

УДК 373.5.016:53

О. Мельничук,
спеціаліст вищої категорії, вчитель фізики,
Іршанський ліцей Житомирської області
Іршанської територіальної громади
e-mail: melnichukoleksa@gmail.com

Вивчення залежності значень фотоструму від показників освітленості поверхні

Анотація. У статті на прикладі розділів «Квантова фізика» і «Електромагнітні хвилі» пропонується метод вивчення фізичних явищ через вміння побачити ціле в деталях і кожну деталь окремо як елемент цього цілого, не втрачаючи одночасний зв'язок між ними. На конкретно наведених прикладах розглядаються використані прийоми для отримання найкращого кінцевого результату. Описуються такі способи вивчення природних явищ, як спостереження, дослід, експеримент, інструменти, які для цього залучаються і яким є подальше практичне застосування у житті. Звертається увага на можливі помилки. Також надаються деякі конкретні результати, що були отримані у процесі проведення таких досліджень. Висуваються пропозиції для проведення подальшого глибшого вивчення даного питання.

Ключові слова: дослідження, дифракційна ґратка, світло, сонячна енергія, прилад, фотометричні величини, фотострум.

O. Melnychuk,
Specialist of the highest category, physics teacher,
Irshan Lyceum of Zhytomyr region
Irshan territorial community
e-mail: melnichukoleksa@gmail.com

Study of the dependence of the obtained photocurrent values on the indicators of surface illumination

Abstract. In this article, on the example of the chapters «Quantum physics» and «Electromagnetic waves», a method of studying physical phenomena is proposed, through the ability to see the whole in details and each detail separately as an element of this whole, without losing the simultaneous connection between them. The techniques used to obtain the best final result are considered using specific examples. Such methods of studying natural phenomena as observation, research, experiment, tools that are involved for this and what is the further practical application of the results in life are described. Attention is drawn to possible errors. Some specific results

obtained in the course of conducting such studies are also provided. Proposals are put forward for further, deeper study of this issue.

Keywords: research, diffraction grating, light, solar energy, device, photometric quantities, photocurrent.

Постановка проблеми в загальному вигляді. В процесі вивчення фізики ми маємо ситуацію поділу накопичених знань на окремі розділи: механічні явища, електричні, теплові тощо. В свою чергу і вони зазнають подальшої фрагментації. Наприклад, ми поділяємо механіку на кінематику і динаміку, електрику – на електродинаміку, електромагнітні коливання, закони постійного струму і так далі. Під час такої диференціації часто виникає проблема втрати зв'язку між елементами матеріалу, що вивчається. А ще важливіше – його невід'ємність від повсякденного життя. Кожен учений чи вчитель стикалися з таким неприємним фактом у власній практиці. Як же уникнути цього, подаючи матеріал про найелементарніші деталі і одночасно тримаючи в пам'яті образ того найвеличнішого, до чого вони належать? Як зберегти в одномоментній увазі всі методи і форми з вивчення поставленої перед собою чи учнем наукової проблеми? Як одночасно розширити кругозір дослідника у його прагненні вивчити навколишній світ? Спробуємо знайти відповіді на прикладі вивчення тем з таких розділів, як «Квантова фізика» і «Електромагнітні хвилі», які взаємозв'язані з розділом «Оптика», що вивчається у курсі фізики за 11 клас. При вирішенні цього завдання ми маємо порушити багато питань. Це і дуалістична природа світла, і фотометрія, і закони фотоефекту, і природа фотоструму тощо. І тут пошук відповіді варто розбити на декілька етапів.

Мета статті: показати, на скільки важливим під час вивчення фізичних явищ, для кращого засвоєння теми, є застосування наукового дослідження. А також збереження зв'язків між окремими елементами теми, що вивчається.

