстані багатьох сотень кілометрів? Бо з досвіду ми знаємо, що струмінь, який виходить з вузького простору (труби, каналу, річки) у великий басейн, швидко розширюється і втрачає швидкість, тому що під дією сил в'язкого тертя до потоку залучається маса навколишніх вод. Ситуація з Гольфстрімом та Куросіо — інша. Енергія Гольфстріму постійно підживлюється гідродинамічним напором, що створюється при обертанні Землі. І коли вплив обертання стає меншим, як в зоні Північноатлантичної течії, то спостерігається зменшення швидкості та збільшення ширини потоку. Продемонструємо це на досліді.



Дослід 16. Моделювання течії Гольфстрім

Метою дослідів є відтворення процесу утворення теплої поверхневої течії та дослідження впливу на неї обертання резервуара.

Обладнання: обертова платформа, резервуар із квадратною основою, трубка, пляшка, вентиль, барвник.

Перед проведенням лабораторного дослідів запропонуйте учням ознайомитися з матеріалами з додатка 2, щоб вони могли сформулювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, щоб учні поділилися своїми прогнозами.

Підготовка обладнання. Закріпіть пляшку на вертикальній штанзі обертової платформи. Під'єднайте трубку до пляшки, щоб вона могла спрямовувати воду з пляшки до резервуара. Закріпіть трубку на бічній стінці резервуара так, щоб її кінчик перебував на рівні рідини в резервуарі.

Підготовка рідин. У пляшку налийте гарячу воду, попередньо додавши барвник для візуалізації. Налийте воду кімнатної температури в резервуар із квадратною основою.

Процедура без обертання. Відкрийте вентиль на трубі і дайте гарячій забарвленій воді витікати в резервуар із водою кімнатної температури. Спостерігайте та зафіксуйте динаміку витікання, звертаючи увагу на формування теплої поверхневої течії та її взаємодію з навколишньою водою.

Зміна умов. Змініть воду в резервуарі, очистивши його від залишків забарвленої рідини. Наново заповніть пляшку гарячою забарвленою водою.

Процедура з обертанням. Увімкніть обертову платформу та встановіть її на швидкість $\text{RPM} = 10$ об/хв. Відкрийте вентиль і дайте гарячій воді витікати в резервуар.

Аналіз результатів. Спостерігайте, як обертання резервуара впливає на динаміку витікання гарячої води. Зафіксуйте зміни у формуванні поверхневої течії, порівнюючи її з попередніми спостереженнями без обертання. Оцініть, як обертання резервуара змінює напрямок і форму теплої течії в резервуарі.

Альтернативний варіант. Якщо немає можливості провести експеримент, скористайтесь QR-кодом.



Рис. 3.34. Підготовка до дослід з моделювання течії Гольфстрім

Аналіз отриманих даних

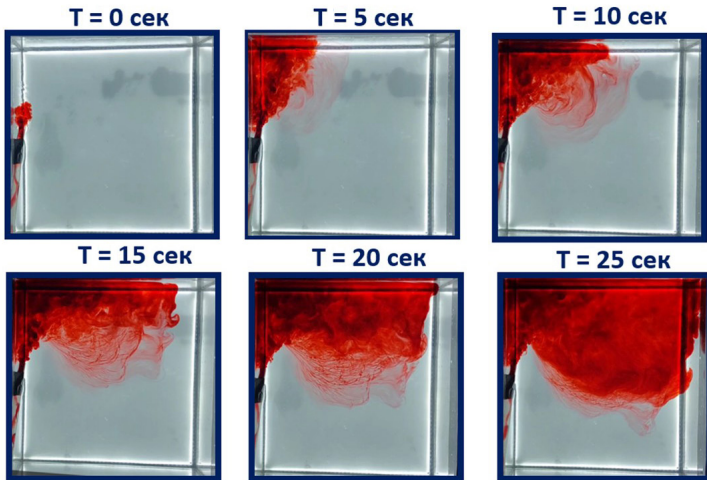


Рис. 3.35. Теплий струмись, що витікає в резервуар без обертання

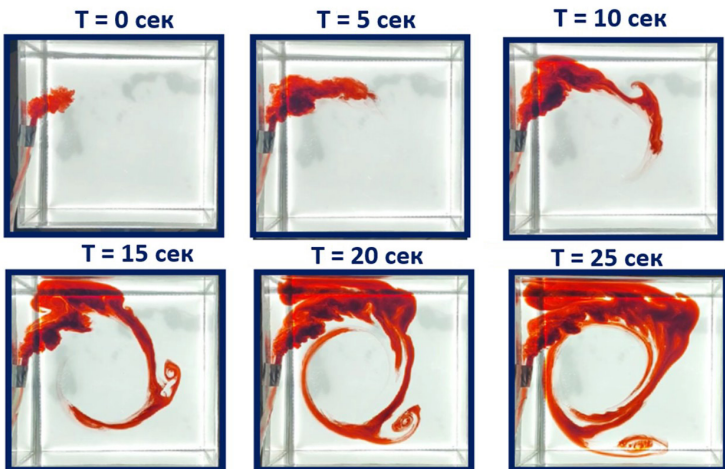


Рис. 3.36. Теплий струмись, що витікає в резервуар з обертанням

Обговорення після досліджу. Після досліджу запропонуйте учням обговорити провокаційне запитання: чи може зупинитися Гольфстрім? У медіа нерідко з'являються заголовки на кшталт «Гольфстрім скоро зупиниться» або «Гольфстрім перестане існувати», однак такі публікації не мають реального наукового підґрунтя. Сенсаційні заяви про потенційну катастрофу викликають страх та занепокоєння серед широкого загалу, часто не враховуючи наукових даних та досліджень, які вказують на більш складні та багатогранні процеси.

У масовій культурі побоювання щодо Гольфстріму знаходять відображення у кіно та літературі. Наприклад, у фільмі-катастрофі Роланда Еммеріха «Післязавтра» Гольфстрім раптово зупиняється, що призводить до серії катастрофічних кліматичних змін у всьому світі. Подібні сценарії, хоч і захоплюють увагу аудиторії, часто не відображають реальність і можуть спотворювати розуміння складності кліматичних процесів.

Попросіть вихованців поділитися своїми думками щодо таких новин. Як вони ставляться до заголовків у ЗМІ, які передбачають катастрофічні сценарії? Чи відрізняють вони наукові дані від художньої вигадки? Як часто вони зустрічаються з подібною інформацією у соціальних мережах чи новинах? Можна запропонувати вихованцям обговорити зазначені нижче питання.

Чи довіряють вони новинам у соціальних мережах? Як визначають надійність джерел? Як ЗМІ та фільми впливають на їхнє сприйняття проблеми? Чи бачать вони різницю між реальними науковими дослідженнями і вигаданими сценаріями? Як вони можуть перевірити достовірність інформації про Гольфстрім? Які ресурси або інструменти для цього використовують?

Обговоріть, які наслідки може мати поширення неправдивої або непідтвердженої інформації. Чи можуть такі новини впливати на політичні рішення, економіку або екологічні ініціативи?

3.11. Транспорт Екмана. Велика тихоокеанська пляма

Іще однією важливою причиною виникнення течій у Світовому океані, як уже було зазначено вище, є вітер. Коли вітер дме по поверхні води, виникає тертя, яке змушує верхні шари води рухатися. Це тертя зростає з посиленням вітрових хвиль, оскільки на тилівій поверхні хвиль утворюється додатковий тиск. Енергія руху передається від верхніх шарів води до нижніх через внутрішнє тертя, що призводить до поступального руху глибших шарів води. Однак із глибиною вплив вітру поступово слабшає. На глибині декількох десятків метрів, залежно від сили вітру, цей вплив швидко зменшується та зникає. Отже, хоча вітер має значний вплив на поверхневі течії, його ефект обмежений у верхньому шарі і глибші шари океану залишаються майже нерухомими. Цей поверхневий шар, де вплив вітру падає до нуля, називається **шаром Екмана**. При цьому під дією сили Коріоліса течії поступово повертають, віддаляючись від поверхні і утворюючи спіраль. Ця спіраль називається **спіраллю Екмана**, і вона є наслідком дії сили Коріоліса, яка змушує рухомі об'єкти відхилятися на 90° вправо в північній півкулі і на 90° вліво в південній півкулі.

Таким чином, коли вітер діє на поверхню океану в північній півкулі, поверхневі течії відхиляються вправо від напрямку вітру. Поверхневий шар води за рахунок в'язкості надає руху нижньому шару, який теж відхиляється вправо, і так далі.

Транспорт Екмана — це сумарний результат впливу сили вітру, ефекту Коріоліса та сил опору, що спричиняє рух поверхневих вод на 90° відносно напрямку вітру. Цей ефект підсилюється у місцях, де географічні особливості, як-от береги та рельєф морського дна, обмежують рух води.

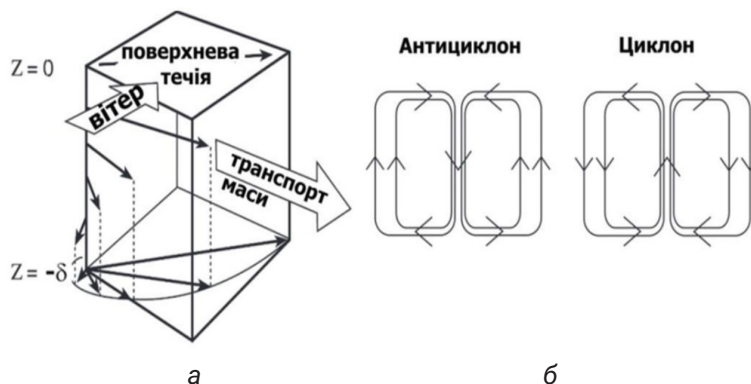


Рис. 3.37: а) модель спіралі Екмана описує структуру течій та вітрів поблизу поверхні, коли напрямок течії поступово відхиляється від первинного напрямку під дією обертання Землі з віддаленням від поверхні; б) транспорт Екмана: утворення антициклонічного та циклонічного потоків

Історична довідка

Відхилення, викликані силами Коріоліса в атмосферних та океанічних течіях, можуть здаватися контрінтуїтивними та важкими для уявлення. Вплив сили Коріоліса на океанські течії вперше був зафіксований під час експедиції Фрітьофа Нансена. Ми вже згадували судно «Фрам», коли йшлося про стратифікацію та внутрішні хвилі. У 1893 році Нансен відправив своє 12-футове дерев'яне судно «Фрам» замерзати в арктичному льодовому покриві приблизно за 1000 км на південь від Північного полюсу. «Фрам» залишався замкненим у крижаних масах протягом 35 місяців. Під час цього експерименту Нансен помітив, що напрямок руху льоду та судна не був паралельним напрямку вітру. Навпаки, лід і корабель дрейфували під кутом $20-40^\circ$ праворуч від напрямку вітру, при цьому швидкість дрейфу льоду становила приблизно 2 % від швидкості самого вітру.

Зацікавлений цим явищем, Нансен передав задачу Вільгельму Б'єркнесу, професору в Університеті Упсали, якого ми

вже згадували вище як науковця, який застосував математичні рівняння Нав'є – Стокса для опису фізичних процесів, що керують рухом вітру та атмосферних фронтів. Б'єркнес, у свою чергу, доручив її вивчення своєму студенту, геофізику *Вагну Екману*. У 1905 році Екман розробив теорію вітрових течій, яка пояснила, що сили Коріоліса змушують верхні шари води рухатися під кутом до напрямку вітру, створюючи складні циркуляційні системи в океанах. Ця теорія стала фундаментальною в розумінні океанічної циркуляції та впливу атмосферних умов на морські течії.

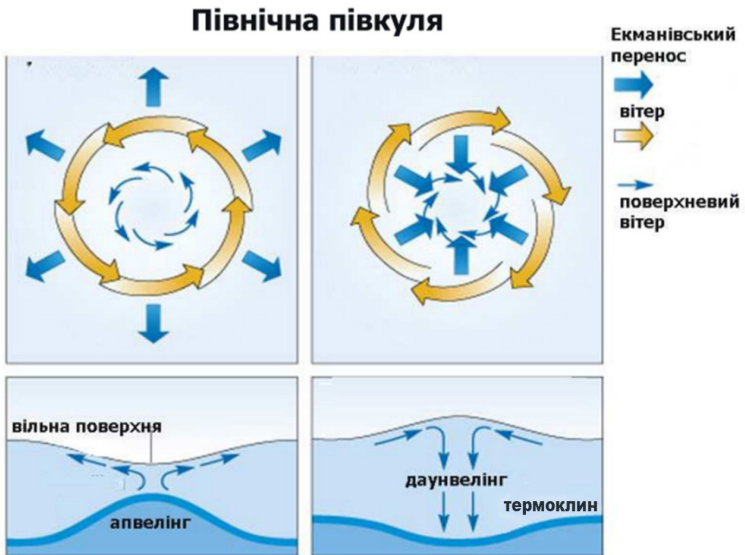


Рис. 3.38. Механізм екманівського накачування: апвелінг (всмоктування за Екманом) і даунвелінг (нагнітання за Екманом)

Транспорт Екмана впливає на перенесення тепла і поживних речовин в океанах та є важливим механізмом для регулювання клімату і екосистем морських течій. При цьому

виникає і вертикальний перенос, який має назву **екманівське накачування**. Це процес вертикального переносу води, що виникає через просторові зміни вітрового транспорту Екмана. Цей ефект обумовлений різницею у швидкості або напрямку вітру на великих площах океану, що призводить до горизонтальних градієнтів тиску у водних масах.

Коли змінюється сила або напрямок вітру, транспорт Екмана викликає утворення областей, де вода або підіймається (апвелінг), або опускається (даунвелінг) внаслідок різного тиску. Екманівське накачування найчастіше спостерігається у великих циркуляційних системах океану, таких як субтропічні і субполярні круговороти [20].

Апвелінг: коли вітри створюють умови для розходження водних потоків на поверхні океану, наприклад через зміну напрямку або сили вітру, поверхнева вода відводиться від певної області (рис. 3.38). Щоб компенсувати цю втрату, з глибин піднімається холодна, багата на поживні речовини вода. Це і є апвелінг, який постачає поживні речовини на поверхню, підтримуючи морську екосистему. Апвелінг часто виникає у субполярних круговоротах або уздовж західного узбережжя континентів, де води поверхні відводяться від берега через транспорт Екмана. **Даунвелінг:** у випадках, коли вітри сприяють сходженню поверхневих потоків у певній області, наприклад, у центрі субтропічних круговоротів (рис. 3.38), відбувається накопичення поверхневої води, що призводить до її опускання. Вода, що накопичується на поверхні, під дією тиску опускається вниз, утворюючи даунвелінг. Це забезпечує перенесення кисню та інших газів у глибинні шари океану.

Транспорт Екмана також впливає на кліматичні умови та екосистеми прибережних регіонів, зокрема через зміну температури води і концентрації поживних речовин, що має важливе значення для рибальства та морських ресурсів.

Велика тихоокеанська сміттева пляма — проблема глобального масштабу

Тихоокеанська сміттева пляма виникла через скупчення пластику та іншого сміття, що потрапляє в океан із наземних джерел і морських суден. Океанічні течії затягують це сміття в Північний Тихоокеанський субтропічний кругообіг, де воно накопичується, створюючи гігантське скупчення. Головною причиною є масове виробництво пластику, неправильне поводження з відходами та слабка система переробки. Основним компонентом Великої тихоокеанської сміттевої плями є пластик, який становить близько 80 % усіх відходів у цій зоні. Сюди входять пластикові пляшки, пакети, рибальські сітки, іграшки та інші одноразові предмети. З часом великі шматки пластику під дією ультрафіолетового випромінювання, хвиль та механічного впливу розпадаються на мікропластик — маленькі частинки розміром менш ніж 5 міліметрів. Ці частинки, часто не видимі неозброєним оком, створюють згустки, що нагадують зоопланктон, через що морські організми, такі як медузи, риби, черепахи, можуть помилково приймати їх за їжу.

Вплив на морські екосистеми та харчові ланцюги. Пластик у Великій тихоокеанській сміттевій плямі є надзвичайно небезпечним для морської фауни та флори. Частинки пластику потрапляють у харчові ланцюги, накопичуються у шлунках морських птахів, риб, черепах та інших тварин, що призводить до смерті від голоду або отруєння. Відомо, що близько 90 % морських птахів мають пластик у своїх шлунках. Деякі види риб, які споживаються людьми, також містять мікропластик, що ставить під загрозу не лише морську екосистему, а й здоров'я людей. Особливо небезпечними є довговічні пластикові предмети, такі як кришки від пляшок, кільця від упаковок і одноразові запальнички. Вони можуть залишатися в океані протягом багатьох десятиліть, забруднюючи середовище та завдаючи шкоди морським організмам.

Наслідки для клімату та людства. Крім безпосередньої шкоди для морських організмів, Велика тихоокеанська сміттева пляма має глобальні наслідки для клімату та людства. Мікропластик може впливати на поглинання сонячного світла поверхневими водами, змінюючи температуру води та, відповідно, кліматичні умови. Дослідження показують, що пластик у світових океанах може сприяти змінам у кругообігу вуглецю, що ще більше ускладнює глобальні кліматичні проблеми.



Дослід 17. Транспорт Екмана

Ідею досліду взято з проєкту Массачусетського технологічного інституту Weather in Tank (<http://weathertank.mit.edu/links/projects/ekman-pumping-suction-introduction>).

Метою роботи є демонстрація процесу впливу вітру на циркуляцію, візуалізація шару Екмана та процесів апвелінгу (підняття води з нижнього шару у верхній) та даунвелінгу (опускання води з верхнього шару в нижній).

Обладнання: обертова платформа, резервуар із квадратною основою, кругла вставка, вентилятори, барвник, клаптики паперу.

Перед проведенням лабораторного досліду запропонуйте учням ознайомитися з матеріалами з додатка 2 і сформулювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, щоб учні поділилися своїми прогнозами.

