

УДК 272.03.18

Ірина Сліпухіна, Ігор Чернецький,
Денис Євтушенко, Валерія Сич

ЦИФРОВА ДИДАКТИКА ФІЗИКИ: МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИПАРЮВАЛЬНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ

Запропоновано навчальний STEM-проект з дослідження процесу випарювального охолодження. Засвідчено його інтердисциплінарний характер, що сприяє розвитку як предметних компетенцій, так і «гнучких навичок», зокрема вміння розв'язувати комплексні задачі і критично мислити. Практичну частину дослідження з отримання й аналізу швидкості зміни температури в процесі випарювального охолодження в різних умовах запропоновано реалізувати з використанням цифрового вимірювального комплексу.

Ключові слова: STEM, випарювальне охолодження, випарювальний охолоджувач, цифровий вимірювальний комплекс.

Постановка проблеми. Педагогіка XXI століття ґрунтується на використанні допитливості як рушійної сили навчання. Окрім того, експоненціальний розвиток техніки і технологій сприяє інтенсивному залученню до формальної і неформальної освіти STEM-підходів. Останні ґрунтуються на використанні як методик навчання розв'язання реальних локальних і глобальних проблем, якими є, до прикладу, альтернативна енергетика й енергозбереження. Так, у світі велика кількість населення ще й досі має обмежений доступ до ліній електропередач [1], а кліматичні зміни вимагають виваженого ставлення до споживання в широкому сенсі цього слова [2]. Наприклад, навіть невелика холодильна установка відомого виробника класу енергоефективності A+++ споживає 182 кВт год електроенергії на рік [3].

Нині оцінка ефективності технологій виготовлення і конкурентоспроможної продукції передбачає не тільки дослідження затребуваності продукту на ринку, надійності обладнання і екологічності виробництва, а й аналіз енергоресурсозбереження. При цьому досліджуються конструктивні і технологічні особливості апаратів, що забезпечують оптимальні умови перебігу виробничих процесів.

Отже, існує потреба створення енергоефективного пристрою, який:

- виготовлений з природних матеріалів (як-от глина, вода, пісок), здатних до самовідновлення;

- має простий принцип роботи, що ґрунтується, наприклад, на явищі охолодження середовища під час випаровування.

Таким вимогам відповідає конструкція *evaporative cooler*, або випарювальний охолоджувач (ВО), основою дії якого є процес випаровування води (питома теплота пароутворення значна — 2,4 МДж/кг) [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нагадаємо, що дія систем кондиціонування повітря ґрунтується на парокомпресійному циклі або циклі абсорбційного охолодження [5]. Зауважимо, що температура сухого повітря може бути істотно знижена під час фазового переходу рідкої води в пару, і цей процес вимагає значно меншої енергії, ніж компресійне охолодження.

Однак слід взяти до уваги, що кондиціонування повітря шляхом випарного охолодження збільшує його вологість, що є комфортним для життєдіяльності людини в сухому кліматі, та не завжди позитивно впливає на певні види продукції. Ще однією важливою особливістю випарювального охолодження є те, що, на відміну від парокомпресійного циклу, воно вимагає постійного надходження води для випаровування і є ефективним тільки за низької відносної вологості, а це обмежує його ефективне застосування для кліматичних зон з високою температурою повітря і високою вологістю. Наприклад, у таких містах США,

як Денвер, Солт-Лейк-Сіті, Альбукерке, Ель-Пасо, Тусон і Фресно, де широко використовують випарні охолоджувачі, доступні великі обсяги води¹. У США навіть вживають термін *swamp cooler* («болотний охолоджувач»), який, можливо, з'явився через запах водоростей, що був у перших моделях апаратів [6]. Випарне кондиціонування повітря також є доволі популярним у південній частині Австралії. Це, зокрема, пояснюється тим, що в сухому, посушливому кліматі вартість установки і експлуатації ВО є приблизно на 75% нижчою, ніж для класичного кондиціонування повітря [7].