Виклад основного матеріалу дослідження. Постановка питання буде першим етапом в такому пошуку. То з чого ж найкраще починати вивчення матеріалу, щоб розглянути всі деталі і не загубити ціле? Варіантів може бути безліч, але для прикладу візьмемо один з них. На своєму шляху у розробці джерел альтернативної, тобто чистої і нескінченної енергії людство знайшло спосіб її поповнення за допомогою сонячних панелей. Цей момент став особливо актуальним у світлі подій, що вирують наразі у нашій країні – війна, руйнація енергетичних систем, залежність від централізованих форм її постачання і бажання убезпечити себе від її втрати. Кожен шукає свої прийоми вирішення цієї болючої проблеми і серед них – домашні сонячні мініелектростанції. Можна багато дискутувати щодо доцільності й ефективності їх застосування. Це питання піднімалось у науковому середовищі неодноразово, для прикладу можна привести хоча б роботу Я. О. Мельничука і Н. О. Якуніної «Сонячна енергетика в Україні» [1: 92]. У цій роботі вказується, що на сучасному етапі розвитку сонячної енергетики доцільність умов практичного застосування сонячних панелей обумовлюється лише тим нюансом, що об'єкт, який потребує такого заживлення, знаходиться у місці, де застосування інших видів енергії обійдеться йому ще дорожче. Так, станом на 2018 рік і до 2030 року собівартість 1 кВт

сонячної енергії для побутового споживача запланована державою у розмірі 594,86 копійки за 1 кВт на годину [2]. Порівнюючи з собівартістю електричної енергії, що ми отримуємо на сьогоднішній день від теплових, гідро і особливо атомних електростанцій, – 264 копійки за 1 кВт. Перевага останніх очевидна. Тож робимо проміжний висновок – використання енергії, яку несе світло, є варіантом, який можна змалювати однією фразою – «Іншого виходу немає». Бачимо, що розгляд цього факту дає нам зв'язок фізики з економікою і фінансами. Можемо відзначити нерозривність цих елементів і йдемо далі.

Наступний етап – пошук відповіді шляхом аналізу вже відомого теоретичного матеріалу окремих розділів фізики і проведення додаткових практичних спостережень. Чи можна виправити цю ситуацію, чи хоча б покращити? Зауважуємо, що під час пошуку відповіді на основне питання часто виникають додаткові. Відповідаючи на нього, не зайве застосувати науковий пошук, який може навіть виходити за рамки шкільної програми, що дасть можливість розширити обрії пізнання будь-якого дослідника. Для цього ставимо ще одне питання – а що може здешевити вартість сонячної електростанції і водночас підвищити її коефіцієнт корисної дії? Щодо здешевлення вартості, то це окрема величезна тема, яка стосується явищ фотоелектричного ефекту і будови сонячної панелі. А зараз звернемо увагу на вже згаданий розділ оптики «Фотометрія». Тут, зокрема, розглядаються умови, від яких залежить освітленість робочої поверхні, на яку падає світло, і фізичні величини, які їх характеризують. Отже, ми можемо попрацювати над елементами, які дадуть можливість покращити конструкцію і умови експлуатації пристрою з метою збільшення його ККД. Ми починаємо йти від вивчення загальної проблеми до окремих деталей, які допоможуть знайти необхідні розв'язки.

Відомо, що кількість переробленої світлової енергії в електричну залежить від кількості світла, що падає на відкриту поверхню матеріалу. Про цей факт є величезна кількість наукової літератури, у тому числі і шкільної. Але для нас цікавим є таке: фізичні величини, що це явище характеризують.

Перша з них – світловий потік. Це фізична величина, яка позначається літерою Φ . Характеризує джерело світла. Визначається величиною світлової енергії, що падає на поверхню матеріалу за одиницю часу. Математичний вираз:

$$\Phi = \frac{E_{\text{св}}}{t} \quad (1).$$

Тут Φ – світловий потік (лм), $E_{\text{св}}$ – величина світлової енергії (Дж); t – час (с). Показує, яка величина світлової енергії падає на поверхню матеріалу за одиницю часу. Одиниця вимірювання: 1 люмен, $[\Phi] = \text{лм}$.