Експериментальна процедура

Підготовка установки. Встановіть резервуар із квадратною основою на обертову платформу. Встановіть круглу вставку в резервуар. Наповніть резервуар водою до певного рівня, щоб уникнути переливу під час обертання.

Розміщення вентиляторів. Встановіть вентилятори на протилежних сторонах резервуара таким чином, щоб потоки повітря від них були спрямовані в протилежні напрямки вздовж поверхні води. Нижній край вентиляторів повинен бути на рівні поверхні води, але не торкатися її.

Обертання платформи. Увімкніть обертання установки, встановивши RPM (оберти за хвилину) на значення 10. Зачекайте 10 хвилин, щоб дати воді змогу стабілізуватися та уникнути зайвих коливань.

Запуск вентиляторів. Увімкніть вентилятори для створення штучного вітру над поверхнею води. Почекайте ще 10 хвилин для стабілізації поверхні води та створення умов циркуляції, подібних до реальних океанічних процесів.

Додавання барвника та паперових клаптиків. Додайте кілька крапель барвника на відстані половини радіуса вставки резервуара та покладіть на поверхню води клаптики паперу. Барвник допоможе візуалізувати підповерхневі течії, тоді як клаптики паперу відображатимуть рух поверхневих вод під дією вітру та обертання платформи.

Спостереження за рухом. Спостерігайте за напрямками руху барвника та паперових клаптиків. Зафіксуйте, як вони рухаються в результаті впливу вітру та обертання, намагайтесь визначити області апвелінгу та даунвелінгу. Зазначте, які зміни спостерігаються у циркуляції води в межах шару Екмана.

Зупинка обертання та оновлення води. Зупиніть обертання платформи, злийте воду з резервуара та поновіть її. Це потрібно для уникнення впливу залишкових течій на наступний експеримент.

Зміна напрямку обертання. Повторіть попередні кроки, змінивши напрямок обертання платформи установки. Це дасть можливість спостерігати, як змінюється циркуляція рідини та напрямки апвелінгу і даунвелінгу за різних умов.

Альтернативний метод. Якщо немає можливості провести експеримент особисто, завантажте відео з готовим

експериментальним записом за вказаним вище покликанням.

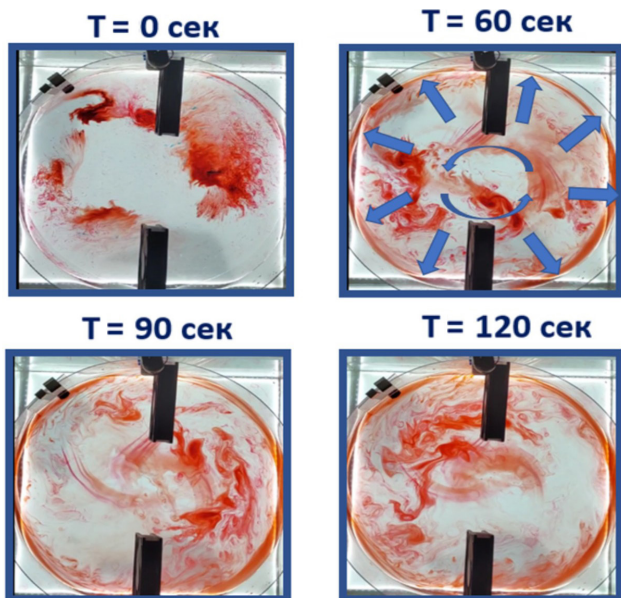


Рис. 3.39. Хід досліду з екманівським накачуванням — апвелінг

Аналіз отриманих даних. Зобразіть напрямки руху рідини в резервуарі в обох випадках (з різними напрямками обертання). Відзначте зони апвелінгу (де вода піднімається до поверхні) та даунвелінгу (де вода опускається вниз). Проаналізуйте вплив обертання платформи та спрямованого вітру на циркуляцію води. Порівняйте отримані результати з теоретичними уявленнями про шар Екмана та процеси апвелінгу і даунвелінгу. Зробіть висновки щодо залежності напрямків руху води від обертання платформи та сили вітру. Поясніть, як результати досліду можуть бути застосовані для розуміння реальних океанічних та атмосферних процесів.

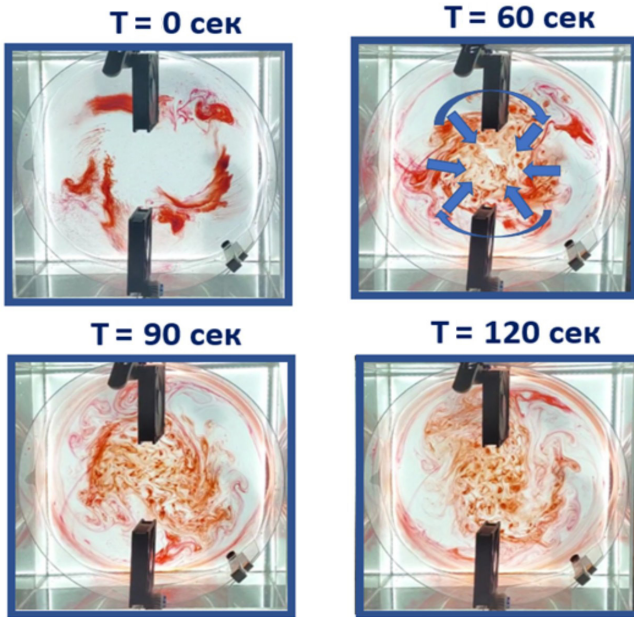


Рис. 3.40. Хід досліді з екманівським накачуванням — даунвелінг

Обговорення після досліді. Обговоріть гіпотези, які були сформульовані учнями перед дослідом.

У досліді продемонстровано вплив вітру та обертання на циркуляцію води, що імітує процеси, подібні до океанічних. Експеримент показує, як під дією вітру поверхневі води рухаються в напрямку, що відхиляється через ефект Коріоліса. Процеси апвелінгу та даунвелінгу допомагають зрозуміти, як глибинні течії піднімають або опускають воду, впливаючи на екосистеми. Зміна напрямку обертання платформи демонструє різні варіанти циркуляції, подібно до того, як це відбувається в північній і південній півкулях Землі.

3.12. Особливості течій при обертанні

Ми вже обговорювали танення льоду в океанах і морях, але існує цікавий феномен, який суттєво впливає на цей процес, зокрема в районах з підводними горами. Під час спостережень за льодовим покривом у Чукотському морі було виявлено, що при відступанні льоду влітку залишаються ділянки, де лід не тоне над підводними підвищеннями, як, наприклад, над мілинами Геральд і Ханна [21].

На рис.3.41 показано відступання краю льоду влітку 1994 року в Чукотському морі, де контури льодового краю накладено на карту глибин, що демонструє підводний рельєф цього регіону. На зображенні видно, що при відступанні льоду залишаються ділянки льоду над мілиною Геральд, яку видно як круглу білу ділянку приблизно в центрі зображення. Це явище спостерігається щороку протягом сезону танення льоду не лише над мілиною Геральд, а й над мілиною Ханна — меншою морською горою поблизу узбережжя Аляски, неподалік від каньйону Барроу. Такий феномен пояснюється тим, що підводні гори виступають своєрідними бар'єрами, які перешкоджають швидкому змішуванню холодної води, що накопичується над ними, з більш теплою водою навколо. Ці морські гори створюють умови, за яких вода над ними залишається значно холоднішою, що уповільнює процес танення льоду в цих зонах. Затримка змішування холодної води з більш теплою навколишньою водою означає, що лід у цих районах зберігається довше, ніж у навколишніх областях.

Пояснення цього феномену пов'язане з утворенням у потіці циліндричних структур або колон рідини, які формуються в обертових рідинних системах. Унаслідок обертання Землі та впливу Коріолісової сили в океані утворюються колони або вихори води, які виносять холодну воду на поверхню над підводними горами, створюючи тимчасову ізоляцію від теплі-

ших течій. Ці обертові структури у воді працюють як ефективні бар'єри для перемішування, затримуючи теплопередачу до поверхневого шару, де знаходиться лід. Таким чином, процес танення льоду над підводними горами сповільнюється.

Дослідження цього феномену є важливим для розуміння регіональних змін клімату, оскільки такі процеси мають значний вплив на локальні морські екосистеми та загальну циркуляцію вод в Арктиці та Антарктиці. Збереження льодових ділянок над підводними горами може впливати на температуру та солоність поверхневих вод, змінюючи умови існування для морських організмів, таких як фітопланктон, риби та морські ссавці.

Цей феномен також може впливати на довгострокові зміни в полярних регіонах, зокрема на механізми регулювання потепління та танення льоду. Підводні гори та їхня здатність затримувати холодну воду можуть слугувати буферами проти швидких змін у льодовому покриві, що робить їх критично важливими об'єктами для подальших досліджень і моніторингу.

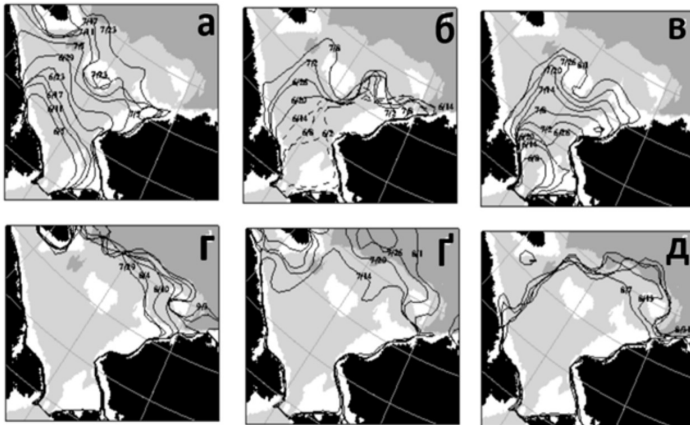


Рис. 3.41. Імовірний вплив стовпчиків Тейлора на танення літнього льоду в Чукотському морі [21]

Раніше у досліді 6, де теж застосовували обертову рідину, ми виявили важливу властивість обертового руху: якщо рідина однорідна (тобто густина ρ розподілена рівномірно), то потік у цій рідині є двомірним та не змінюється з глибиною в напрямку вектора обертання Ω .

Це є наслідком теореми Тейлора – Прудмана, яка стверджує, що при обертанні тіла із рідиною з постійною швидкістю швидкість у рідині буде незмінною вздовж будь-якої осі, що паралельна осі обертання. Тобто зміни горизонтальної компоненти швидкості дорівнюють нулю. Вертикальні стовпчики рідини рухаються в обертовій рідині із постійною глибиною, тому що вони не можуть змінюватися в напрямку z . Отже, ці колонки поведуться як суцільні тверді колонки, що рухаються вздовж траєкторії із постійною глибиною, і горизонтальний потік вимушено відхиляється, оминаючи перешкоди, що показано на рис. 3.42.

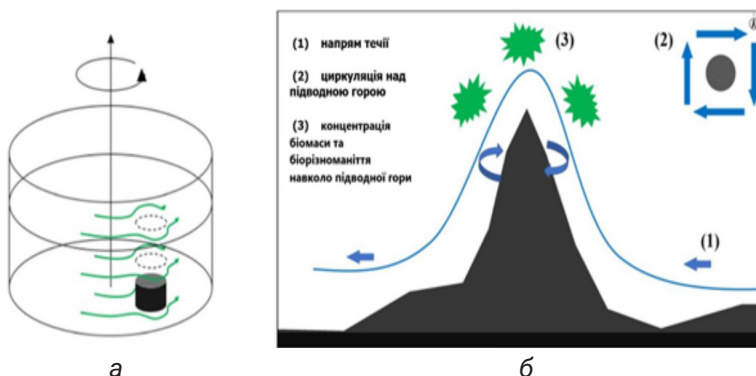


Рис. 3.42: а) відхилення горизонтального потоку, що оминає перешкоду (перемальовано з [20]); б) схема циркуляції навколо підводної гори (перемальовано з [21])

Такі стовпці рідини називаються **стовпчиками Тейлора** за іменем британського фізика Джеффрі Тейлора (1886 – 1975), математика та фахівця з гідродинаміки й теорії хвиль,

члена Лондонського королівського товариства та учасника Манхеттенського проєкту, який відкрив такі вихори в 1920-х роках. Серед усіх течій, які забезпечують поживними речовинами райони підводних гір, **стовпчики Тейлора** вважаються одними з найважливіших. Підводні гори, каньйони та схили мають вплив на напрямок потоків і перемішування вод, на розподіл поживних речовин, які впливають на біорізноманіття в океані, а також на можливе поширення радіонуклідів з атомних підводних човнів (переважно радянських), які зазнали аварії та іржавіють на дні. За допомогою течій поживні речовини з глибокої води чи інших морських районів переносяться у верхні шари. Стовпчик Тейлора в північній півкулі є замкнутою антициклонічною структурою циркуляції води над підводною горою.



Дослід 18. Стовпчики Тейлора

Ідею дослідів взято з проєкту Массачусетського технологічного інституту Weather in Tank (<http://weathertank.mit.edu/links/projects/taylor-columns-introduction>).

Метою дослідів є відтворення процесу формування стовпчиків Тейлора.

Обладнання: обертова платформа, резервуар із квадратною основою, хокейна шайба, барвник.

Перед проведенням лабораторного дослідів запропонуйте учням ознайомитися з матеріалами з додатка 2, щоб вони могли сформулювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, щоб учні поділилися своїми прогнозами.

Експериментальна процедура

Підготовка установки. Установіть резервуар з квадратною основою на обертову платформу та помістіть на дно ре-

зервуара циліндричну вставку, що представляє перешкоду, у вигляді хокейної шайби. Вставте круглу вставку в резервуар.

Налийте в резервуар холодну воду, забезпечуючи достатній рівень для вільного руху рідини над шайбою. Увімкніть обертання платформи на частоту 5 об/хв. Дайте системі стабілізуватися протягом 10 хвилин, щоб усунути початкові турбулентності та встановити рівномірний рух води.

Поступово зменшуйте швидкість обертання до 0,1 об/хв, щоб встановити умови для формування горизонтального потоку відносно шайби. Зачекайте декілька хвилин, щоб потік стабілізувався.

Візуалізація потоку. Для візуалізації потоків рідини розмістіть паперові шматочки на поверхні води. Це дасть змогу відстежити напрямок руху та швидкість поверхневих течій.

Акуратно додайте кристали барвника у воду навколо хокейної шайби. Барвник дасть змогу спостерігати за циркуляцією рідини та формуванням стовпчиків Тейлора.

Спостереження. Спостерігайте за рухом рідини навколо шайби. Зверніть увагу на формування стовпчиків Тейлора, які проявляються як циліндричні обертові структури, що витягуються вздовж осі обертання системи та залишаються стабільними відносно інших потоків рідини.

Альтернативний метод. Якщо немає можливості провести експеримент особисто, завантажте відео за QR-кодом.

Аналіз отриманих даних. Зафіксуйте спостереження та проаналізуйте напрямки і характер руху рідини навколо шайби. Спробуйте пояснити утворення стовпчиків Тейлора з позицій гідродинаміки та впливу обертання на рідини.

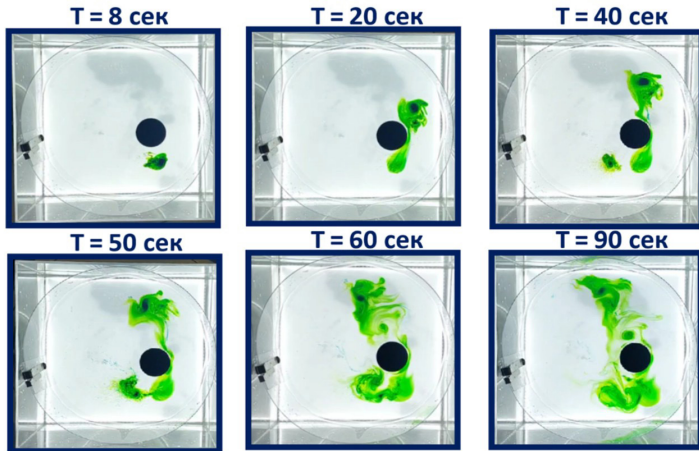


Рис. 3.43. Результат обходження потоком шайби

Обговорення після досліду. Обговоріть гіпотези, які були сформульовані учнями перед дослідом. Також обговоріть, як стовпчики Тейлора можуть впливати на перенесення поживних речовин у океанах. Наприклад, як стовпчики Тейлора можуть допомогти в переміщенні планктону та інших органічних частинок, що вплине на морські екосистеми. Розгляньте також, як ці обертові структури можуть впливати на перенесення тепла в океанах. Проаналізуйте карти океанів і морів, де можуть виникати стовпчики Тейлора. Визначте можливі місця формування стовпчиків Тейлора на основі карт глибин та течій.

Завдання. Ознайомтеся з публікацією BBC News про айсберг A23a, який крутиться на місці, «Найбільший айсберг у світі обертається в океанській пастці» від 4 серпня 2024 року.



Поясніть, чому цей айсберг не рухається і які чинники можуть сприяти його обертанню. Розгляньте, які наслідки це може мати для навколишнього середовища. Подумайте про можливий вплив на морські течії, екосистеми і кліматичні умови в регіоні.

Візьміть до уваги, як подібні природні явища можуть впливати на глобальні системи і чи можуть вони мати довгострокові наслідки для клімату та морських екосистем.