Випарне охолодження також широко застосовують в інших місцях², як-от: промислові підприємства, кухні в ресторанах, пральні, хімічистки, теплиці, місця з додатковим охолодженням (склади, заводи, будівельні і спортивні майданчики, майстерні), аграрні комплекси та ін.

Охолодження при випаровуванні — це фізичне явище, за якого випаровування рідини з поверхні об'єкта в навколишнє повітря охолоджує сам об'єкт. Кількість теплоти, необхідна для випаровування рідини, надходить з навколишнього середовища. Нагадаємо, що при вивченні випаровування води вологий термометр порівнюється із сухим: отримане значення відповідає потенціалу охолодження при випаровуванні. Чим більша різниця двох температур, тим меншою є відносна вологість повітря і тим більшим буде ефект охолодження.

На Землі велика кількість води випаровується деревами через продихи³ — особливі пори на листі рослин. Завдяки цьому процесу ліси впливають на клімат планети в локальному і глобальному масштабі.

Випарне охолодження, яке називається антипарниковим ефектом⁴, у планетарному масштабі можна спостерігати на супутнику Сатурна — Титані.

Випарне охолодження також є останнім кроком при досягненні ультранизьких температур. Водночас для вибіркового видалення високоенергетичних (гарячих) атомів з атомної хмари, поки решта атомів охолоджується до темпера-

тури, нижчої за температуру конденсації Бозе — Ейнштейна, використовують так зване примусове випарне охолодження. Для хмари, що складається з одного мільйона атомів лужних металів, ця температура становить близько 1μK⁵.

Цікаво знати, що хоча автоматичні космічні апарати майже повністю використовують теплове випромінювання як джерело енергії, проте в конструкціях багатьох пілотованих космічних апаратів вже застосовують випарне охолодження, наприклад у Space Shuttle і Apollon Module⁶.

Оригінальними є дослідження, проведені інженерами з Колорадського і Вайомінгського університетів, які розробили плівку, здатну охолоджувати предмети або матеріали без витрат води та енергії навіть під прямими сонячними променями [8].

Цікавим також є архітектурно-будівельний аспект проблеми. Так, фахівцями Університету Меріленда і Колорадського університету в Боулдері було створено новий будівельний матеріал — деревину, що здатна охолоджувати приміщення на 10 °C [9], а вчені зі Стенфордського університету розробили сонячні панелі, які охолоджують воду, працюючи без електрики, а також ефективно і недорого охолоджують приміщення і в перспективі можуть витіснити звичайні кондиціонери [10].

Несподіваними є факти, отримані фахівцями NASA (США), а саме: підвищення температури на 1 °C понад 22 °C знижує продуктивність праці на 3,6%, а за температури 32 °C вона зменшується загалом на 36%. Ті самі дослідження довели, що за 32 °C імовірність припущання помилок працівниками в три рази більша, ніж за нормальної температури (20 °C), тому потрібно влаштовувати перерву на одну годину в приміщенні з нормальною температурою [11].

Дослідникам з Колумбійського університету й Аргонської національної лабораторії вдалося розробити просте полімерне покриття, яке складається з сополімеру, вінілфториду і гексафторпропену. Нанесене на будівлю, таке покриття буде охолоджувати її навіть під прямими сонячними променями без будь-яких витрат енергії (*рис. 1*). Сополімер

¹ URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Evaporative_cooler (дата звернення: 15.10.2019).

² URL: <https://alantech.com.ua/ru/wiki/22/> (дата звернення: 15.10.2019).

³ URL: <https://pidruchniki.com/86602/ekologiya/transpiratsiya> (дата звернення: 15.10.2019).

⁴ URL: <https://www.newscientist.com/article/mg13117873-200-science-antigreenhouse-effect-reduces-warming-of-saturns-moon/> (дата звернення: 15.10.2019).

⁵ URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D1%81%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BE%D1%85%D0%BB%D0%B0%D0%B6%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5 (дата звернення: 15.10.2019).

⁶ URL: <https://click.ru/JXzh5> (дата звернення: 15.10.2019).