Наступна величина – освітленість. Це фізична величина, яка позначається літерою E . Характеризує джерело світла. Визначається відношенням світлового потоку, що падає на поверхню, до площі цієї поверхні. Математичний вираз:

$$E = \frac{\Phi}{S} \quad (2) \quad E = \frac{I}{R^2} \cdot \cos\alpha \quad (3).$$

Тут E – освітленість (лк), Φ – світловий потік (лм), S – площа поверхні, на яку падає світловий потік (м^2), I – сила світла (кд), R – відстань до джерела (м). Показує, який світловий потік падає на одиницю площі поверхні. Одиниця

вимірювання: 1 люкс, $[E] = \text{лк}$. 1 люкс – це освітленість, яку створює світловий потік в 1 лм, падаючи на поверхню площею 1 м^2 .

Третя величина, яку слід відмітити, – сила світла. Це фізична величина, яка позначається літерою I . Характеризує джерело світла. Визначається величиною світлового потоку, що випромінює джерело у певному напрямку. Математичний вираз (формула):

$$I = \frac{\Phi}{4\pi} \quad (4).$$

Тут I – сила світла (кд), Φ – світловий потік (лм). Показує, якої величини світловий потік випромінює джерело світла у певному напрямку. Одиниця вимірювання: 1 кандела, $[I] = \text{кд}$.

Відмічаємо, що у всіх представлених величинах саме світловий потік з його енергією має первинне значення. Проаналізуємо кожну з цих формул.

Згідно з першою формулою (1) можемо сказати таке. Якщо ми хочемо збільшити показники переробки світлової енергії в електричну, то слід збільшити енергію світлового потоку. Для початку ми можемо досягнути цього, намагаючись зробити так, щоб робоча поверхня довше залишалась освітленою. Тоді є очевидним, що в літній період ми отримуватимемо більше енергії за рахунок довшого світлового проміжку. А далі можемо збільшити цей час, якщо піднімемо сонячну панель як можна вище від рівня світового океану. Чим вище ми будемо від його поверхні, тим довше зможемо ловити сонячні промені.

Окремим чинником, що впливає на цей показник, є метеорологічні умови, але це уже тема окремої статті. А зараз проаналізуємо другу формулу (2). Тут для отримання кращих показників струму слід збільшити робочу площу панелей. Чим вона більша, тим більших значень набуватиме вироблена електрична енергія. Якщо ж дивитись на формулу (3), то в цьому випадку на кінцевий результат впливає кут падіння променів на поверхню. Тобто, якщо розглядати кут $\cos \alpha$ у контексті даної формули, то видно прямо пропорційну залежність результату освітленості від цієї величини. І тут звертаємо увагу на той факт, що ті, хто вивчає цю тему, часто роблять помилку при визначенні даного кута. Річ у тім, що у фізиці кут падіння світлових променів розглядають як градусну міру між падаючим променем і перпендикуляром, опущеним до точки падіння променя на робочу площину (рис 1.) Тоді, при наближенні кута до градусної міри рівною нулю, косинус кута падіння становитиме одиницю, і ми отримаємо найкращий показник освітленості панелі.

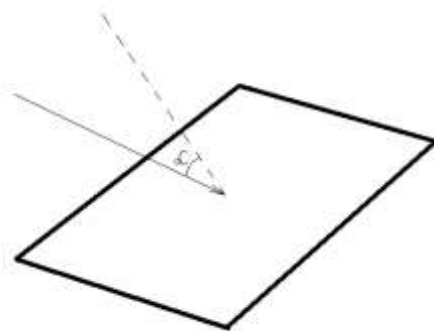


Рис. 1

Інші ж вважають таким кутом міру між падаючим променем і площиною, на яку він падає. Але в цьому випадку, виправляючи помилку, слід вказати, що косинус кута, при його збільшенні, прямуватиме до дев'яноста градусів, а отже, до нуля, що є нонсенсом!