3.13. Питання та завдання до розділу 3

1. Що таке глобальна кліматична система і які її основні компоненти? Як взаємодіють різні компоненти глобальної кліматичної системи, такі як атмосфера, океани, льодовики та земна поверхня?
2. Які процеси підтримують баланс енергії в глобальній кліматичній системі? Як зміни в одному компоненті системи можуть впливати на інші компоненти?
3. Які відмінності в теплоємності між океаном і атмосферою? Як теплоємність океану і атмосфери впливає на їхню здатність до накопичення і розподілу тепла?
4. Що реагує швидше на зміни зовнішніх умов — океан чи атмосфера? Як різниця в швидкості реакції між океаном і атмосферою впливає на погодні умови і кліматичні зміни?
5. Які види даних можна отримати з льодових кернів і як вони допомагають реконструювати історію клімату?
6. Які можливі наслідки може мати підвищення рівня моря для прибережних зон у світі? Як підвищення рівня моря вплине на населення прибережних зон та інфраструктуру?
7. Які екологічні наслідки може мати підвищення рівня моря для прибережних екосистем? Які стратегії можуть бути застосовані для адаптації до підвищення рівня моря в прибережних регіонах?

8. Які процеси ведуть до утворення океанічних течій і як вони впливають на клімат?
9. Які методи використовуються для моделювання кліматичних змін і їх наслідків?
10. Лід в Антарктиді займає площу 14 млн км² і має середню товщину 2 км. Землю можна вважати кулею радіусом 6371 км, що на 70 % заповнена водою. Вода має більшу густину, ніж лід, 1 м³ льоду дорівнює 0,9 м³ води. Якщо весь лід над сушею Антарктиди розтане, на скільки підвищиться рівень моря? За допомогою карти підтоплень оцініть, які наслідки матиме таке підняття рівня моря для України.



<https://www.floodmap.net/>

11. Як зміниться рівень моря через теплове розширення води, якщо температура океану підвищиться на 0,2 °C і 0,5 °C?
12. Використайте дані, зображені на графіку (рис. 1.2), і знайдіть лінійне наближення для моделювання зростання рівня океану з 1993 по 2020 рік. Проаналізуйте швидкість зростання рівня океану. З огляду на виявлені тенденції, на скільки зросте рівень океану у 2100 році?
13. Враховуючи конкретний прибережний регіон та його поточну висоту, розрахуйте час, який знадобиться для підвищення рівня моря, щоб досягти критичного рівня, що потенційно спричинить значний вплив на інфраструктуру та придатність для проживання. Для цього скористайтеся інтерактивною картою підтоплень.



<https://www.floodmap.net/>

14. Порівняйте ефективність різних стратегій пом'якшення наслідків змін клімату щодо підвищення

рівня моря за допомогою симулятора кліматичних рішень En-ROADS.



15. Що більше впливає на густину світового океану — температура чи солоність?
16. Червоне море є одним із найсолоніших морів у світі. Влітку середня температура води біля поверхні може досягати 30 °C, а солоність — 40 PSU. Визначте густину морської води на поверхні (0 dbar), використовуючи рівняння стану UNESCO.
17. У найглибшій частині океану — Маріанській западині (глибина $\approx 10\,900$ м) — температура води становить приблизно 1,0 °C, а солоність — 35 PSU. Визначте густину води на цій глибині, якщо тиск становить приблизно 10 900 dbar.
18. Які регіони океанів найбільше залежать від змін у температурі, а які — від змін у солоності? Як вплив температури і солоності на густину води може змінювати океанічні течії і циркуляцію?
19. Що таке аномалія густини води? Які приклади природних явищ або кліматичних подій пов'язані з аномаліями густини води?
20. Поясніть, як аномалія густини води впливає на життя риб у прісних водоймах. Як зміни густини води можуть впливати на доступність кисню і розчинених поживних речовин у прісних водоймах?
21. У чому полягає причина явища дифузії? Які фізичні принципи лежать в основі дифузії на молекулярному рівні?
22. Як дифузія впливає на процеси у водних середовищах? Які приклади явищ у природі і техніці ілюструють процеси дифузії?
23. Які фактори впливають на дифузію? Як температура, концентрація речовини та тиск впливають на швидкість дифузії?

24. Які умови сприяють прискоренню дифузійних процесів у рідинах і газах?
25. Чому підвищення температури прискорює процеси дифузії на молекулярному рівні?
26. Як впливає утворення льоду на солоність поверхневих вод?
27. Шматок льоду плаває у прісній воді. Яка його частина занурена у воду?
28. Шматок льоду плаває в океанічній воді. Яка його частина занурена у воду?
29. Що таке термоклин і як він формується?
30. Розрахуйте швидкість внутрішніх хвиль, які поширюються в резервуарі із двошаровою рідиною із метровим шаром прісної води на поверхні та шаром солоні води із солоністю 35 проміле із глибиною 20 метрів. Температура води 25 °С.
31. Як відбувається взаємодія між холодною густою водою полярних регіонів і теплою менш густою водою тропіків у процесі термохалінної циркуляції?
32. Як термохалінна циркуляція впливає на глобальний клімат і перенос тепла від екватора до полюсів?
33. Що таке термохалінна катастрофа? Які потенційні зміни у термохалінній циркуляції можуть призвести до термохалінної катастрофи?
34. Як зміни в таненні льодовиків і збільшення кількості прісної води можуть вплинути на стабільність термохалінної циркуляції?
35. Які наслідки термохалінна катастрофа може мати для глобального клімату, включаючи зміни температури, циркуляції атмосферних систем і рівня моря?
36. Які фізичні процеси роблять течію Гольфстрім однією з найвужчих і найшвидших течій у Світовому океані?
37. Що таке стовпчики Тейлора? Як утворюються стовпчики Тейлора в рідині, що обертається, і які чинники впливають на їхній розмір і стійкість?

Розділ 4. АТМОСФЕРА

У ЦЬОМУ РОЗДІЛІ МИ:

1. Повторимо основні характеристики атмосфери.
2. Опишемо горизонтальну та вертикальну структуру атмосфери.
3. Зрозуміємо механізми теплової конвекції.
4. Утворимо конвекцію для різних типів стратифікації.
5. Зрозуміємо механізми утворення хмар.
6. Створимо власну хмару в банці.
7. Визначимо, як впливає обертання Землі і нерівномірне нагрівання нашої планети на циркуляцію земної атмосфери.
8. Дізнаємося про причини утворення кінських широт і обґрунтування такої назви.
9. Дізнаємося про вихори різних масштабів.
10. Вивчимо механізми утворення атмосферних вихорів.
11. Дізнаємося, що таке циклон і антициклон.
12. Створимо ураган в лабораторії та вивчимо його внутрішню структуру.

4.1. Горизонтальна структура атмосфери та її характеристики

Атмосфера Землі, подібно до океанів, утворює тонку газову оболонку навколо сферичної планети. Вона зазнає впливу гравітаційних сил, обертання Землі та сонячного випромінювання. Ці фактори створюють унікальні умови, які формують горизонтальний розподіл атмосферних характеристик.

Завдяки сферичній формі Землі сонячні промені потрапляють на її поверхню під різними кутами в різних широтах (формули (2.3)–(2.5)). Як результат, енергія сонячного випромінювання на одиницю площі поверхні є значно більшою на екваторі, де промені падають практично перпендикулярно, ніж на полюсах, де вони розподілені по більшій площі. Це призводить до того, що температура атмосфери в екваторіальному поясі значно вища, ніж у полярних регіонах. Ми розглядали це в розділі 2.

Різниця температур у різних частинах Землі спричиняє відмінності в атмосферному тиску. Це змушує повітря рухатися, утворюючи вітри. Вітри переносять тепло і вологу по планеті, впливаючи на погоду і клімат у різних регіонах. На рис. 4.1 показано, як горизонтальні зміни температури і тиску зумовлюють формування різних атмосферних циркуляційних систем, таких як тропічні циклони, антициклони та пасати. Ці процеси є важливими для розуміння кліматичних умов і метеорологічних явищ на Землі.

Тепло від теплих тропіків рухається до прохолодних високих широт, тим самим відіграючи головну роль у формуванні клімату. Якби вісь Землі не була нахилена відносно орбітальної площини, максимальний середній потік енергії

Сонця на екваторі становив би: $S_{\max} = \frac{S_0}{\pi} = 435 \text{ Вт/м}^2$, де S_0

визначається з формули (2.1), та монотонно спадав би до

нуля на полюсах. Завдяки нахилу осі Землі полюси отримують сонячне світло протягом літнього півріччя (залежність потоку енергії Сонця від широти відображено на рис. 4.1, б).

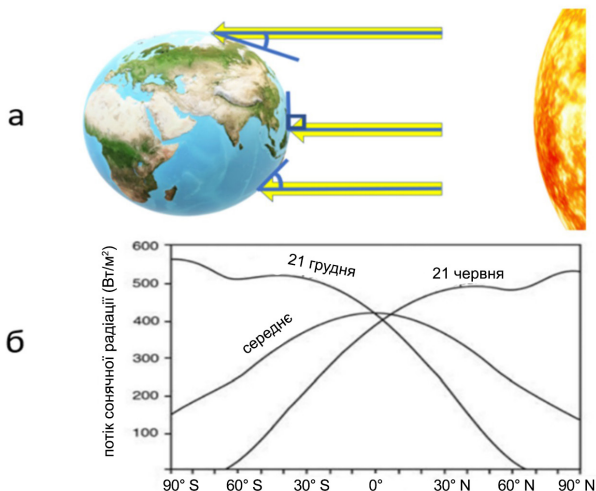


Рис. 4.1: а) сонячна радіація, що досягає районів на більш високих широтах, менш інтенсивна, ніж сонячна радіація, яка досягає тропіків; б) розподіли потоку енергії Сонця в дні сонцестояння та середньорічне середнє значення

Атмосфера Землі різноманітна за своїм складом, що впливає на її властивості та функціонування. Основні компоненти атмосфери — азот (N_2) і кисень (O_2). Азот становить приблизно 78,08 % обсягу атмосфери, кисень — близько 20,95 %. Ці гази є основними компонентами, які підтримують життя на Землі й забезпечують необхідні умови для дихання.

Окрім азоту і кисню, в атмосфері містяться інші гази в менших кількостях. Аргон, інертний газ, становить близько 0,93 % обсягу атмосфери. Вуглекислий газ (CO_2) також є важливим компонентом, хоча його концентрація значно менша і становить приблизно 0,03 %. Ще один важливий компо-

нент — атмосферна водяна пара, її кількість варіює і зазвичай становить близько 0,5 % обсягу атмосфери. Основним джерелом водяної пари є випаровування з поверхні океанів, морів, річок та інших водних тіл. Водяна пара відіграє критичну роль в атмосферних процесах, оскільки є значним поглиначем і випромінювачем інфрачервоних променів. Це впливає на тепловий баланс Землі і є важливим чинником у формуванні парникового ефекту, про який ми вже згадували в розділі про глобальне потепління.

Отже, кожен із компонентів атмосфери має свою унікальну роль і значення. Взаємодія між цими компонентами, включаючи водяну пару, аргон і вуглекислий газ, створює складний механізм, який регулює клімат і погоду на Землі.

Фізичні властивості повітря: основні характеристики атмосфери Землі наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Характеристики атмосфери Землі

Маса атмосфери	$5,26 \times 10^{18}$ кг
Об'єм атмосфери	$3,82 \times 10^{12}$ км ³
Глобальний середній приземний тиск	$1,013 \times 10^5$ Па
Глобальна середня температура поверхні	14,8 °C
Глобальна середня поверхнева густина	1,235 кг/м ³

4.2. Вертикальна структура атмосфери. Атмосферна конвекція

Температура на різних ділянках Землі різна, але спосіб, у який вона змінюється з висотою, загалом однаковий у всіх місцях. Вона має певний «типовий» профіль. На рис. 4.2 показано, як температура змінюється з висотою (до 100 км) у грудні на 40° пн. ш.

Атмосферний температурний профіль є значно складнішим порівняно з океанічним профілем температури і не надається до простого опису. Проте варто зауважити, що (зважаючи на масу) середня температура атмосфери наближається до -18°C . На графіку температурного профілю атмосфери видно три основні екстремуми, які відповідають висотам, де сонячне випромінювання поглинається на різних довжинах хвиль в основних шарах атмосфери: термосфері, стратосфері та тропосфері. Ці екстремуми чітко розмежовують атмосферу на різні шари.

Тропосфера — це найнижчий і найщільніший шар атмосфери, де зосереджена більша частина повітряної маси та відбуваються всі основні погодні процеси. Верхня межа тропосфери розташована на висоті 8–10 км у полярних широтах, 10–12 км у помірних широтах і 16–18 км у тропічних широтах. Цей шар містить понад 80 % усієї маси атмосферного повітря і близько 90 % усієї водяної пари в атмосфері. Тропосфера характеризується інтенсивною турбулентністю та конвекцією, що призводить до формування хмар, а також до розвитку циклонів і антициклонів. Тут відбуваються найбільш динамічні атмосферні процеси, які визначають погоду на Землі.

Стратосфера розташована вище тропосфери і простягається від висоти 11 до 50 км. У нижній частині стратосфери (11–25 км) зміна температури незначна, тоді як у верхній частині (25–40 км) температура зростає від $-56,5^{\circ}\text{C}$ до $0,8^{\circ}\text{C}$. На рівні 40 км температура стабілізується близько 0°C і залишається такою до висоти приблизно 55 км. Верхній шар стратосфери, також відомий як область інверсії, характеризується стабільними температурними умовами завдяки наявності озонового шару, який поглинає ультрафіолетове випромінювання і нагріває стратосферу.

Мезосфера починається на висоті близько 50 км і тягнеться до 80–90 км. У мезосфері температура з висотою знижується, і вертикальний градієнт температури становить

приблизно $0,25\text{--}0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 100 м. Це зниження температури викликане тим, що в мезосфері відбувається поглинання космічного випромінювання і недостатня кількість водяної пари, що знижує здатність шару до утримання тепла. Мезосфера також є важливою для метеорних явищ — багато метеорів згорають саме в цьому шарі атмосфери.

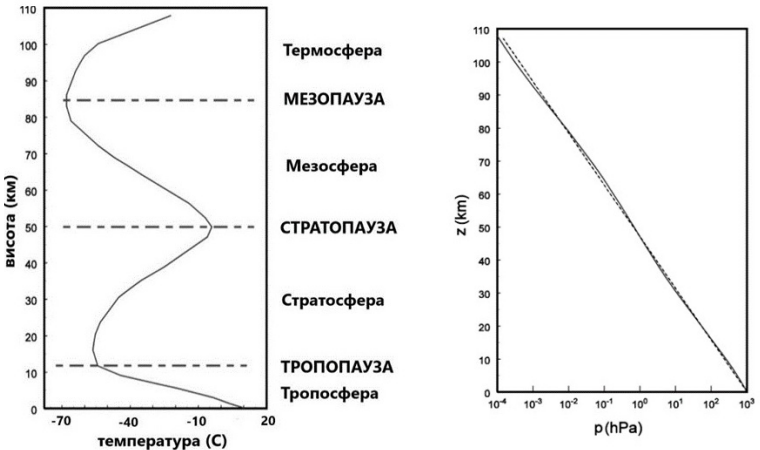


Рис. 4.2. Типовий температурний профіль та профіль тиску для атмосфери Землі (характеристика 40° пн. ш. у грудні)

Вважають, що границя атмосфери Землі та іоносфери розташована на висоті 118 кілометрів. Про це свідчить аналіз параметрів руху високоенергетичних частинок, що переміщуються в атмосфері та іоносфері.

Якщо ми говоримо про «погоду» та процеси, що її формують, то майже всі вони відбуваються в тропосфері, на якій і буде сфокусовано нашу увагу.

На відміну від океану, максимальна температура та густина повітря спостерігається саме на поверхні Землі, а нагрівання тропосфери значною мірою відбувається шляхом конвекції з нижнього шару. Варто також зазначити, що по-

вітря, на відміну від рідини, є стисливим (при збільшенні тиску p при постійній температурі T густина ρ зростає) і має відносно великий коефіцієнт теплового розширення (при збільшенні температури T при постійному тиску p густина ρ зменшується). Ці властивості мають важливі наслідки, які ми розглянемо нижче.

Атмосферна конвекція

Земля випромінює тепло не лише з поверхні, а й із верхніх шарів тропосфери — і це тепло потрапляє в космос. Однак значна частина випромінювання з поверхні поглинається атмосферою і не залишає Землю. При цьому поверхня розігрівається як від прямого сонячного випромінювання, так і від розсіяного та багаторазово перевідбитого випромінювання атмосфери. Як наслідок, поверхня Землі може ставати теплішою за атмосферу.

Конвекція в атмосфері, яка є явищем переносу тепла, являє собою вертикальні переміщення об'ємів повітря з одних висот на інші, зумовлені архімедовою силою. Тепле повітря, яке має меншу густину, ніж навколишнє, піднімається вгору, тоді як холодніше повітря з більшою густиною опускається вниз. В умовах сильної конвекції над окремими ділянками земної поверхні виникають висхідні та низхідні повітряні течії, що проникають іноді до стратосфери. Вертикальна швидкість висхідних струменів (терміків) зазвичай становить кілька метрів за секунду, але іноді може досягати і перевищувати 20–30 метрів за секунду.



Дослід 19. Атмосферна конвекція

Метою дослідів є відтворення теплової конвекції.

Обладнання: плаский вертикальний резервуар, вода, сіль, барвники, три склянки.

Перед проведенням лабораторного дослідів запропонуйте учням ознайомитися з матеріалами з додатка 2 і сформу-

лювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, щоб учні поділилися своїми прогнозами.

Експериментальна процедура

Підготовка резервуара. Заповніть плаский вертикальний резервуар холодною водою, наповнивши його на третину або половину.

Установка резервуара. Встановіть резервуар на двох склянках, розташованих так, щоб між ними був простір для розміщення третьої склянки. Переконайтеся, що резервуар стійкий і не нахилиється.

Підготовка гарячої води. Наповніть третю склянку гарячою водою і поставте її під резервуаром. Гаряча вода створюватиме тепловий потік, який сприятиме виникненню конвекційних течій.