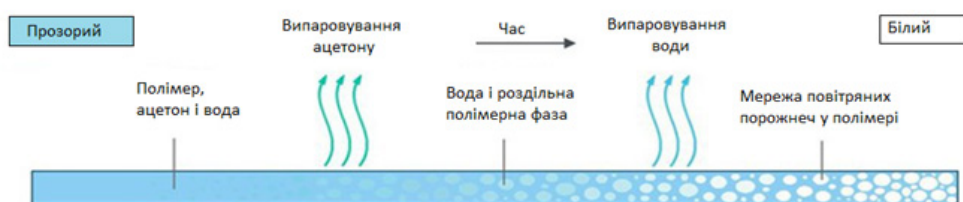


Рис. 1. Схема освітлення пористого сополімерного покриття

у складі плівки добре розчиняється в ацетоні і дуже погано — у воді. Завдяки цьому в процесі випаровування ацетону з однорідного розчину виділяються краплі води, які не дають змінюватися пористій структурі полімеру. Потім випаровується і вода, а залишається тільки пориста полімерна плівка. В основі такої альтернативи кондиціонерів лежить ефект пасивного радіаційного охолодження: якщо поверхня добре відбиває або розсіює сонячне світло і променисте тепло, то вона буде самостійно, без будь-яких додаткових зусиль, охолоджуватися, відводячи тепло у вигляді випромінювання [12].

Використання випарного охолоджувача, або термопота (рис. 2), сягає сивої давнини. Ще тоді було помічено, що в темряві і холоді печер продовольчі запаси зберігалися трохи довше, ніж на відкритому просторі. Так за багато тисяч років існування людства було винайдено чимало способів заморозки: похідні холодильні ями, перенесення і зберігання їжі в тарі з льодом, а також домашній льох тощо.

Найдієвішим способом зберігання продуктів було спускання під ґрунт. Особливо придатним цей варіант є для місць зі «сприятливим» холодним кліматом. Так, правильно організований, оброблений і викопаний льох забезпечує цілорічну температуру на рівні 7–12 °С.

Однак, незважаючи на всю простоту виготовлення випарного охолоджувача з двох глиняних горщиків і вологого піску (див. рис. 2), такий глиняний холодильник дуже схожий на сучасний. Лише з тією відмінністю, що тепер замість води

використовують більш ефективні охолоджувачі (фреон, аміак тощо), камера з охолоджувачем розташована не зовні камери з продуктами, а просто поряд з нею (конденсатор на задній стінці холодильника), і найголовніше: охолоджувач тепер не випаровується в атмосферу, а рухається під тиском по замкненому циклу, закипаючи, охолоджуючись і знову закипаючи [13].

Усе вищезазначене окреслило **мету статті**, якою є представлення методики дослідження ефективності випарного охолоджувача із застосуванням цифрового вимірювального комплексу.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленої мети було використано установку термопота (ВО) (див. рис. 2).

Під час виконання дослідження було використано таке обладнання (рис. 3):

- анемометр — прилад для вимірювання швидкості повітряного потоку і визначення його напрямку;
- кулер (від англ. cooler) — дослівно перекладається як «охолоджувач» — пристрій, призначений для охолодження елементів, що нагріваються;
- лабораторний блок живлення — джерело живлення, призначене для постачання на кулер електроенергії постійного струму шляхом перетворення мережевої напруги до необхідних значень, у нашому випадку — 12 В;
- датчик вимірювання температури — пристрій, який дає змогу виміряти температуру об'єкта або середовища, використовуючи при цьому різні характеристики вимірюваних тіл;

Дослідна установка термопота



Рис. 2. Конструкція випарного охолоджувача

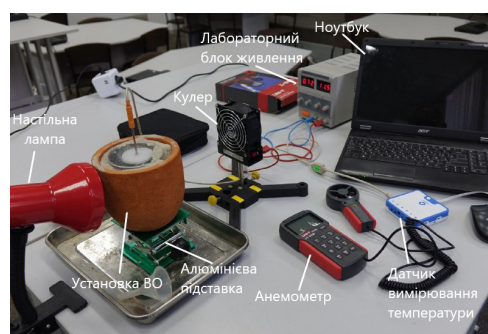


Рис. 3. Дослідна установка

- настільна лампа — світильник, який використовувався для освітлення і підсилення процесу випаровування через нагрівання горщика, імітуючи нагрівання під дією Сонця;
- ноутбук — переносний персональний комп'ютер, який використовувався для отримання й опрацювання даних, знятих з датчика температури;
- алюмінієва підставка з можливістю змінювати висоту;
- установка з ВО.