Тож підкреслюємо, що робочу панель сонячної батареї, для отримання найкращих показників струму, слід весь час розташовувати перпендикулярно до падаючих сонячних променів. Але це неможливо виконувати постійно вручну, змінюючи розташування панелей відповідно до кута падіння сонячних променів, який міняється протягом дня. Автоматично це питання вирішується за допомогою так званих сонячних трекерів, але ми, повертаючись до наших фотометричних величин, звертаємо увагу на відстань до джерела R . Бачимо обернено пропорційну залежність – чим ближче буде робоча панель до світила, тим в квадратичному значенні зростатимуть показники її освітленості. Та в наших земних умовах ми не в змозі значно вплинути на цей нюанс, хіба що перенести панелі у високогір'я. Однак наскільки ефективніші результати будуть отримані при їх наблизенні до Сонця лише на декілька тисяч метрів, можна буде сказати тільки після проведення ряду експериментів. На цю мить є великі сумніви з приводу того, що зміни на краще будуть значними.

Окремо слід зауважити, що, як показала практика, на сонячну панель під час її освітлення ні в якому разі не повинна падати тінь, що частково перекриває якусь частину панелі. Це негативно впливає на її роботу, створюючи різні значення струмів у різних місцях однієї і тієї ж батареї.

І в останньому рівнянні (4) бачимо пряму залежність сили отриманого світла від попередніх величин і світлового потоку. Тобто, якщо всі сонячні промені вдасться направити в одному напрямі на сонячну панель, то сила світла отримає найвищі показники.

До того ж, на напрям проходження сонячних променів і їхню швидкість у шарах атмосфери прямо впливає хмарність і вологість, а отже, знову слід звертатись до метеорології і проводити додаткові експерименти і спостереження з цього питання.

Тож підсумуємо, що при вивченні теми по перетворенню світлової енергії у електричну у сегменті фотометричних величин для отримання найкращих показників нам необхідно мати ясне, не закрите хмарами світило, яке може освітлювати робочий пристрій як можна довший час – t . Робочі панелі більшої площі – S . Їх розташування має бути максимально перпендикулярним до падаючих променів світла – $\cos \alpha$. Звісно, у разі можливості, панелі слід підняти як можна вище відносно поверхні світового океану.

Також зупинимось на рівнянні Планка, як воно подається на рівні середньої школи у темі «Закони фотоефекту»:

$$E=h \cdot \nu \quad (5).$$

Пам'ятаємо, що тут E – енергія порції світла (кванта), $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка, ν – частота випромінювання даного кванта. Отже, бачимо, що на енергію порції світла напряму впливає частота його випромінювання. Дізнавшись її, ми можемо вирахувати, яку кількість світлової енергії для подальшої переробки в електричну ми отримуємо. Можливо, за даних умов у даній місцевості кількість

отриманої світлової енергії взагалі буде такою, що встановлення сонячної батареї не окупиться ні за яких умов! Та й взагалі її робота буде настільки непродуктивною, що лише створюватиме додаткові проблеми. То як нам вирахувати частоту – ν ?

Для відповіді розглянемо запис, який пов'язує частоту хвилі з її довжиною у обернено пропорційному відношенні. Ця особливість стосується будь-якого виду хвиль – як механічних, так і електромагнітних. Але пам'ятаємо, що світло має дуалістичну природу, тобто і хвильові властивості. Тож згадуємо, що зв'язок між цими двома величинами описується наступним математичним виразом:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (6).$$

Тут ν – частота хвилі (Гц), λ – довжина хвилі (м), c – швидкість світла, що є сталою величиною і наближено становить $3 \cdot 10^8$ (м/с).

Третій етап – проведення практичних вимірів. Знаходження довжини світлової хвилі розглядається у курсі шкільної програми у формі лабораторної роботи після вивчення явищ інтерференції і дифракції. Тут отримуються практичні навички з обчислення даної величини. Для цього використовують такий прилад, як дифракційна ґратка. Нагадуємо, що дифракційна ґратка – це прилад, призначений для спостереження явища дифракції та визначення довжини світлової хвилі. Являє собою прозору скляну пластину, яка складається з великої кількості вузьких шпарин, розділених непрозорими проміжками, що створюються нанесенням на пластину паралельних подряпин алмазним різцем (рис 2).