Внесення барвника. Через кілька хвилин після того, як гаряча вода під резервуаром почне впливати на нижній шар холодної води, додайте кілька крапель барвника по краях резервуара. Барвник допоможе візуалізувати конвекційні потоки в рідині.

Спостереження. Спостерігайте за процесом перемішування рідини. Зверніть увагу на те, як барвник розподіляється по резервуару, що дасть вам змогу спостерігати утворення конвекційних течій. Ви маєте побачити, як гаряча вода піднімається, а холодна вода опускається, створюючи характерні візуальні патерни.

Аналіз результатів. Проаналізуйте спостереження, звертаючи увагу на ефекти теплової конвекції. Обговоріть, як зміни температури води призводять до утворення конвекційних течій і перемішування рідини.

Альтернативний варіант. Якщо немає можливості провести експеримент, скористайтеся QR-кодом.

Аналіз отриманих даних

У цьому експерименті вода в лотку представляє земну атмосферу, тоді як склянка з гарячою водою імітує екваторіальну зону. Процес, який ми спостерігаємо в експерименті, є спрощеною моделлю вертикальної циркуляції, характерної для районів, близьких до екватора. Ця циркуляція відома як «комірка Гадлі» (Hadley cell).

У нашій моделі гаряча вода під лотком імітує високі температури в екваторіальній зоні, що призводить до підйому води в лотку, тоді як холодна вода по боках моделює більш прохолодні області біля полюсів. Цей процес відображає основи комірки Гадлі, де тепле повітря піднімається, а охолоджене опускається, створюючи конвекційні потоки.

Більш докладно про комірку Гадлі буде йтися нижче, ми розглянемо її роль у формуванні глобальних погодних умов і кліматичних зон на Землі.

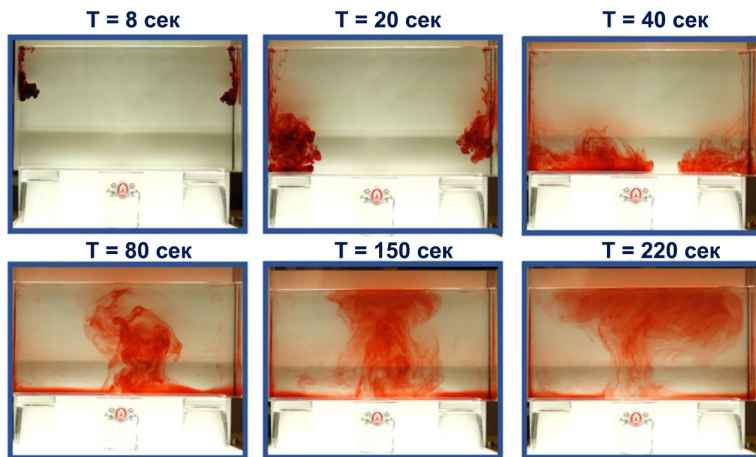


Рис. 4.3. Хід дослідів, що демонструє теплову конвекцію у резервуарі з водою

Обговорення після досліду. Обговоріть гіпотези, сформульовані учнями перед дослідом. Зверніть увагу, як гаряча вода піднімається від склянки з гарячою водою, створюючи висхідний потік, і як холодна вода опускається з боків резервуара, утворюючи низхідні потоки. Поясніть, чому гаряча вода піднімається. Гаряча вода має меншу густину порівняно з холодною, тому вона піднімається вгору. Холодна вода, навпаки, є більш щільною і опускається вниз, створюючи конвекційний цикл. Поставте питання, як принципи конвекції використовуються у повсякденному житті. Чи можна побачити аналогічні процеси в природі або техніці? Наприклад, як конвекція впливає на рух повітря в приміщеннях або нагрівання води в чайнику. Обговоріть, як розуміння конвективних процесів допомагає прогнозувати погоду та кліматичні умови. Наприклад, роль конвекції у формуванні штормів та інших погодних явищ.

4.3. Фізичні властивості повітря.

Утворення хмар при адіабатичному розширенні

Вологість повітря визначається кількістю водяної пари в атмосфері, причому майже вся водяна пара зосереджена в приземному шарі тропосфери, до висоти приблизно 5000 метрів. Вміст водяної пари в повітрі називають вологістю повітря, і він характеризується абсолютною вологістю, яка визначається як маса водяної пари на одиницю об'єму повітря. Точка роси — це температура, до якої потрібно охолодити повітря, щоб воно досягло насичення водяною паром; досягши цієї температури, повітря стає насиченим, і починає конденсуватися водяна пара у вигляді крапель туману або роси. З підвищенням висоти вологість зменшується, оскільки частина водяної пари конденсується і випадає у вигляді опадів; приблизно по-

ловина водяної пари в атмосфері міститься в приземному шарі до висоти 1,5 кілометра.

Адіабатичний процес — це процес, під час якого змінюється стан тіла без обміну теплом із навколишнім середовищем. У такому процесі зміни в стані тіла, наприклад газу, відбуваються завдяки стисканню чи розширенню, що супроводжується змінами тиску і температури, але без теплового обміну. Це можливо, коли процес відбувається дуже швидко, наприклад під час швидкого підйому повітряних мас.

Явище адіабатичного розширення можна спостерігати під час утворення хмар, особливо біля гірських вершин. Коли тепле й вологе повітря піднімається вгору схилами гір, воно опиняється під дією меншого атмосферного тиску і зазнає адіабатичного розширення. Це розширення призводить до охолодження повітря. Як результат, водяна пара конденсується у вигляді маленьких крапельок води, які формують хмари. При подальшому охолодженні може виникати дощ або сніг. Для демонстрації цього ефекту можна також використовувати простий домашній метод: наприклад, видихання на холодне скло чи скляну поверхню. Волога, що міститься у видихнутому повітрі, конденсується на холодній поверхні, що демонструє принципи адіабатичного охолодження і конденсації.

Ми ж проведемо більш складний дослід для ілюстрації того, як утворюються хмари при адіабатичному розширенні.

Демонстрація 3. Утворення хмар при адіабатичному розширенні

Мета: продемонструвати утворення хмар при адіабатичному розширенні.

Обладнання: пластикова пляшка з кришкою та медичний спирт.

Хід демонстрації. Залежність тиску насиченої пари від температури можна легко продемонструвати за допомогою

простого експерименту. Для цього знадобиться медичний спирт і пластиковий контейнер (наприклад, пляшка).

Підготовка експерименту. Налийте невелику кількість медичного спирту в пластикову пляшку. Спирт швидко випаровується і має високу летучість, що дає змогу продемонструвати ефект зміни тиску пари.

Процедура. Після заповнення пляшки спиртом закрийте її кришкою і потрусіть пляшку, щоб спирт рівномірно розподілився всередині. Це дасть можливість створити певну кількість випарів у пляшці.

Скручування пляшки. Стисніть пляшку, скручуючи її руками. Це підвищить тиск всередині пляшки, оскільки тиск насиченої пари збільшується з підвищенням температури, що досягається за рахунок стискання.

Відпускання пляшки. Після того як ви натиснули на пляшку, швидко відпустіть її, щоб дати пляшці відновити свою первісну форму. У цей момент всередині пляшки відбудеться швидке розширення газів і зниження тиску, що призведе до зменшення температури насиченої пари.

Спостереження. Коли пляшка повертається до своєї форми, всередині утворюється конденсат у вигляді дрібних крапельок або хмари. Це явище відбувається через те, що зниження тиску та температури спричиняє конденсацію випарів спирту, які не можуть залишатися в газоподібному стані при зниженні температури.

Повторення демонстрації. Ви можете повторити цей процес кілька разів, щоб краще проілюструвати залежність тиску насиченої пари від температури. Щоразу спостерігайте, як змінюється розмір утворюваної хмари залежно від інтенсивності скручування і швидкості відновлення пляшки. Цей експеримент ефективно демонструє, як зміни тиску й температури впливають на конденсацію водяної пари або спирту, ілюструючи основи термодинамічних процесів.

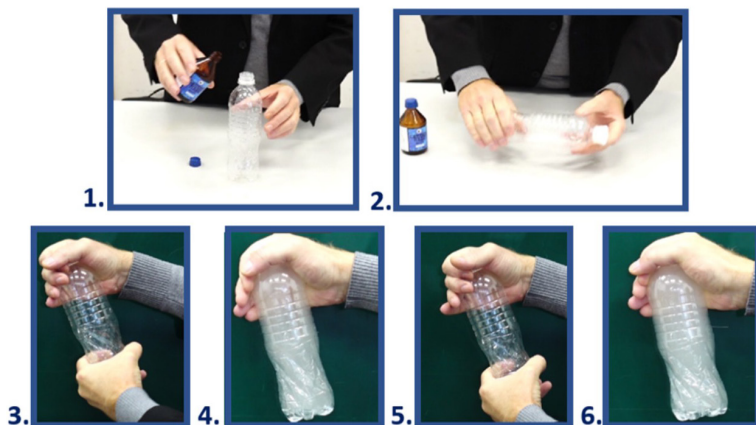


Рис. 4.4. Хід демонстрації утворення хмар при адіабатичному розширенні

Цей процес утворення хмар при різкому зниженні тиску і конденсації на частинках медичного спирту дуже схожий на природне утворення хмар в атмосфері.

Таким чином, швидке адіабатичне розширення повітря знизить його температуру і, отже, знизить тиск насиченої пари достатньо, щоб пари конденсувались, утворюючи краплі води, «хмару в банці».

4.4. Загальна атмосферна циркуляція та атмосферні комірки

Згадаймо гіпотетичний випадок циркуляції водних мас під дією гравітації на однорідній нерухомій Землі, який був продемонстрований в експерименті Марсильї: вода з більшою густиною рухалась у нижніх шарах, а з меншою густиною — у верхніх. Подібно до цього циркуляція в атмосфері виникає через різницю тиску, що обумовлюється нерівномірним нагріванням. Таким чином, і в океані, і в атмосфері

ми б могли спостерігати одну гігантську циркуляційну комірку між теплим екватором і холодним полюсом. Проте в реальності загальна схема циркуляції атмосфери значно складніша, оскільки на потоки впливає також відхиляюча сила обертання Землі та неоднорідність поверхні, що зумовлює різницю температур повітря на тих самих широтах.

Який же вигляд має циркуляція атмосфери на Землі, що обертається? Під дією сили Коріоліса повітряні потоки, що рухаються від екватора до полюсів, починаючи з широти $10\text{--}15^\circ$ у північній півкулі постійно відхиляються вправо, а у південній – вліво. У цих широтах вітри дмуть вздовж паралелей. Як показано на рис. 4.5, відхилення сили Коріоліса збільшується від нуля на екваторі до максимуму на полюсах.

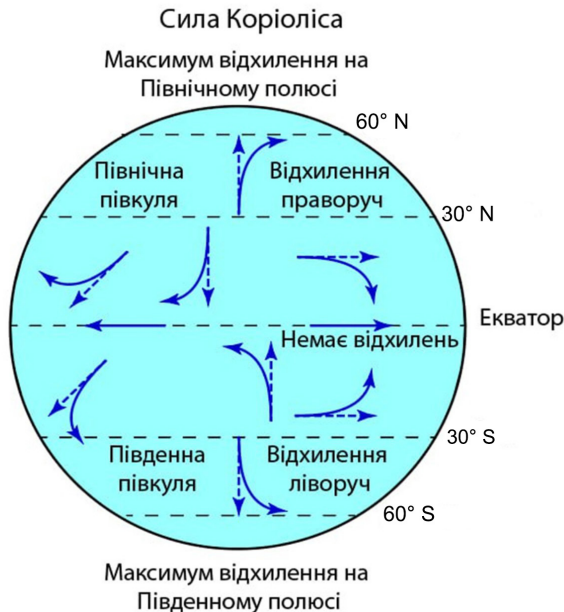


Рис. 4.5. Схема, що демонструє відхилення сили Коріоліса

У результаті повітряні потоки між екватором і полюсами поділяються на шість основних комірок, кожній із яких притаманні свої унікальні характеристики вітру. Ці комірки є осередками глобальної атмосферної конвекції, що відіграють ключову роль у загальній циркуляції атмосфери Землі. Вони поділяють атмосферу на різні зони, кожна з яких має свою специфічну температуру та характеристики опадів.

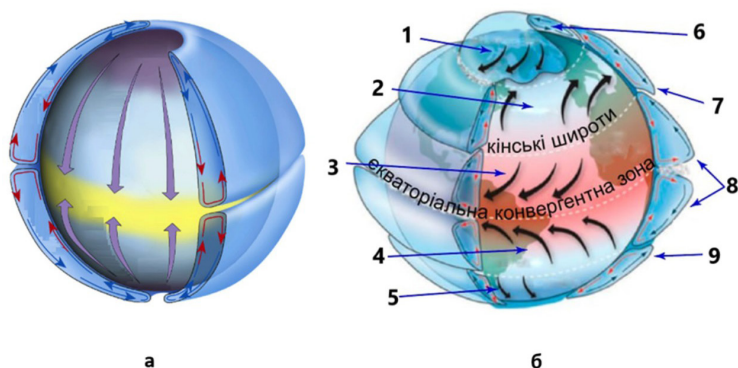


Рис. 4.6. Циркуляційні атмосферні комірки: а) без обертання Землі; б) з обертанням Землі: 1) східні вітри полярних регіонів; 2) і 5) західні вітри; 3) північно-східний пасат; 4) південно-східний пасат; 6) полярна комірка; 7) і 9) комірка Феррела; 8) комірка Гадлі

Глобальними елементами атмосферної циркуляції у тропосфері є три (у кожній півкулі) циркуляційні комірки — комірка Гадлі, комірка Феррела, полярна комірка.

Як ми вже продемонстрували раніше, неоднорідне нагрівання атмосфери є джерелом висхідних потоків у тропіках та низхідних потоків у високих широтах. Англійський метеоролог-аматор Джордж Гадлі вперше запропонував такого роду циркуляцію для опису механізму виникнення пасатів. Зараз ця атмосферна комірка відома як **комірка Гадлі** (рис. 4.6, б). Ця комірка обмежується тропіками, характери-

зується висхідними потоками повітряних мас біля екватора, спрямованими до полюсів потоками на висоті 10–15 км, низхідними потоками в субтропіках і потоками в напрямку до екватора біля поверхні. Спрощену модель цієї комірки ми описували вище. Ця циркуляція безпосередньо пов'язана з пасатами, що, як і західні вітри, були основним чинником побудови маршрутів руху суден у сполученні між Європою та Новим Світом.

Кінські широти (рис. 4.6, б) — райони Світового океану у північній та південній півкулях між 30–35° північної і південної широти відповідно. У цих широтах повітря, що піднялося на екваторі, рухається донизу, утворюючи зони дивергенції (розбіжності) вітрів у нижньому шарі повітря. Повітря, що опускається, є відносно сухим, тому в цих широтах невеликі хмарність і кількість опадів. У XVI–XIX століттях, за часів вітрильного мореплавства, штилі викликали тривалі затримки суден у плаванні, і через нестачу питної води доводилося викидати за борт коней, яких везли з Європи до Нового Світу. Звідси і пішла назва — кінські широти.

Комірка Феррела (рис. 4.6, б) — елемент циркуляції земної атмосфери в помірному поясі, приблизно між 30 і 65 градусами північної широти та 30 і 65 градусами південної широти, обмежена субтропічним хребтом з екваторіального боку та полярним фронтом з полярного. Комірка Феррела вважається другорядним циркуляційним елементом і повністю залежить від комірки Гадлі та полярної комірки. Приповерхневі вітри, що переважають у цій комірці, називаються західними вітрами.

Теорія динаміки цієї комірки була розроблена американським метеорологом Вільямом Феррелом у 1856 році.

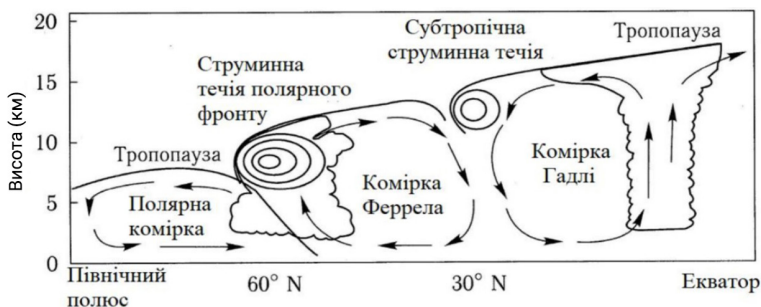


Рис. 4.7. Циркуляційні комірки

Полярна комірка (полярний вихор) — елемент циркуляції земної атмосфери у приполярних районах Землі, має вигляд приповерхневого вихору, що закручується на захід на Північному полюсі. Це досить простий вихор, рушійною силою якого є різниця в нагріванні земної поверхні біля полюсів і на помірних широтах.

Як впливають зміни клімату на атмосферні комірки?

Як ми вже згадували, Арктика нагрівається набагато швидше, ніж інші регіони планети. Це швидке потепління має суттєвий вплив на струминну течію полярного фронту — вузьку смугу сильних вітрів, що циркулює у верхніх шарах атмосфери (див. рис. 4.7, 4.8) і відіграє важливу роль у визначенні погодних умов у північній півкулі. Зі зростанням температури в Арктиці полярний фронт ослаблюється і стає менш стабільним. Це ослаблення призводить до зміни траєкторії струминної течії, яка починає відхилятися від свого звичного маршруту і може заходити далі на південь. Як наслідок, це впливає на атмосферні процеси та погодні умови в таких регіонах, як Північна Америка, Європа та Азія. Зміщення полярного вихору на південь може спричинити екстремальні погодні явища, такі як сильні снігопади і морозні температури, навіть у південних областях, де раніше такі умови були рідкісними. Отже, випадання снігу

в південних регіонах можна розглядати як один із проявів кліматичних змін, що відбуваються внаслідок глобального потепління і його впливу на атмосферні процеси. Ці зміни в атмосферних умовах можуть мати серйозні наслідки для екосистем, інфраструктури і людей, тому їх важливо ретельно вивчати та враховувати при плануванні адаптаційних заходів до змін клімату.