Для початку дослідження випарного охолодження було зібрано дослідну установку ВО: у неглазурований глечик більшого розміру починають засипати пісок так, щоб між ним і глазурованим горщиком меншого розміру можна було утворити рівномірний його шар певної товщини (в нашому досліді $d = 3$ см). У глазурований горщик кладуть об'єкт дослідження (наприклад, звичайний цукор). Горщик накривають пластиковою кришкою зі зробленим по центру отвором, через який поміщають датчик температури. Всю установку розміщують на горизонтальній поверхні на алюмінієвій підставці на рівні кулера для обдуву ВО. Кулер підключають до лабораторного джерела живлення і задають напругу 12 В. Для підсилення ефекту в процесі випаровування підключають настільну лампу, яка нагріває всю установку ВО, імітуючи нагрівання від Сонця.

З використанням датчиків температури і програмного забезпечення MiLab (Fourier)¹ для ВО записують і візуалізують у вигляді графіків $T = f(t)$ дані зміни температур навколишнього середовища й охолодженого об'єкта дослідження залежно від часу під дією повітряного потоку

¹ URL: <http://einsteinworld.com/product/einstein-milab/> (дата звернення: 15.10.2019).

кулера і під дією лампи розжарення (рис. 4). Окрім того, до процесу вимірювання можна залучати датчик відносної вологості повітря. Під час експерименту спостерігають, аналізують і порівнюють швидкість зниження температури ($\Delta T/\Delta t$) під дією кожного з чинників.

Зауважимо, що результати експериментів можна якісно пояснити, ґрунтуючись на фізичних основах процесу випаровування. Так, молекули поверхневого шару рідини (в наведеному досліді — молекули води на поверхні піску) долають сили міжмолекулярного притягання, покидають речовину, переходячи у водяну пару. При цьому «вільними» стають насамперед ті з молекул, які мають найбільшу швидкість (кінетичну енергію). Отже, середня швидкість молекул, що залишилися, і, як наслідок, внутрішня енергія (температура) речовини зменшуються. Процес обдуву зменшує відносну вологість повітря, «відганяючи» вже наявну пару, і в такий спосіб підвищує інтенсивність випаровування.

Висновки. Проведене дослідження засвідчило, що навчальні завдання, орієнтовані на розв'язання практично значущих проблем, потребують системного залучення великого кола соціальних, економічних і наукових даних. Їх комплексний аналіз у контексті поставленого завдання сприяє не тільки опануванню знань з провідних навчальних предметів, наприклад молекулярно-кінетичної теорії і термодинаміки як розділів фізики, а й розвитку критичного мислення з точки зору, наприклад, енерго- і ресурсоефективності та впливу на довкілля. У подальшому запропоноване навчальне STEM-дослідження може бути поглиблене: від зміни в дослідженні сорту піску і глини до побудови математичної моделі процесу.

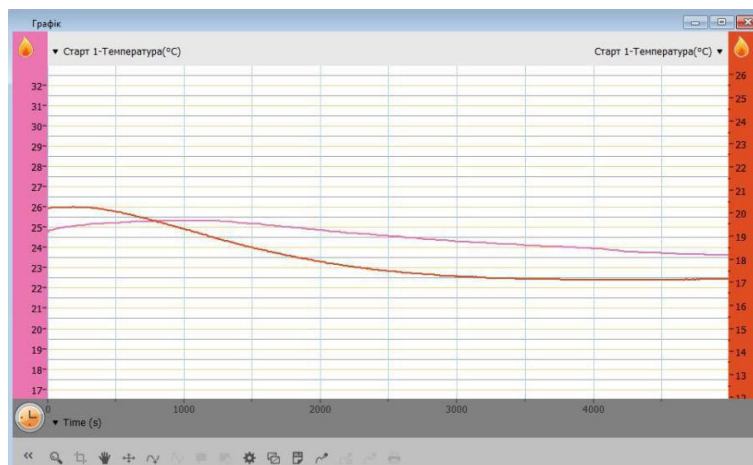


Рис. 4. Графічна залежність $T = f(t)$ для ВО під дією кулера (скріншот з екрана)