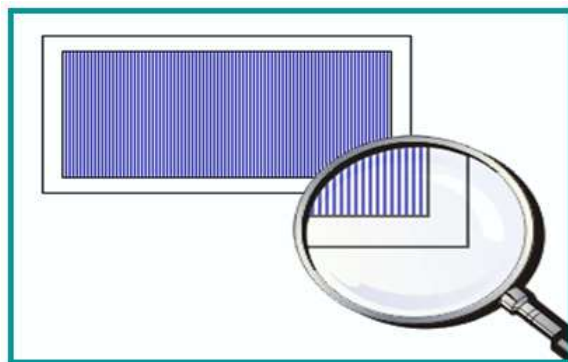


Рис. 2

Діє ґратка таким чином: якщо на неї падає монохроматична хвиля, то у шпаринах ґратки утворюються «вторинні джерела» когерентних хвиль. Якщо різниця їхнього ходу буде кратна цілому числу довжин хвиль, то хвилі підсилять одна одну і у просторі будемо спостерігати максимум у вигляді світлої чи веселкової смуги. Характеристикою ґратки є її період, який позначається літерою d і визначається сумою ширини шпарини і непрозорої подряпини. Визначається за формулою:

$$d = a + b \quad (7).$$

Тут a – ширина шпарини, b – ширина подряпини-перегородки. Показує, чому дорівнює сума ширини шпарини і непрозорої перегородки. Одиниця вимірювання – м.

Далі ми використовуємо цей прилад разом з дифракційною лінійкою (рис. 3), які разом і дають нам можливість визначити довжину світлової хвилі.

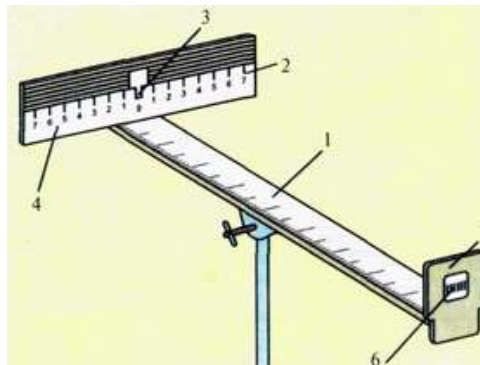


Рис. 3

Тут: 1 – робоча лінійка, яка дає можливість визначити відстань від дифракційної ґратки до екрану; 2 – екран, на якому утворюється інтерференційна картинка у вигляді чергування спектральних смуг; 3 – щілина екрану, через яку світловий потік падає на ґратку; 4 – лінійка, яка визначає відстань від щілини до того чи іншого кольору спектру відповідного порядку k ; 5 – рамка для утримання дифракційної ґратки; 6 – дифракційна ґратка.

Для отримання потрібних даних ми використовуємо таку формулу:

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k} \quad (8).$$

Тут $k = 1, 2, 3, \dots$ – порядок спектру, d – період ґратки, φ – кут між напрямом поширення хвилі і перпендикуляром до ґратки. Можливість визначити кут φ пояснюється на рис. 4 як відношення сторін прямокутного трикутника: a – відстань від щілини екрану до вибраного кольору обраного порядку (світловий максимум) на l – відстань від ґратки до екрану.



Рис. 4

Тепер подивимось, що показали практичні дослідження під час проведення відповідних вимірів. У вказаній нижче таблиці (1) надаються середньостатистичні результати, які були отримані протягом лютого місяця за різних погодних умов і бажано в один фіксований час – 14:00.

У першому стовпчику вказується колір смуги максимуму першого порядку, тобто $k = 1$. У другому – відстань від шпарини екрана до самого кольору a . Третій стовпчик – відстань від дифракційної ґратки до екрану l – вона є фіксованою для всіх кольорів, як і період самої ґратки d . П'ятим іде стовпчик з обчисленими результатами щодо шуканої довжини хвилі кожного з кольорів λ . Також тут вказуються і одиниці виміру наведених величин – метр. Нагадую, що для проведення обчислень ми використовуємо формулу (8).