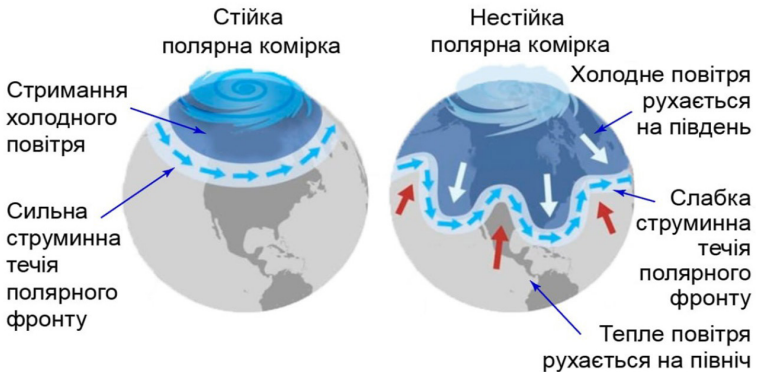


Рис. 4.8. Стойкая полярная ячейка и нестойкая полярная ячейка, что возникает в результате нагревания планеты

За допомогою обертової установки продемонструємо структуру полярної комірки. Тут ми зможемо змоделювати як різницю температур, так і обертання.



Дослід 20. Атмосферні комірки

Ідею досліду взято з проекту Массачусетського технологічного інституту Weather in Tank (<http://weathertank.mit.edu/links/projects/taylor-columns-introduction>).

Метою досліджу є відтворення процесу формування та дослідження структури атмосферних комірок.

Обладнання: обертова платформа, квадратний резервуар із круглою вставкою, відерце з льодом, барвники, відеокамера, ПК.

Перед проведенням лабораторного досліду запропонуйте учням ознайомитися з матеріалами з додатка 2 і сформулювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, щоб учні поділилися своїми прогнозами.

Експериментальна процедура

Установка відеокамери. Закріпіть відеокамеру на щоглі обертової платформи, щоб забезпечити хороший огляд усього експериментального процесу.

Підготовка резервуара. Помістіть квадратний резервуар із круглою вставкою на обертову платформу. Наповніть резервуар водою кімнатної температури. Переконайтеся, що він стабільно закріплений і рівно розташований на платформі.

Розміщення льоду. У центрі резервуара встановіть відерце з льодом. Це імітує вплив холодної області в атмосфері, наприклад полярні шапки або висоти.

Налаштування обертання. Увімкніть обертання платформи з кутовою швидкістю $\Omega = 1$ рад/с і дайте їй працювати протягом 10 хвилин. Увімкніть відеозапис, щоб зафіксувати процес.

Додавання барвників. Додайте кілька крапель синього барвника поблизу відерця з льодом, щоб відобразити холодні ділянки. Поруч із круглою вставкою додайте кілька крапель червоного барвника, що імітує теплі ділянки.

Спостереження та запис. Спостерігайте за утворенням циркуляційних комірок в резервуарі та здійснюйте відеозапис процесу. Звертайте увагу на формування конвекційних потоків і зміни кольору, що демонструють різницю в температурі.

Зміна швидкості обертання. Повторіть експеримент, збільшуючи швидкість обертання платформи. Це дасть змо-

гу дослідити, як зміни в швидкості обертання впливають на структуру атмосферних комірок.

Аналіз результатів. Проаналізуйте отримані відеозаписи, звертаючи увагу на зміни в структурах атмосферних комірок при різних швидкостях обертання. Порівняйте результати з теоретичними моделями атмосферної циркуляції.

Альтернативний варіант. Якщо немає можливості провести експеримент, скористайтеся QR-кодом.

Цей експеримент допомагає візуалізувати принципи атмосферної циркуляції, включаючи формування конвекційних комірок, що є основою для розуміння глобальних атмосферних процесів.

Аналіз отриманих даних

Як і в попередньому експерименті, вода в нашій моделі — це атмосфера, відерце з льодом — полярний регіон, блакитна вода — холодне арктичне повітря, а червона вода — тепле повітря. Під час дослідів бачимо, що смуги барвника не залишаються вертикальними, а відхиляються в азимутальному напрямку.

Для $\Omega = 1$ рад/с масштаб довжини вихору становить близько 10 см, що дає число Россбі 0,01. У цьому випадку рух близький до геострофічної рівноваги (за винятком дна та бічних стінок, де тертя стає важливим). Отже, ми побачили, що різниця температур спричиняє в лабораторному басейні рух, характер якого залежить від швидкості обертання апарата. За повільного обертання для $\Omega = 1$ рад/с структура течій показана на рис. 4.9. У цьому експерименті вода, що охолоджується завдяки льодовому відру, опускається і радіально витікає назовні по дну. Як компенсаційний потік вода піднімається і просувається всередину, а потім — у верхні шари.

Як бачимо з рис. 4.9, язички холодної й теплої рідини переплітаються, ковзаючи один над одним. Язички теплового повітря рухаються на північ до полюса, тоді як холодне

повітря, навпаки, рухається на південь до екватора, врівноважуючи градієнт температури полюс — екватор. У середніх широтах вихори переносять тепле повітря від помірних широт до полюса, а холодне — від полюса до помірних широт. Отже, вихори мають тенденцію «перемішувати» атмосферу, зменшуючи температурний контраст між екватором і полюсом.

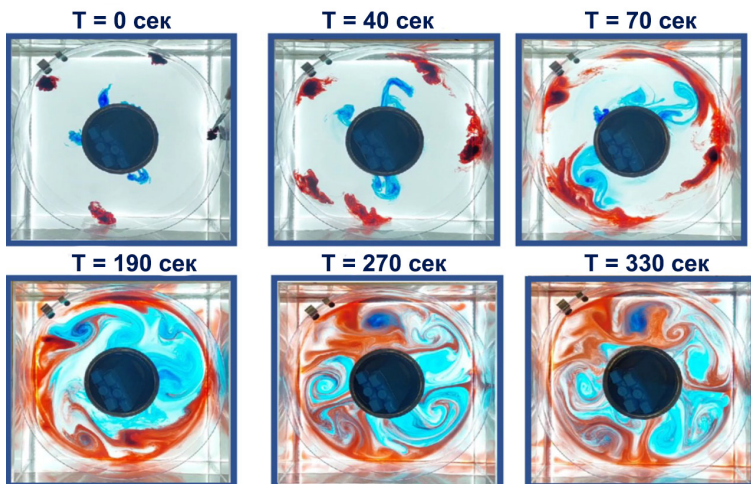


Рис. 4.9. Результати дослідів із обертанням ($\Omega = 1$ рад/с)
для різних моментів часу

Ця модель демонструє ще одне важливе явище в атмосфері — **атмосферні річки**. За даними управління океанічних та атмосферних досліджень (NOAA), атмосферні річки — це довгі потоки води, що рухаються в атмосфері, «подібно до річок у небі» (див. рис. 4.10). Вони тягнуться від тропіків до середніх широт і несуть у собі величезні обсяги води — за деякими даними, приблизно стільки само, скільки в середньому річка Амазонка. Коли ця «річка» досягає землі, починається сильний дощ, який зазвичай спричиняє повінь.

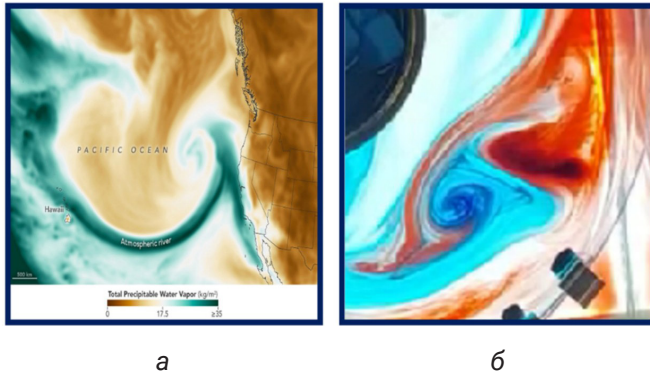


Рис. 4.10: а) атмосферна річка, яка наближається до Каліфорнії. Високий рівень вологості має темно-зелений колір, а низький рівень вологості – коричневий [6]; б) частина обертового басейну з експерименту з обертаннями ($\Omega = 1$ рад/с)

Обговорення досліджу. Обговоріть гіпотези, сформульовані учнями перед дослідом.

Повторюючи дослід при різних значеннях Ω , спостерігаємо, що масштаб вихорів зменшується. Механізм утворення цих вихорів подібний до механізму, що лежить в основі створення систем атмосферної погоди. При кліматичних змінах полюси нагріваються швидше за інші ділянки, що, своєю чергою, змінює положення північних вихорів, і тому вони іноді заходять глибше у бік екватора. Саме тому ми можемо спостерігати періоди дуже холодної погоди там, де її ніколи не було. Це є також ознакою кліматичних змін.

Про вихори та їхню структуру ми поговоримо в наступному розділі.

4.5. Вихори в атмосфері

Як ми вже зауважили, атмосфера є надзвичайно динамічним середовищем, де безперервно формуються та розпадаються вихори різного розміру (див. таблицю 4.4). Ті, які мають швидкості вітру від 100 до 200 м/с, відомі як торнадо (в Європі їх називають тромбами). Вихори мають величезну руйнівну силу, здатну піднімати автомобілі в повітря, виривати з корінням вікові дерева й завдавати серйозної шкоди будівлям та інфраструктурі.

Торнадо можуть мати діаметр від 10 метрів до 1–2 кілометрів і існувати від кількох хвилин до кількох годин. Їхнє існування може бути дуже коротким або, навпаки, довгим, залежно від умов, що сприяють їх утворенню і розвитку. Вони є прикладом екстремальних атмосферних явищ, які можуть мати значний вплив на навколишнє середовище і людське життя. Слід зазначити, що у всіх вихорах малих масштабів, таких як смерчі, торнадо та менших, основну роль відіграє відцентрова сила і початкова завихреність в атмосфері, а не сила Коріоліса. Дослідження цих вихорів допомагає краще розуміти механізми їх формування і впливу, що, своєю чергою, сприяє розвитку методів прогнозування і зменшення пов'язаних із ними ризиків.

Таблиця 4.4. Приклади вихорів і їхні типові розміри

Вихор	Розмір
Вихори від літака	1–2 м
Пилові дияволи	1–10 м
Торнадо (тромби), смерчі	10–2000 м
Урагани, тайфуни, циклони	100–2000 км
Велика червона пляма Юпітера	25 000 км
Спіральні галактики	тисячі світлових років

Великі атмосферні вихори (розмірами від сотень до кількох тисяч кілометрів) виникають у різних частинах земної кулі внаслідок обертання Землі.

Циклон — це атмосферний вихор, який приносить із собою негоду та різкі зміни температури. У північній півкулі повітря в циклоні обертається проти годинникової стрілки. Повітря, що рухається до центру циклону, повільно підіймається вгору, а в повітрі, що підіймається, завжди утворюються хмари, з яких випадає або дощ, або сніг. У тих районах, де циклон ще «молодий» (на початку траєкторії), якраз і відзначаються зони сильних опадів. Циклони поділяються на два основних види — *позатропічні* і *тропічні*. Позатропічні циклони формуються в помірних або полярних широтах та мають діаметр від тисячі кілометрів на початкових стадіях розвитку, а якщо йдеться про центральний циклон — до декількох тисяч кілометрів. З іншого боку, тропічні циклони утворюються в тропічних широтах та мають менші розміри, зазвичай сотні, рідше — понад тисячу кілометрів. Однак вони характеризуються великими швидкостями вітру, які можуть досягати штормових значень. Важливо зазначити, що тропічні циклони можуть перетворюватися в позатропічні в процесі свого розвитку. Протилежністю циклону за всіма параметрами є **антициклон**. Повітря рухається в ньому за годинниковою стрілкою, від центру до периферії. Крім того, антициклон не посилює контрасти температур, як циклон, а розмиває їх. Погода в антициклоні безвітряна, суха та малохмарна.

Вплив змін клімату на циклони. Зростання середньорічних температур на Землі зумовлює не тільки частіше виникнення тропічних ураганів, зміну їхніх траєкторій, а й різке зростання їхньої сили, а також підвищення вмісту вологи всередині цих морських вихорів при їх зближенні із сушею. Можна виділити низку наслідків.

Збільшення інтенсивності тропічних циклонів. Зі збільшенням температур води в океанах, яке є джерелом енергії

для тропічних циклонів, може збільшитися їхня потенційна інтенсивність.

Зміна траєкторій руху циклонів. Зміни клімату можуть також впливати на траєкторії руху циклонів та їхнє розташування. Наприклад, ймовірні зміни в атмосферних циркуляційних системах можуть впливати на траєкторії циклонів.

Збільшення ризику екстремальних погодних явищ. Зміни клімату можуть також призвести до збільшення ризику екстремальних погодних явищ, пов'язаних із циклонами, як-от сильні опади, повені.



Рис. 4.11. Тропічний циклон 21 лютого 2023 року після більш ніж двох тижнів подорожі через Індійський океан (фото NASA)

Щоб зазирнути у структуру атмосферного вихору, проведемо дослід, який передбачає створення вихору рідини. Ми також здійснимо вимірювання отриманого потоку та інтерпретуємо вимірювання з погляду теорії.



Дослід 21. Дослідження структури вихору

Ідею досліду взято з проекту Массачусетського технологічного інституту Weather in Tank (<http://weathertank.mit.edu/links/projects/taylor-columns-introduction>).

Метою роботи є відтворення процесу формування вихору та перевірка залежності числа Россбі від відстані між частинкою і центром резервуара.

Обладнання: обертова платформа, резервуар із квадратною основою, три склянки, відерце з отвором у дні, корок, штовхач для витягування корка, клаптики паперу для встановлення швидкості руху рідини, відеокамера, ПК, програма Tracker (<https://physlets.org/tracker/>).

Перед проведенням лабораторного досліду запропонуйте учням ознайомитися з матеріалами з додатка 2 і сформулювати гіпотезу про те, що, на їхню думку, відбуватиметься під час експерименту. Організуйте обговорення, щоб учні поділилися своїми прогнозами.

Експериментальна процедура



Рис. 4.12. Конфігурація досліду для моделювання вихору

Установка відеокамери. Закріпіть відеокамеру або телефон над обертовою платформою, щоб забезпечити якісну відеофіксацію експерименту.

Підготовка резервуара. Розмістіть резервуар із квадратною основою на обертовій платформі, переконавшись, що він стійкий.

Розміщення склянок. Установіть три склянки по колу на дно резервуара. Вони повинні бути розташовані рівномірно і забезпечити правильне розподілення рідини.

Підготовка відра. Розмістіть пластикове відро з отвором у центрі резервуара так, щоб отвір був над склянками. Переконайтеся, що відро циліндричної форми надійно встановлене.

Установка корка. Закрийте отвір у відрі корком, розташовавши його точно в центрі обертання платформи. Це забезпечить контрольований вихід води.

Заповнення відра. Наповніть відро водою до необхідного рівня.

Налаштування обертання. Встановіть швидкість обертання платформи в діапазоні 10–15 об/хв і дайте їй працювати протягом приблизно 10 хвилин, щоб вона стабілізувалась.

Розміщення паперових клаптиків. Розмістіть клаптики паперу на поверхні води. Це допоможе спостерігати за рухом рідини та формуванням вихору.

Запуск запису. Увімкніть відеозапис для фіксації всього процесу. Після цього акуратно витягніть корок з отвору у відрі, щоб вода почала витікати.

Закінчення експерименту. Дочекайтесь, поки вода повністю витече з відра, і зупиніть запис.

Альтернативний варіант: якщо неможливо провести експеримент самостійно, завантажте відео з інтернет-ресурсу (<https://data.stemua.science/klimat/exe17/vihor.mp4>).

Аналіз отриманих даних. Ми спостерігаємо, що частинки обертаються багато разів, перш ніж вийти з отвору в центрі.

Частинки зовні рухаються набагато повільніше, ніж частинки всередині: коли частинки наближаються до отвору, вони набувають дуже сильного вихрового руху. За різних радіусів від центру відра наша система відображає різні числа Россбі. Вимірюючи швидкість частинок як функцію радіуса до центра R для цього досліду, ми можемо за допомогою формул (2.17) та (2.18) визначити число Россбі як:

$$Ro = \frac{v_{\theta}}{2\Omega R}, \quad (4.1)$$

де v_{θ} — азимутальна швидкість частинки на відстані R від центру циліндра (відерця).

Теоретичне значення числа Россбі:

$$Ro_{theor} = (R / R_1 - 1), \quad (4.2)$$

де R_1 — радіус циліндра.

1. Завантажте відео на ПК.
2. Завантажте відео у програмі Tracker (<https://physlets.org/tracker/>).

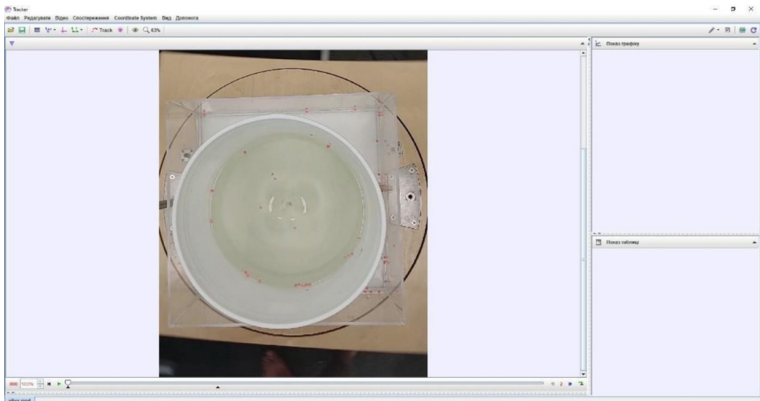
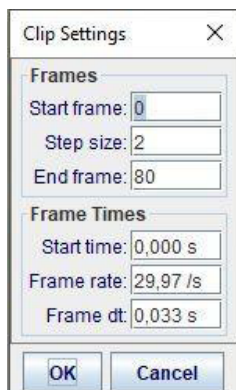


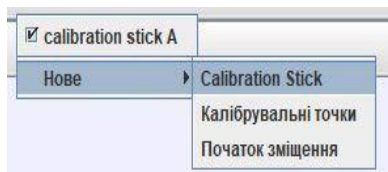
Рис. 4.13. Завантажене відео у програмі Tracker

3. Перегляньте відеозапис та оберіть діапазон кадрів, на яких ви будете відслідковувати рух обраного клаптика паперу. Для цього оберіть кнопку  та вкажіть у вікні номер початкового кадру (Start frame), кінцевого кадру (End frame) та проміжок між кадрами (Step size).