Список використаних джерел

1. Поділ країн на сорти: від 1-го світу до 4-го. [Online] — <https://pan-sapunov.livejournal.com/29608.html>.
2. ТСН. Глобальне потепління. Як Земля змінює обличчя. [Online] — <http://tsn.ua/special-projects/warming/>.
3. Bosch: KGN39AI45. [Online] — <https://www.bosch-home.com/de/suchergebnis?search=KGN39&pageNumber=1#/ProductCode=KGN39AI45/>.
4. Evaporative Coolers: characteristics and general parameters. [Online] — <https://www.energy.gov/energysaver/home-cooling-systems/evaporative-coolers>.
5. Лекція: пароежекторні та інші холодильні машини. [Online] — <http://www.tsatu.edu.ua/op/hv/wp-content/uploads/sites/13/лекцыя-7.-absorbcijni-holodylni-mashyny.-paroezhektorni-ta-inshi-holodylni-mashyny.pdf>.
6. How Swamp Coolers work?: <https://home.howstuffworks.com/home-improvement/heating-and-cooling/swamp-cooler.htm>.
7. Повітроохолоджувачі — ефективність, альтернативи (1). [Online] — <https://techhome.kiev.ua/uk/news/evaporative-air-cooler-air-conditioner-alternative/>.
8. Article from Science: Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling. [Online] — <https://science.sciencemag.org/content/355/6329/1062> та <https://clck.ru/JY2P2>.
9. Article from Science: A radiative cooling structural material. [Online] — <https://science.sciencemag.org/content/364/6442/760> та <https://clck.ru/JY2R2>.
10. Article from Nature Energy: Fuel cells: Bio-inspired design. [Online] — <https://www.nature.com/articles/nenergy2017143> та <https://clck.ru/JY4T2>.
11. Article from Air Water Therm: Охолодження випаровуванням — як це працює. [Online] — <https://aw-therm.com.ua/ohlazhdenie-ispareniem-kak-eto-rabotaet/>.
12. Елементи: Нова полімерна фарба ефективно охолоджує будівлі навіть під прямими сонячними променями. [Online] — <https://clck.ru/JY7WW>.
13. Холодильник.інфо: Як охолоджували їжу в давнину. [Online] — <http://www.holodilnik.info/articles/kak-hranili-edu-v-drevnosti/>.

Ирина Слипухина, Игорь Чернецкий, Денис Евтушенко, Валерия Сыч

ЦИФРОВАЯ ДИДАКТИКА ФИЗИКИ: МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Предложено учебный STEM-проект по исследованию процесса испарительного охлаждения. Показано его интердисциплинарный характер, что способствует развитию как предметных компетенций, так и «гибких навыков», в частности, умения решать комплексные задачи и критически мыслить. Практическую часть исследования по получению и анализу скорости изменения температуры в процессе испарительного охлаждения в различных условиях предложено реализовать с использованием цифрового измерительного комплекса.

Ключевые слова: STEM, испарительное охлаждение, испарительный охладитель, цифровой измерительный комплекс.

Irina Slipukhina, Igor Chernetsky, Denis Yevtushenko, Valeriya Sych

DIGITAL DIDACTICS OF PHYSICS: A TECHNIQUE FOR STUDYING THE PROCESS OF EVAPORATIVE COOLING

A STEM-training project on the study of evaporative cooling process is proposed. His interdisciplinary character is promoted, which promotes the development of both subject competences and “flexible skills”, in particular, the ability to solve complex problems and think critically. The practical part of the study on obtaining and analyzing the rate of change of temperature in the process of evaporative cooling in different conditions is proposed to be implemented using a digital measuring complex.

Keywords: STEM, evaporative cooling, evaporative cooler, digital measuring complex.