Таблиця 1

Колір смуг	a , м	l , м	d , м	λ , м
Фіолетовий	0.012	0.26	10^{-5}	$4.6 \cdot 10^{-7}$
Синій	0.013	0.26	10^{-5}	$5 \cdot 10^{-7}$
Блакитний	0.014	0.26	10^{-5}	$5.4 \cdot 10^{-7}$
Зелений	0.015	0.26	10^{-5}	$5.7 \cdot 10^{-7}$
Жовтий	0.017	0.26	10^{-5}	$6.5 \cdot 10^{-7}$
Помаранчевий	0.018	0.26	10^{-5}	$6.9 \cdot 10^{-7}$
Червоний	0.019	0.26	10^{-5}	$7.3 \cdot 10^{-7}$

За отриманими результатами бачимо, що найбільшу довжину, а отже, згідно з формулою (6), найменшу частоту, мають хвилі червоного кольору видимого білого світла. А найменшу довжину, а значить і найбільшу частоту, хвилі фіолетової частини спектра.

Слід зауважити, що хвилі фіолетової частини спектра, а особливо ультрафіолетової, є найбільш важливими при розгляді нашого питання. Саме вони матимуть найбільші значення частоти. Однак провести практичні дослідження довжини ультрафіолетових хвиль в шкільних умовах ми, на жаль, змоги не маємо. Для цього використовують такі спеціальні пристрої, як спектрографи і монохроматори [3: 177], якими шкільні лабораторії, як правило, не володіють.

Четвертий етап: перейдемо безпосередньо до наших обчислень, які і дають нам кінцевий результат щодо того, про що ми говорили на початку нашої статті. За результатами наших спостережень, ми отримали таке:

$$\nu = \frac{3 \cdot 10^8}{4.6 \cdot 10^{-7}} = 65 \cdot 10^{13} \text{ (Гц)}.$$

Доволі непогані частотні дані, як для зимової освітленості поверхні. Але, як показує практика, недостатні для високоефективної роботи сонячної станції. І це не дивно – це ж лише фіолетовий сегмент спектра.

Далі підставимо це число у формулу (5) і отримаємо число щодо енергії нашого кванта. Підкреслюємо, що тут $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ (Дж·с) – це стала Планка:

$$E = 6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 63 \cdot 10^{13} \approx 417.1 \cdot 10^{-21} \text{ (Дж)}.$$

Тут можна зауважити, що етап переведення отриманих даних у частоту можна було б і пропустити, використавши дані довжини світлової хвилі напряму, перетворивши формулу (5) у вигляді:

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (9).$$

І тепер ми можемо отриманий результат підставляти у фотометричні формули (1), (2), (4), отримуючи дані по світловому потоку Φ , освітленості E і силі світла I . Формулу (3) на цьому етапі пропустимо, тому що, нагадаю, тут дані стосуються кута падіння променів світла на робочу поверхню, а цей кут не є величиною постійною. Щодо наших показників, то результати виходять такими:

$$\Phi = \frac{417.1 \cdot 10^{-21}}{1} = 417.1 \cdot 10^{-21} \left(\frac{\text{Дж}}{\text{с}} \right).$$

За 1 секунду на поверхню матеріалу падає $417.1 \cdot 10^{-21}$ люменів світлової енергії.

$$E = \frac{417.1 \cdot 10^{-21}}{1} = 417.1 \cdot 10^{-21} \text{ (лк)}$$

Таке саме значення, $417.1 \cdot 10^{-21}$ люменів світлової енергії падає на кожен квадратний метр робочої поверхні.

$$I = \frac{417.1 \cdot 10^{-21}}{4 \cdot 3.14} = 33.21 \cdot 10^{-21} \text{ (кд)}$$

Бачимо, що одночасно з цим сила світлового потоку, що падає на поверхню панелі, становить $33.1 \cdot 10^{-21}$ кандел.