4. Оберіть інструмент «Масштаб»  та виділіть вкладку «Калібрувальний відрізок».

5. Встановіть відрізок на зрізі рівня води в ємності та вкажіть його довжину 0,3 м.



6. Оберіть кнопку  та встановіть початок відліку координат у центрі вихору.

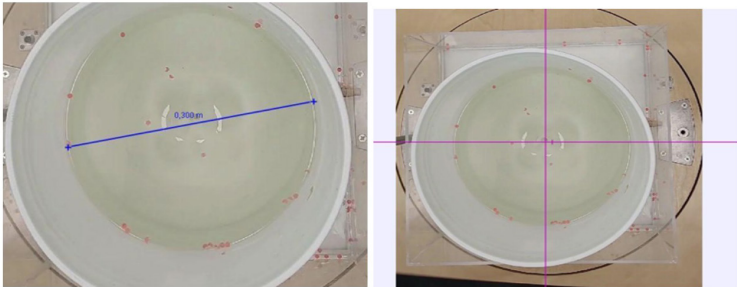
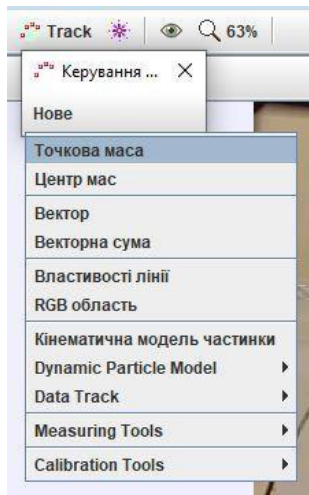


Рис. 4.14. Встановлення масштабу та початку координат у програмі Tracker

7. Для відстеження руху клаптика паперу оберіть:



8. Утримуючи клавішу Shift, відзначаєте положення клаптика паперу на кожному кадрі. Кадри перемикаються автоматично.

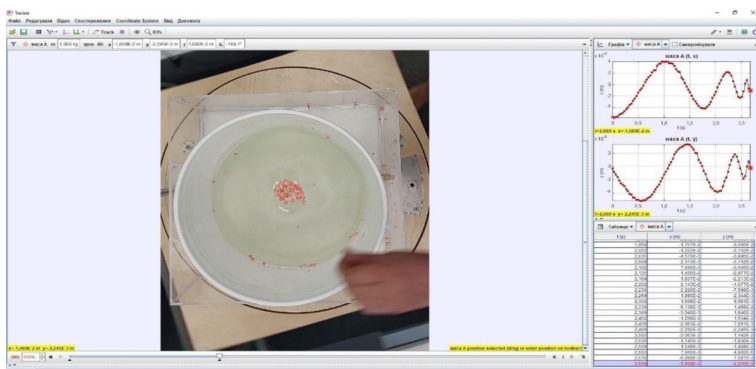
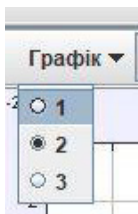


Рис. 4.15. Відслідковування траєкторій клаптиків у програмі Tracker

9. Праворуч у вікні графіків з'являться графіки зміни координат клаптика з часом. Оберіть тільки один графік.



10. Оберіть підписи осей координат відповідно до задачі дослідження.

11. Розрахуйте експериментальне та теоретичне значення числа Россбі для різних радіусів.

12. Побудуйте графік нормованої залежності зазначених параметрів.

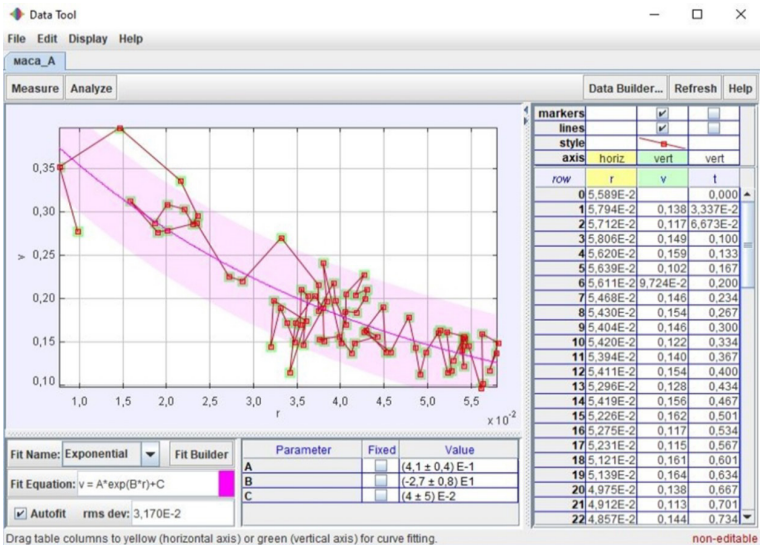


Рис. 4.16. Числа Россбі, розраховані як функція від нормованої на радіус циліндра (відерця) відстані частинки до центру резервуара за п'ятьма різними частинками для випадку обертання з частотою $n = 10$ об/хв; суцільна лінія – теоретична оцінка

Обговорення дослідів. Обговоріть гіпотези, сформульовані учнями перед дослідом. Обговоріть також вплив обертання платформи на формування вихору: як змінюється структура потоку при різних швидкостях обертання? А також вплив в'язкості рідини на вихоровий рух: як результати експерименту могли б змінитися при використанні іншої рідини (наприклад, масла або густого розчину)?

4.6. Питання та завдання до розділу 4

1. Які шари утворюють атмосферу Землі?
2. Які ключові властивості кожного з них?
3. Який хімічний склад атмосферного повітря на Землі і як він змінюється з висотою та залежно від географічного розташування?
4. Що таке адіабатичний процес і як він впливає на зміни температури й тиску в різних шарах атмосфери?
5. Який склад атмосферного повітря на Землі і як він може варіюватися залежно від висоти та географічного положення?
6. Як впливають природні та антропогенні джерела на концентрацію парникових газів в атмосфері? Які наслідки це може мати для глобального клімату?
7. Як регіональні відмінності в атмосферному тиску, спричинені неоднаковим нагріванням Землі, впливають на атмосферну циркуляцію?
8. Які чинники викликають вітри на поверхні Землі і як визначаються їхні напрямки та інтенсивність?
9. Якою була би гіпотетична циркуляція атмосфери Землі, якби планета перестала обертатися? Які наслідки це мало би для кліматичних умов?
10. Які основні елементи циркуляції атмосфери Землі, такі як тропічні та полярні вихори, ви знаєте? Як вони взаємодіють між собою?
11. Як антарктичний та арктичний вихори впливають на глобальну атмосферну циркуляцію та зміну клімату? Які чинники сприяють їхній стабільності чи порушенню?
12. Як циркуляція атмосфери сприяє переносу забруднювальних речовин і часток по всій планеті? Які регіони є найбільш вразливими до забруднення через глобальні повітряні потоки?

13. Яким чином періоди аномального холоду в середніх широтах можуть бути індикаторами глобальних кліматичних змін? Які процеси за цим стоять?
14. Поле швидкості вихору відповідає спаданню швидкості за законом $1/R$. Побудуйте залежність швидкості від радіуса для проведеного досліду 20.
15. Які чинники впливають на формування та розвиток циклонів і як ці чинники взаємодіють між собою?
16. Як можна визначити напрямок обертання циклону в північній та південній півкулі? Які фізичні закони або правила допомагають у цьому?
17. Яким чином циклони впливають на погодні умови в різних регіонах? Як їхні властивості змінюються залежно від географічного розташування?
18. Які відмінності існують між тропічними і позатропічними циклонами? Як їхня структура та механізми формування відрізняються?
19. Як зміни клімату впливають на інтенсивність та частоту циклонів? Про які довгострокові тенденції можна зауважити?
20. Які соціально-економічні наслідки можуть мати сильні циклони для населення та інфраструктури? Як громади готуються до цих природних явищ і як знижують їхній вплив?
21. Як змінюється атмосферний тиск у вихорі в радіальному напрямку і як це пов'язано з теоремою Бернуллі? Які практичні наслідки це має для прогнозування погодних умов?

Перелік фізичних величин

Позначення	Назва	Розмірність величини
k	Константа геометричної подібності	безрозмірна
U	Швидкість	м/с
L	Характерний розмір	м
Ω	Кутова швидкість	рад/с
φ	Географічна широта	градуси
f	Параметр Коріоліса	рад/с
τ	Період обертання	с
τ_E	Період обертання Землі	с
l_E	Відстань від тіла до осі обертання Землі	м
t	Час	с
RPM	Кількість обертів за хвилину	об/хв
R_o	Число Россбі	безрозмірна
L_{ro}	Радіус Россбі	м
Re	Число Рейнольдса	безрозмірна
Ri	Число Річардсона	безрозмірна
Ra	Число Релея	безрозмірна
S_0	Сонячна стала S	кВт/м ²
R_E	Радіус Землі	м

E_{tot}	Повна енергія, що отримується від Сонця	Вт
Ω_E	Кутова швидкість обертання Землі	рад/с
M_a	Сумарна маса повітря в атмосфері	кг
T	Температура	С°, К°
E_B	Енергія земного випромінення	Дж
E_{Π}	Сонячна енергія, що поглинається Землею	Дж
σ	Стала Стефана – Больцмана	Вт · м ⁻² · К ⁻⁴
I	Потік випромінювання на одиницю площі поверхні	Вт · м ⁻²
T_e	Температура випромінення	°С, °К
A	Альbedo	безрозмірна
$\ddot{y}_{\text{oc}}$	Доцентрове прискорення	м/с ²
T_{pend}	Період коливань математичного маятника	сек
L_{pend}	Довжина математичного маятника	м
p	Тиск	Па
S	Солоність	PSU
ρ	Густина	кг/м ³
V	Об'єм	м ³
ν	Кінематична в'язкість рідини	Па · с
β	Коефіцієнт об'ємного теплового розширення	К ⁻¹



Перелік експериментів

№	Досліди
1	Дослідження залежності нагрівання поверхні тенісної кульки від кута падіння променів
2	Дослідження впливу альбедо на температуру поверхонь
3	Дослідження парникового ефекту
4	Дослідження рівнопотенційних поверхонь у процесі обертання ємності з рідиною
5	Дослідження сили Коріоліса
6	Дослідження впливу обертання на динаміку рідини
7	Дослідження коливань маятника Фуко
8	Дослідження подвійної дифузійної конвекції рідини
9	Дослідження теплового розширення води
10	Вплив танення льоду на зміну рівня океану: наземний і морський лід
11	Швидкість танення льоду у морській і прісній воді
12	Швидкість танення льоду на суші та у воді
13	Експеримент Марсильї
14	Дослідження процесу генерації внутрішніх хвиль
15	Термохалінна циркуляція
16	Моделювання течії Гольфстрім
17	Транспорт Екмана

18	Стовпчики Тейлора
19	Атмосферна конвекція
20	Атмосферні комірки
21	Дослідження структури вихору
	Демонстрації
1	Порівняння теплоємності води та повітря
2	Вплив неоднорідностей рельєфу дна на внутрішні хвилі
3	Утворення хмар при адіабатичному розширенні



Список джерел

1. Довгий С., Терлецька К., Бабійчук С. Кліматична освіта в Малій академії наук України. *Наукові записки Малої академії наук України*. 2021. № 2 (18). С. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.51707/2618-0529-2020-18-01>.
2. Гончарова Л. Д., Серга Е. М., Школьний Є. П. Клімат і загальна циркуляція атмосфери: навч. посіб. Одеса : Вид-во «ТЭС», 2005. 251 с.
3. Мороз О., Петрушка І., Кузь О., Руда М. Технології адаптації до змін клімату : навч. посіб. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2022. 452 с.
4. Терлецька К., Кузьменко Д. Клімат у твоїх руках. Харків : Vivat, 2023. 80 с.
5. Терлецька К., Чернецький І., Довгий С. Навчальна програма з позашкільної освіти. Зміни клімату. Дослідницько-експериментальний напрям, основний рівень. Київ : Національний центр «Мала академія наук України», 2023. 21 с.
6. A 'snowball Earth' climate triggered by continental break-up through changes in runoff / Donnadieu Y. et al. *Nature*. 2004. № 428. Pp. 303–306. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature02408>.
7. An extreme internal solitary wave event observed in the northern South China Sea / Huang X. et al. *Scientific Reports*. 2016. Article number: 30041. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep30041>.

8. Anderson A. Climate change education for mitigation and adaptation. *Journal of Education for Sustainable Development*. 2012. № 6 (2). Pp. 191–206. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41297-017-0015-9>.
9. Bentz J. Learning about climate change in, with, and through art. *Climatic Change*. 2020. № 162 (3). Pp. 1595–1612. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02804-4>.
10. Cassidy E. Atmospheric river lashes California. *NASA Earth Observatory*. 2023, January 5. URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150804/atmospheric-river-lashes-california> (дата звернення: 26.01.2025).
11. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf (дата звернення: 26.01.2025).
12. Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland (in press).
13. Foss A. W., Ko Y. Barriers and opportunities for climate change education: The case of Dallas-Fort Worth in Texas. *The Journal of Environmental Education*. 2019. № 50 (3). Pp. 145–159. DOI: <https://doi.org/10.1080/00958964.2019.1604479>.
14. Gill A. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. New York : Academic Press, 1982. 662 p.
15. Hasselmann K. Multi-pattern fingerprint method for detection and attribution of climate change. *Climate Dynamics*. 1997. № 13. Pp. 601–611. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003820050185>
16. Heiss J. Climate change education for sustainable development: The UNESCO climate change initiative. (n. d.). URL: <https://www.unesco.org/en/climatechange> (дата звернення: 16.05.2024).

17. Jackson C. R., da Silva J. C. B., Jeans G. The generation of nonlinear internal waves. *Oceanography*. 2012. № 25 (2). Pp. 108–123. DOI: <https://doi.org/10.5670/oceanog.2012.46>.

18. Lutgens K., Tarbuck E. J. The Atmosphere. 8th Edition. Upper Saddle River, NJ : Prentice-Hall, 2001. 512 p.

19. Manabe S., Wetherald R. T. Climate response to increased CO₂ concentrations in a general circulation model. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1975. № 32 (1). Pp. 3–15. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1975\)032<0003:CRITCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1975)032<0003:CRITCC>2.0.CO;2).

20. Marshall J., Plumb A. Atmosphere, Ocean and Climate Dynamics. Academic Press, 1989. 344 p.

21. Martin S., Drucker R. The effect of possible Taylor columns on the summer ice retreat in the Chukchi Sea. *J. Geophys. Res.* 1997. № 102 (C5). Pp. 10473–10482. DOI: <https://doi.org/10.1029/97JC00145>.

22. Measuring the Sea: Marsili's Oceanographic Cruise (1679–80) and the Roots of Oceanography / Pinardi N. et al. *J. Phys. Oceanogr.* 2018. № 48. Pp. 845–860. DOI: <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0168.1>.

23. Multidisciplinary indicators for confirming the existence and ecological effects of a Taylor column in the Tropical Western Pacific Ocean / Ma J. et al. *Ecological Indicators*. 2021. № 127. 107777.

24. Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change, Dec. 12, 2015, T.I.A.S. No. 16-1104. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (дата звернення: 16.05.2024).

25. Stevenson R., Nicholls J., Whitehouse H. What is climate change education? *Curriculum Perspectives*. 2017. Vol. 37. Pp. 67–71. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41297-017-0015-9>.

26. The climate in our hands – Ocean and Cryosphere, a teacher's handbook for primary and secondary school. Paris : Office for Climate Education, 2019. 194 p.

27. The Horizon 2020 project PolarRES. URL: <https://polarres.eu/> (дата звернення: 16.05.2024).

28. This Doomsday Glacier is melting faster than scientists thought — now Earth's biggest cities are at risk. *PolarRes: Exploring future polar climates* (n. d.). URL: <https://polarres.eu/polarresnews/this-doomsday-glacier-is-melting-faster-than-scientists-thought-now-earths-biggest-cities-are-at-risk/> (дата звернення: 10.11.2024).

29. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution A/RES/70/1. *United Nations. Department of Economic and Social Affairs*. 2015. URL: <https://sdgs.un.org/2030agenda> (дата звернення: 16.05.2024).

30. Turner B. The last 12 months have broken records like never before: Earth exceeds 1.5°C warming every month for entire year. *Live Science*. 2024, July 8. URL: <https://www.livescience.com/planet-earth/climate-change/the-last-12-months-have-broken-records-like-never-before-earth-exceeds-15-c-warming-every-month-for-entire-year> (дата звернення: 16.05.2024).

31. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). 1992. URL: <https://unfccc.int> (дата звернення: 16.05.2024).

32. Weather in a Tank (n. d.). URL: <https://oceans.mit.edu/JohnMarshall/teaching/weather-in-a-tank> (дата звернення 10.11.2024).



Додатки

Додаток 1

Технічні характеристики обертової установки НЦ «МАНУ»

1.1. Комплектація обертової установки

Обертова установка, яка є частиною лабораторії кліматичної освіти Малої академії наук України, має таку комплектацію.

1. Обертова платформа з регулятором частоти обертання.
2. Резервуар із квадратною основою.
3. Гнучка циліндрична вставка.
4. Штативні штанги.
5. Плaskий резервуар для демонстрації термохалінної циркуляції.
6. Циліндричне відерце для льоду.
7. Гнучкі трубки, вентилі.
8. Шайба.
9. Вентилятори.
10. Цифрова камера.
11. Насос для викачування рідини.
12. Комплект для монтажу елементів установки.
13. Бульбашковий рівень.

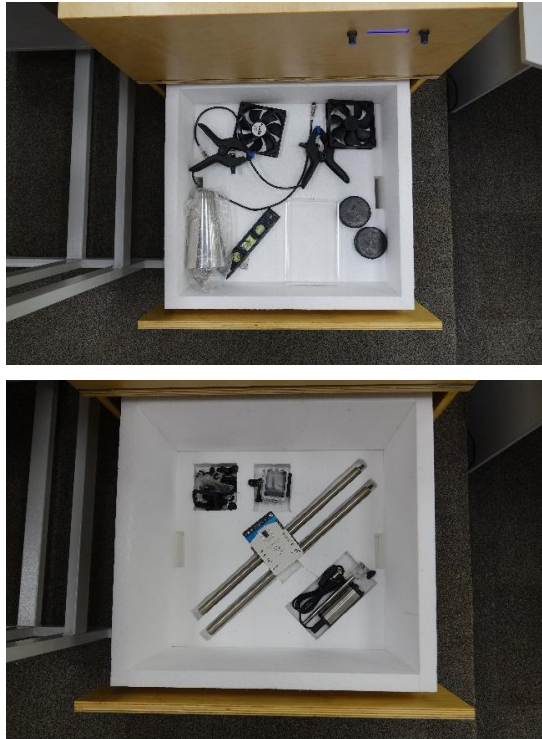


Рис. 1. Комплектація обертової установки

1.2. Органи керування обертовою установкою та індикації

Обертова установка має такі органи керування та індикації (рис. 2).

1. Display – рідкокристалічний дисплей (LCD).
2. Motor – енкодер, що керує роботою платформи та освітленням.
3. Strob – енкодер, що керує роботою стробоскопа.
4. Power – кнопка увімкнення живлення, міститься на задній стороні корпусу.

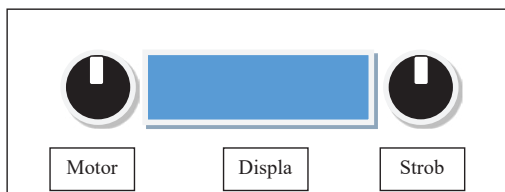


Рис. 2. Управління обертовою установкою

Функції енкодера Motor	
Дія	Результат
Коротке натискання (1 с)	Увімкнення / вимкнення обертання установки
Довге натискання (4 с)	Увімкнення / вимкнення підсвітки установки, вмикається при вимкненому стробоскопі
Поворот ліворуч / праворуч	Зменшення / збільшення значення частоти обертання установки. Змінювати значення частоти можливо при зупиненій платформі, а також під час обертання. При відображенні на дисплеї параметрів стробоскопа виконує перехід у вікно 1 (відображення параметрів обертання установки)
Утримання натиснутим та поворот	Зміна напрямку обертання установки. Зміна напрямку обертання можлива тільки при зупиненій платформі

Функції енкодера Strob	
Дія	Результат
Коротке натискання (1 с)	Зміна розряду значення частоти миготіння стробоскопа, який буде змінюватись при повороті енкодера. Зміна розряду відбувається при увімкненому стробоскопі
Довге натискання (4 с)	Увімкнення / вимкнення стробоскопа

Поворот ліворуч / праворуч	Зменшення / збільшення значення частоти миготіння стробоскопа. Значення частоти змінюється тільки при увімкненому стробоскопі. При відображенні на дисплеї параметрів обертання платформи виконує перехід у вікно 2 (відображення параметрів стробоскопа)
Утримання натиснутим та поворот	Зменшення / збільшення коефіцієнта заповнення, тобто відношення тривалості увімкненого стану світла до прийнятого періоду імпульсів (частоти миготіння стробоскопа). Коефіцієнт заповнення змінюється від 10 % до 90 %. 100 % коефіцієнта заповнення відповідає постійному свіщенню підсвітки. 0 % коефіцієнта заповнення відповідає вимкнутій підсвітці.

Для відображення параметрів **обертової установки** на LCD-дисплеї передбачено два вікна. У вікні 1 відображено такі параметри:

- швидкість обертання платформи (10 rpm);
- напрямок обертання платформи (←, →);
- увімкнення / вимкнення обертання (RUN/STOP);
- увімкнення / вимкнення підсвітки (○, ●).

У вікні 2 відображено параметри стробоскопа:

- значення частоти миготіння (525 Hz);
- значення коефіцієнта заповнення (40%).

При увімкненні живлення на дисплеї відображається вікно 1 із параметрами обертання платформи. Після увімкнення стробоскопа відображається вікно 2. Якщо при увімкненому стробоскопі виконати поворот енкодера Motor у довільну сторону, відбудеться перехід у вікно 1. Щоб повернутись до вікна 2, потрібно виконати поворот енкодера Strob у довільну сторону.

Додаток 2

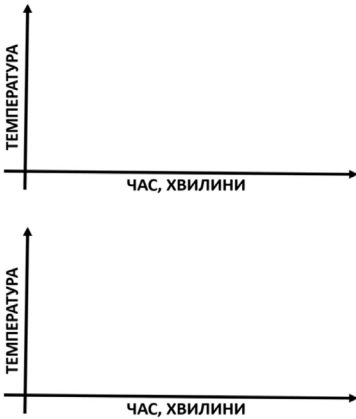
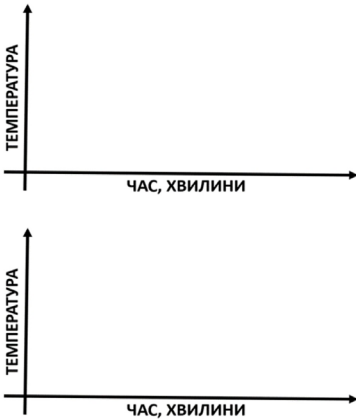
Роздатковий матеріал для слухачів курсу

І до і після проведення досліду має відбуватися обговорення відповідних фізичних явищ, щоб учні, виходячи із засвоєної теорії, могли висловити власні припущення щодо перебігу дослідження і його ймовірних результатів, а по завершенні експерименту обміркувати результати своїх спостережень. Окрім теоретичної довідки про певний природний феномен, пропонуємо підготувати для учнів друковані матеріали, зокрема таблиці зі стислою інформацією про ймовірний перебіг лабораторної демонстрації. Перед проведенням лабораторного досліду запропонуйте учням намалювати в таблицях те, що, на їхню думку, буде відбуватися під час експерименту, а потім поділитися своїми прогнозами та обговорити їх із класом. Цей додаток містить такі таблиці для кожного з експериментів.

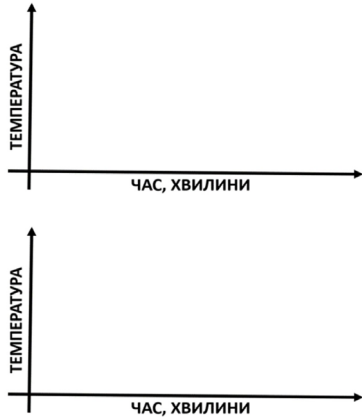
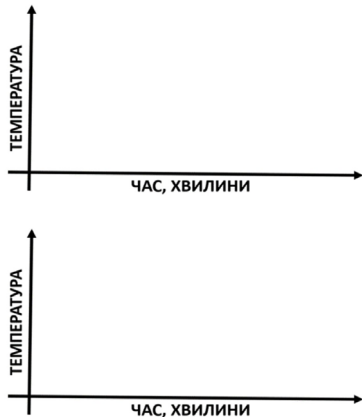
Дослід 1. Дослідження залежності нагрівання поверхні тенісної кульки від кута падіння променів

ДО ДОСЛІДУ	Графік очікуваної залежності між кутом падіння світла від ліхтарика і температурою	
ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Фактичний графік залежності між кутом падіння світла від ліхтарика і температурою	

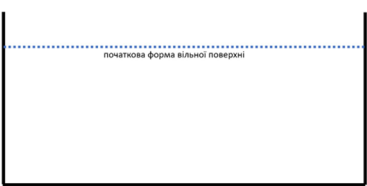
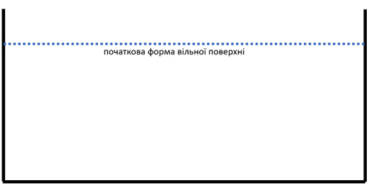
Дослід 2. Дослідження впливу альбедо на температуру поверхонь

ДО ДОСЛІДУ	Очікуваний графік залежності зміни температури білої поверхні в часі Очікуваний графік залежності зміни температури чорної поверхні в часі	
ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Фактичний графік залежності зміни температури білої поверхні в часі Фактичний графік залежності зміни температури чорної поверхні в часі	

Дослід 3. Дослідження парникового ефекту

ДО ДОСЛІДУ	Графік очікуваної зміни температури відкритої поверхні з часом Графік очікуваної зміни температури поверхні за склом із часом	
ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Фактична зміна температури відкритої поверхні Фактична зміна температури поверхні за склом	

Дослід 4. Дослідження рівнопотенційних поверхонь у процесі обертання ємності з рідиною

ДО ДОСЛІДУ	Очікувана форма вільної поверхні води в обертовому лотку	
ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Фактична форма вільної поверхні води в обертовому лотку	

Дослід 5. Дослідження сили Коріоліса

ДО ДОСЛІДУ	Очікувана зміна величини вектора прискорення при зростанні частоти обертання платформи	RPM=5  RPM=10  RPM=15  RPM=30 
ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Зміна величини вектора прискорення при зростанні частоти обертання платформи	RPM=5  RPM=10  RPM=15  RPM=30 

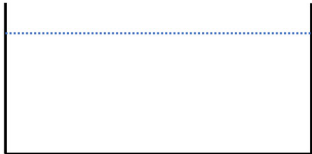
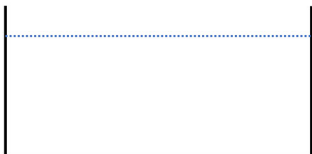
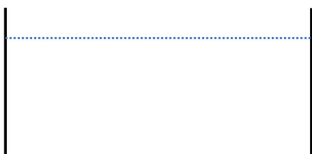
Дослід 6. Дослідження впливу обертання на динаміку рідини

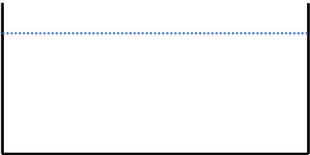
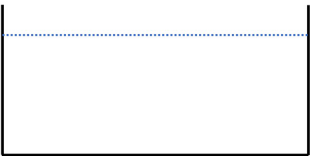
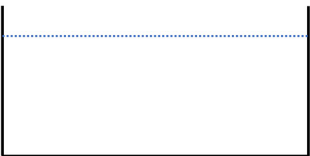
ДО ДОСЛІДУ	Очікувані візерунки барвників для випадку без обертання RPM = 0 об/хв	RPM=0 
	Очікувані візерунки барвників для випадку обертання із RPM = 10 об/хв	RPM=10 
	Очікувані візерунки барвників для випадку обертання із RPM = 30 об/хв	RPM=30 
ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Візерунки барвників для випадку без обертання RPM = 0 об/хв	RPM=0 
	Візерунки барвників для випадку обертання із RPM = 10 об/хв	RPM=10 
	Візерунки барвників для випадку обертання із RPM = 30 об/хв	RPM=30 

Дослід 7. Дослідження коливань маятника Фуко

ДО ДОСЛІДУ	Намалюйте очікувану траєкторію, яку буде проходити маятник із $L_{\text{pend}} = 0,88 \text{ м}$ Як зміниться траєкторія, якщо зменшити довжину нитки до $L_{\text{pend}} = 0,78 \text{ м}$?	RPM=5  RPM=10  RPM=15  RPM=30  RPM=5  RPM=10  RPM=15  RPM=30 
ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Сформулюйте словами, як залежить траєкторія від швидкості обертання установки? Сформулюйте словами, як залежить траєкторія від довжини маятника?	

Дослід 8. Дослідження подвійної дифузійної конвекції рідини

ДО ДОСЛІДУ	Дослід 8.1. Теплова дифузія Намалюйте очікуваний результат розтікання фарбованої теплої води	
	Дослід 8.2. Дифузія солі Намалюйте очікуваний результат розтікання верхнього шару фарбованої солоної води	
	Дослід 8.3. Дифузія тепла і солі Намалюйте очікуваний результат розтікання фарбованої солоної теплої води	

ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Дослід 8.1. Теплова дифузія Намалюйте результат розтікання фарбованої теплої води	
	Дослід 8.2. Дифузія солі Намалюйте результат розтікання верхнього шару фарбованої солонної води	
	Дослід 8.3. Дифузія тепла і солі Намалюйте результат розтікання фарбованої солонної теплої води	

Дослід 9. Дослідження теплового розширення води

ДО ДОСЛІДУ	Намалюйте очікувану залежність зміни об'єму води, що нагрівається, від температури		
ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Намалюйте фактичну залежність зміни об'єму води, що нагрівається, від температури		

Дослід 10. Вплив танення льоду на зміну рівня океану: наземний і морський лід

ДО ДОСЛІДУ	Напишіть, як ви вважаєте, як зміниться рівень в лотку при таненні льоду, що вільно плаває у воді? Напишіть, як ви вважаєте, як зміниться рівень при таненні льоду, якщо його утримувати під водою? Напишіть, як ви вважаєте, як зміниться рівень при таненні льоду, якщо його тримати на суходолі над водою?	
---------------	---	--

ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Напишіть, як змінився рівень при таненні льоду, що вільно плаває у воді Напишіть, як змінився рівень при таненні льоду, який утримували під водою Напишіть, як змінився рівень при таненні льоду, який тримали на суходолі над водою	
------------------	---	--

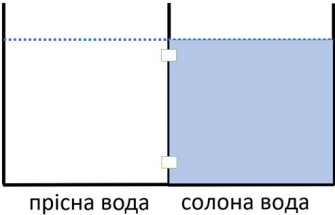
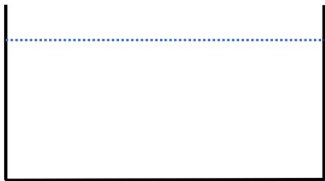
Дослід 11. Швидкість танення льоду у морській і прісній воді

ДО ДОСЛІДУ	У якій зі склянок лід розтане швидше — із солоною чи із прісною водою?	
ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Намалюйте, який вигляд мають склянки після того, як підфарбований лід розтанув На що це вплинуло?	 прісна вода  солонна вода

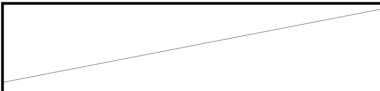
Дослід 12. Швидкість танення льоду на суші та у воді

ДО ДОСЛІДУ	Де лід розтане швидше — у воді чи на суші?	
ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Напишіть, де в результаті лід розтанув швидше	

Дослід 13. Експеримент Марсильї

ДО ДОСЛІДУ	Намалюйте, як, на вашу думку, буде рухатися рідина з отворів: верхнього; нижнього Намалюйте, яка, на вашу думку, картина буде спостерігатися в резервуарі після того, як встановилася рівновага	 прісна вода солонa вода
ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Яка картина спостерігалася після того, як встановилася рівновага?	

Дослід 14. Дослідження процесу генерації внутрішніх хвиль

ДО ДОСЛІДУ	Намалюйте, який, на вашу думку, матиме вигляд лінія розділу між солоною та прісною водою при невеликих відхиленнях Намалюйте, який, на вашу думку, матиме вигляд лінія розділу між солоною і прісною водою при значних відхиленнях	     
ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Оцініть, чи теоретичні передбачення описали реальну лінію розділу	

Дослід 15. Термохалінна циркуляція

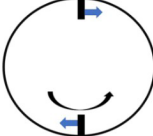
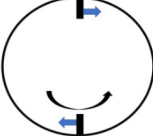
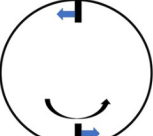
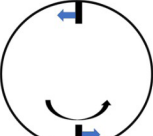
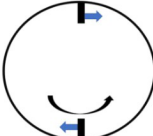
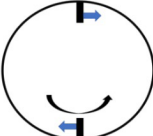
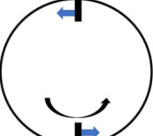
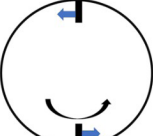
ДО ДОСЛІДУ	Намалюйте, як, на вашу думку, буде рухатися рідина біля поверхні та біля дна	
ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Намалюйте, як рухалась рідина під час досліду біля поверхні та біля дна	

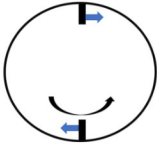
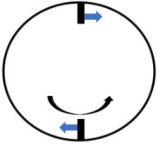
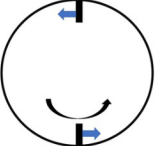
Дослід 16. Моделювання течії Гольфстрім

ДО ДОСЛІДУ	Як ви вважаєте, як буде поводитися забарвлений теплий струмінь у квадратному резервуарі без обертання?	
	Як ви вважаєте, як буде поводитися забарвлений теплий струмінь у квадратному резервуарі з обертанням RPM = 10 об/хв?	
	Як ви вважаєте, як буде поводитися забарвлений теплий струмінь у квадратному резервуарі з обертанням RPM = 20 об/хв?	