То що ж можуть нам дати всі ці дані у робочих показниках вихідного фотоструму? Для подальшого застосування отриманих попередніх результатів під час вивчення оптичних явищ використовуємо закони фотоефекту і рівняння Ейнштейна, що їх характеризує:

$$h \cdot \nu = A + \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (10).$$

Додатковий етап, на якому, зберігаючи зв'язок між темами даного розділу, ми можемо використати результати отриманих спостережень, вимірів, експериментів і висновків під час складання і розв'язування задач в практичних роботах. Зразки таких задач достатньою мірою представлені у шкільних підручниках і наукових посібниках [4]. От тільки в нашому випадку, на основі особисто отриманого, ми можемо скласти щось своє. Наприклад, враховуючи, що найкращий ККД дають сонячні панелі, виготовлені з монокристалів індію чи германію, можна поставити таке завдання:

«Виходячи з отриманих нами попередніх результатів довжини хвилі, знайдіть, чи можливий фотоефект при падінні даної хвилі на пластину германію? Робота по виходу електрона з поверхні германію становить 4.8 еВ. Якої швидкості у цьому випадку набуде фотоелектрон?»

Не будемо займати час на представлення розв'язку даної задачі, він типовий. От тільки цінність цієї практичної частини полягає в тому, що дані для неї були отримані власноруч.

Ця робота, по суті, являє собою ту частину загального питання, в якому здебільшого представлена його теоретична складова. Варто було б висвітлити ширше і результати практичних спостережень щодо вихідних значень електричного струму, отриманого в результаті опромінення сонячних батарей

сонячним світлом за різних погодних умов. Але це важко зробити в умовах однієї статті.

Окрім того, ще одним доволі важливим моментом є підтвердження отриманих результатів освітлення поверхні і вироблення фотоструму за допомогою актинометричних приладів, будова і принцип роботи яких є відмінним від кристалічної ґратки чи скляної призми, про що можна дізнатися з відповідної літератури [5: 17–39]. Але це вже інші історії, які варто висвітлити у наступних роботах.

Висновок. Для отримання найкращого результату під час вивчення матеріалу з фізики важливим є наявність елементу наукового дослідження при вивченні будь-якого розділу. При цьому важливо весь час слідкувати за тим, щоб зберігався нерозривний зв'язок між окремими темами і частинами всього розділу. Для цього слід задіяти всі необхідні методи і прийоми – від складання і розв'язування задач до власноруч проведених експериментів. Водночас не забуваємо дотримуватись чітко визначеної послідовності:

- спочатку ставимо перед собою питання, яке хочемо дослідити;
- проводимо спостереження і вивчаємо вже накопичений матеріал;
- робимо необхідні експерименти;
- працюємо з отриманими результатами і обчисленнями;
- приходимо до висновків, які можуть робитись як наприкінці кожного етапу, так і на загал.

Досвід показує, що вміння бачити не тільки окремі деталі, а і весь матеріал загалом, і підкріплення цього бачення як можна більшою кількістю взаємопов'язаних практичних дій значно поліпшують його розуміння і засвоєння.

Список використаних джерел та літератури

1. Історія розвитку науки, техніки та освіти. Українська наука як складова світової науки : збірник праць XIII Міжнар. молодіжної наук.-практ. конф. / Л. П. Пономаренко. Київ, 2015. 152 с.
2. Зелений тариф в цифрах. URL: <https://solarsystem.com.ua/top-10-zapytan-pro-dohid-vid-zelenogo-taryfu/>.
3. Експеримент як складова частина процесу пізнання. Вакуум та його характеристики. URL: <https://www.uzhnu.edu.ua/uk/infocentre/get/44406>.
4. Фізика. Вчимося розв'язувати задачі. URL: <http://physics.zfftt.kpi.ua/mod/book/view.php?id=385&chapterid=689>.
5. Нетробчук І. М. Вимірювання метеорологічних величин : наоч. посіб. / І. М. Нетробчук. Луцьк : Вежа-друк, 2015. 128 с.