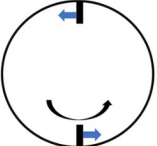
ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Як поводить ся забарвлений теплий струмїнь у квадратному резервуарі без обертання?	RPM=0 
	Як поводить ся забарвлений теплий струмїнь у квадратному резервуарі з обертанням RPM = 10 об/хв?	RPM=10 
	Як поводить ся забарвлений теплий струмїнь у квадратному резервуарі з обертанням RPM = 20 об/хв?	RPM=20 

Дослід 17. Транспорт Екмана

ДО ДОСЛІДУ	Як ви вважаєте, якою буде траєкторія руху частинок на поверхні та на дні резервуару при напруженнях, що створюють потік за годинниковою стрілкою? Як ви вважаєте, якою буде траєкторія руху частинок на поверхні та на дні лотка при напруженнях, що створюють потік проти годинникової стрілки?	НА ПОВЕРХНІ  НА ДНІ  НА ПОВЕРХНІ  НА ДНІ  НА ПОВЕРХНІ  НА ДНІ  НА ПОВЕРХНІ  НА ДНІ 
---------------	--	---

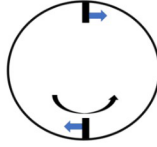
ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Намалюйте траєкторію руху частинок на поверхні та на дні резервуару при напруженнях, що створюють потік за годинниковою стрілкою	НА ПОВЕРХНІ  НА ДНІ  НА ПОВЕРХНІ 
----------------------	---	---

НА ДНІ



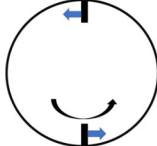
НА ПОВЕРХНІ

НА ДНІ

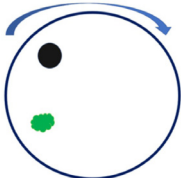


НА ПОВЕРХНІ

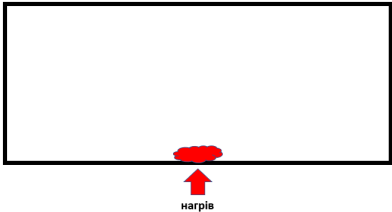
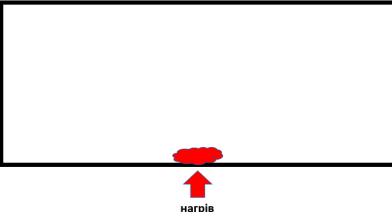
НА ДНІ



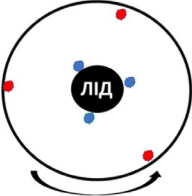
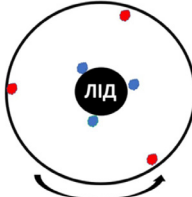
Дослід 18. Стовпчики Тейлора

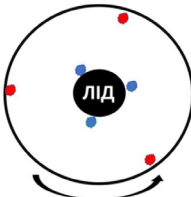
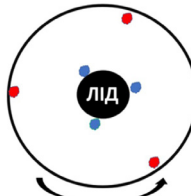
ДО ДОСЛІДУ	Як, на вашу думку, буде поширюватися підфарбована рідина (зелена), обтікаючи чорну шайбу на дні, при невеликих значеннях RPM (менше ніж 5)?	 
ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Як поширювалася підфарбована рідина (зелена), обтікаючи чорну шайбу на дні, при RPM = 1 об/хв та при RPM = 10 об/хв?	 

Дослід 19. Атмосферна конвекція

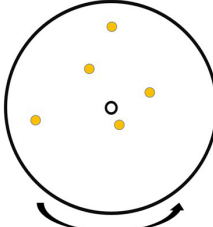
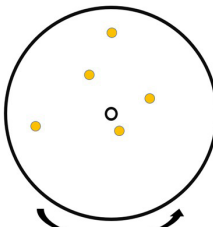
ДО ДОСЛІДУ	Як ви вважаєте, як буде поширюватися підфарбована рідина?	
ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Як поширювалася підфарбована рідина?	

Дослід 20. Атмосферні комірки

ДО ДОСЛІДУ	Як ви вважаєте, як буде поширюватися підфарбована рідина (блакитна поруч із відерцем з льодом, а червона біля круглої вставки) при RPM = 10 об/хв та при RPM = 20 об/хв?	RPM=10  RPM=20 
---------------	--	--

ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Як поширювалася підфарбована рідина (блакитна поруч із відерцем з льодом, а червона біля круглої вставки) при RPM = 10 об/хв та при RPM = 20 об/хв?	RPM=10  RPM=20 
---------------	---	---

Дослід 21. Дослідження структури вихору

ДО ДОСЛІДУ	Як ви вважаєте, як будуть виглядати траєкторії частинок під час руху у вихорі?	
ПІСЛЯ ДОСЛІДУ	Як виглядають траєкторії частинок під час руху у вихорі?	

Список ілюстрацій

С.	Рис.	Підпис до рисунка	Джерело / автор
15	1.1	Глобальна поверхнева температура (показана як річне відхилення від базового тренду 1850–1900 рр.)	IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report
16	1.2	Зміна рівня океану за даними супутникових спостережень	https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/
18	1.3	Аналогія між кліматом і погодою така: клімат — це шлях людини, а погода — петляння пса, що йде поруч	Створено укладачами за прикладом з ресурсу https://www.youtube.com/watch?v=e0vj-0imOLw
24	1.4	Геометрично подібні процеси	Сергій Веденський
28	1.5	а) фото північної півкулі Землі; б) моделювання полярної атмосферної комірки на обертовій установці	а) https://mashable.com/article/earth-day-satellite-photo-most-detailed ; б) Катерина Терлецька
29	1.6	а) обертова установка для симуляції руху атмосфери та океану; б) дисплей на обертовій установці із зазначенням швидкості обертання	Катерина Терлецька
31	1.7	Обертова платформа із можливими конфігураціями	Катерина Терлецька

36	2.1	Класифікація кліматів Кеппена	from [2] The climate in our hands
40	2.2	Прогнозовані зміни річної максимальної добової температури та річної максимальної добової кількості опадів при рівнях глобального потепління 1,5, 2, 3 і 4 °C відносно 1850–1900 років	IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report
42	2.3	а) скафіс — прилад для визначення висоти сонця над горизонтом; б) схема вимірювання радіуса Землі Ератосфеном	Катерина Терлецька
45	2.4	Земля, обертаючись, отримує сонячну енергію через ту частину поверхні, яка при проекції на площину утворює диск, і водночас випромінює її від поверхні сфери	Відтворено з [4]
46	2.5	а) радіаційний баланс Землі залежно від широти; б) просторовий розподіл радіаційного потоку енергії (березень 2024), а саме баланс між вхідною та вихідною енергією у верхній частині атмосфери, за даними NASA	а) [5] б) https://earthobservatory.nasa.gov/
47	2.6	Обладнання для проведення дослідів	Катерина Терлецька
49	2.7	Термограма кульки	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
50	2.8	Графік розподілу температури по поверхні кульки в одному з перетинів	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
50	2.9	Середня кількість сонячної енергії, яка поглинається поверхнею Землі	за даними аналізу NCEP-NCAR (Kalnay et al. 1996)

52	2.10	Альbedo земної поверхні на 1 серпня 2021 року, за даними NOAA-20 VIIRS	https://www.star.nesdis.noaa.gov/jpss/albedo.php
54	2.11	Обладнання для проведення дослідів	Ігор Чернецький
60	2.12	Середній місячний рівень вуглекислого газу, виміряний в обсерваторії Мауна-Лоа, Гаваї	https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html
60	2.13	Схема реалізації парникового ефекту	Із [5]
63	2.14	Обладнання для проведення дослідів	Катерина Терлецька
68	2.15	Глобальні викиди парникових газів в економічному секторі	IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report
72	2.16	Дія сил на тіло, що перебуває на поверхні Землі	Ігор Чернецький
73	2.17	Обладнання для проведення дослідів	Катерина Терлецька
75	2.18	Утворення рівнопотенційної поверхні при обертанні	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
76	2.19	Результати дослідів з утворення рівнопотенційних поверхонь для різних значень RPM	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
77	2.20	Графіки залежності висоти підняття рідини (чорна лінія – експериментальні дані, червона – теоретична крива (2.16))	Катерина Терлецька
80	2.21	Сила Коріоліса на різних широтах і модель обертового резервуара	Катерина Терлецька
82	2.22	Обладнання для проведення дослідів «Сила Коріоліса»	Катерина Терлецька

84	2.23	Послідовність дій у програмі Tracker із побудованими векторами прискорення руху кульки	Катерина Терлецька
89	2.24	Характер фарбованої течії без обертання та при обертанні	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
90	2.25	Характер фарбованої течії для випадків обертання із $\text{RPM} = 5$ об/хв та обертання із $\text{RPM} = 25$ об/хв	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
90	2.26	Характерний розмір вихорів для випадків обертання із $\text{RPM} = 5$ об/хв та обертання із $\text{RPM} = 25$ об/хв	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
92	2.27	Обладнання для проведення досліду «Маятник Фуко»	Катерина Терлецька
93	2.28	Траєкторії маятника без та з обертанням	Катерина Терлецька
94	2.29	Циркуляції на Землі по «колам інерції», що мають радіус деформації Россії	Катерина Терлецька
96	2.30	Порівняння теоретичної кривої траєкторії маятника (позначена чорним кольором) та результатів експерименту для $\text{RPM} = 20$. $L_{\text{pend}} = 0,88$ м (червоним)	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
107	3.1	Демонстрація порівняння теплоємності води і повітря	З відео курсу «Клімат у твоїх руках» (https://www.youtube.com/watch?v=Fh-G7K6Q80s0&t=15s)
111	3.2	Гідрографічний розріз уздовж (приблизно) 25° зх. д. через Атлантичний океан: а) температура ($^\circ\text{C}$); б) солоність (PSU)	Ocean Data View

113	3.3	Залежність густини прісної води від температури	Катерина Терлецька
117	3.4	Результати дослідів 8.1	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
118	3.5	Результати дослідів 8.2	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
119	3.6	Результати дослідів з подвійною дифузійною конвекцією	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
122	3.7	Експериментальна установка для дослідження теплового розширення води	Катерина Терлецька
129	3.8	Супутникові спостереження льодового покриття: а) 1979 рік; б) 2022 рік	https://www.nasa.gov/
130	3.9	Вміст CO ₂ за даними крижаних кернів	Reconstruction from ice cores. Credit: NOAA
132	3.10	Спрощена схема, яка пояснює, що таке лінія основи	www.AntarcticGlaciers.org
133	3.11	Прогнозовані зміни глобального рівня Світового океану порівняно з 1900 роком	IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report
136	3.12	Результат дослідів про танення морського та наземного льоду	Катерина Терлецька
137	3.13	Результати дослідів із танення льоду у солоній та прісній воді	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
138	3.14	Схематичне зображення дослідів танення льоду у прісній воді	Катерина Терлецька
139	3.15	Схематичне зображення дослідів танення льоду у солоній воді	Катерина Терлецька
145	3.16	Зміна льодового покриття в Антарктиці (взимку і влітку) та Арктиці (взимку і влітку)	https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/sea-ice-antarctic

146	3.17	Втрата маси льодових покривів із 2002 року: а) Гренландії; б) Антарктики	https://climate.nasa.gov/vital-signs/ice-sheets/
148	3.18	Відхилення середньої температури у 2022 році від середньої температури у 1951–1980 роках	https://www.nasa.gov/
149	3.19	Дослідження швидкості танення льоду на суші та у воді	https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/sea-ice-antarctic
151	3.20	Стратифікація води: а) за температурою; б) за солоністю; в) за густиною	Катерина Терлецька
152	3.21	Малюнки з трактату Марсильї	from Pinardi N. E. et al.
154	3.22	Хід та результат експерименту Марсильї	
157	3.23	Спостереження внутрішніх хвиль на супутникових зображеннях сонячних відблисків Modis (спектрорадіометр із зображенням середньої роздільної здатності)	Jeckson et al 2012
158	3.24	Схема прямокутного лабораторного лотка з двошаровою стратифікацією	Катерина Терлецька
161	3.25	Спостереження внутрішніх стоячих хвиль	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
163	3.26	Результат експерименту	Катерина Терлецька
164	3.27	Дві пляшки, наповнені водою і олією: одна з гладкими стінками, інша зі звуженням посередині	Катерина Терлецька
166	3.28	Профіль температури в Південно-Китайському морі, що демонструє солітон внутрішньої хвилі [7] та солітон поверхневої хвилі	а) [7]; б) https://the-gist.org/2012/07/how-a-scottish-naval-engineer-and-his-horse-discovered-solitons/

167	3.29	Результати дослідження впливу неоднорідності дна на внутрішні хвилі	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
169	3.30	Термохалінна циркуляція	https://www.grida.no/resources/5228
172	3.31	Хід дослідів з моделювання термохалінної циркуляції	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
173	3.32	Спрощена схема термохалінної циркуляції в лабораторному басейні	Катерина Терлецька
174	3.33	а) карта Гольфстріму Франкліна – Фолджера; б) зображення Гольфстріму, зроблене за допомогою інфрачервоного спектро-радіометра із середньою роздільною здатністю (MODIS)	а) https://salinity.oceansciences.org/learn-more.htm?id=107 ; б) https://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/0/681/gulf_stream_modis_lrg.gif
178	3.34	Підготовка до дослідів з моделювання течії Гольфстрім	Катерина Терлецька
179	3.35	Теплий струмінь, що витікає в резервуар без обертання	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
179	3.36	Теплий струмінь, що витікає в резервуар з обертанням	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
182	3.37	а) модель спіралі Екмана описує структуру течій та вітрів поблизу поверхні, коли напрямом течії поступово відхиляється від первинного напрямку під дією обертання Землі з віддаленням від поверхні; б) транспорт Екмана: утворення антициклонічного та циклонічного потоків	[4]

183	3.38	Механізм екманівського накачування: апвелінг (всмоктування за Екманом) і даунвелінг (нагнітання за Екманом)	Перемальовано з [4]
188	3.39	Хід досліду з екманівським накачуванням – апвелінг	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
189	3.40	Хід досліду з екманівським накачуванням – даунвелінг	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
191	3.41	Імовірний вплив стовпчиків Тейлора на танення літнього льоду в Чукотському морі	Martin and Drucker, 1997
192	3.42	а) відхилення горизонтального потоку, що оминає перешкоду; б) схема циркуляції навколо підводної гори	а) [4]; б) [20]
195	3.43	Результат обходження потоком шайби	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
202	4.1	а) сонячна радіація, що досягає районів на більш високих широтах, менш інтенсивна, ніж сонячна радіація, яка досягає тропіків; б) розподіли потоку енергії Сонця в дні сонцестояння та середньорічне середнє значення	а) Катерина Терлецька; б) з [4]
205	4.2	Типовий температурний профіль та профіль тиску для атмосфери Землі (характеристика 40° пн. ш. у грудні)	Перемальовано з [4]
208	4.3	Хід досліду, що демонструє теплову конвекцію у резервуарі з водою	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника

212	4.4	Хід демонстрації утворення хмар при адіабатичному розширенні	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
213	4.5	Схема, що демонструє відхилення сили Коріоліса	Перемальовано з https://www.pinterest.com/pin/829647562588175699/
214	4.6	Циркуляційні атмосферні комірки: а) без обертання Землі; б) з обертанням Землі: 1) східні вітри полярних регіонів; 2) і 5) західні вітри; 3) північно-східний пасат; 4) південно-східний пасат; 6) полярна комірка; 7) і 9) комірка Феррела; 8) комірка Гадлі	Перемальовано з рис. 7.5 з книги <i>The Atmosphere</i> , 8th edition, Lutgens and Tarbuck, 2001 [15]
216	4.7	Циркуляційні комірки	Взято з [16]
217	4.8	Стійка полярна комірка і нестійка полярна комірка, що виникає в результаті нагрівання планети	Перемальовано з https://public.wmo.int/en/media/news/february-mixed-temperatures-highlight-new-%E2%80%9Cclimate-norms
220	4.9	Результати дослідження із обертанням ($\Omega = 1$ рад/с) для різних моментів часу	Результати експериментів, що проведені упорядниками посібника
221	4.10	а) атмосферна річка, яка наближається до Каліфорнії. Високий рівень вологості має темно-зелений колір, а низький рівень вологості – коричневий; б) частина обертового басейну з експерименту з обертаннями ($\Omega = 1$ рад/с)	а) NASA, 5:30 a.m. Pacific Standard Time on January 4, 2023, public domain; б) результати експериментів, що проведені упорядниками посібника

224	4.11	Тропічний циклон 21 лютого 2023 року після більш ніж двох тижнів подорожі через Індійський океан	https://www.nasa.gov/images/
225	4.12	Конфігурація досліду для моделювання вихору	Катерина Терлецька
227	4.13	Завантажене відео у програмі Tracker	Катерина Терлецька
229	4.14	Встановлення масштабу та початку координат у програмі Tracker	Катерина Терлецька
230	4.15	Відслідковування траєкторій клаптиків у програмі Tracker	Катерина Терлецька
231	4.16	Числа Россбі, розраховані як функція від нормованої на радіус циліндра (відерця) відстані частинки до центру резервуара за п'ятьма різними частинками для випадку обертання з частотою $n = 10$ об/хв; суцільна лінія — теоретична оцінка	Катерина Терлецька
Додатки			
243	1	Комплектація обертової установки	Катерина Терлецька
244	2	Управління обертовою установкою	Катерина Терлецька

Навчальне видання

Кліматична освіта: фізика атмосфери і океану

Навчально-методичний посібник

Відповідальна за випуск *А. Грітчина*
Редагування *Т. Рябокін*
Верстання *О. Жупанська*
Дизайн обкладинки *О. Чекановська*

Формат 84×108/16. Папір офс. 80 г/м².
Друк цифровий. Ум. друк. арк. 10,23.
Наклад 300 пр.

Видавництво: Національний центр
«Мала академія наук України»,
Кловський узвіз, буд. 8, м. Київ, 01021

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 6999 від 04.12.2019

