

УЯВЛЕНЬ ПРО ПРИЛИВИ ТА ВІДЛИВИ

Микола САДОВИЙ

В статті розкриті окремі гравітаційні, енергетичні та екологічні особливості припливів та відливів, які у підручниках для середніх загальноосвітніх навчальних закладів та вищої школи мало висвітлені. Автором якісну картину припливів та відливів доповнено кількісною.

The article revealed specific gravity, energy and environmental features tides and low tides that textbooks for secondary schools and higher education was highlighted. The author of picture quality tides supplemented with quantitative.

Постановка проблеми. Коефіцієнт корисної дії відомих генеруючих установок електричної енергії коливається від декількох відсотків до майже 98 %. Все залежить від принципу дії перетворювачів. Зокрема, сонячні батареї мають ККД 15-20 %, теплові електростанції 30-43 %, гідроелектростанції – 90-93 %, трансформатори близько 100 % [11]. За останні 50 років в різних країнах побудовані експериментальні перетворювачі енергії, які в екологічному відношенні є більш безпечніші за вказані. Серед них ми виділили приливні електростанції (ПЕС). Нині ПЕС побудовані на трьох континентах і вже декілька десятиліть успішно працюють: промислова – Ране на узбережжі Ла-Маншу (Франція, річка Ла Ранс) потужністю 240 МВт, дослідні – Кислогубська у Кольській затоці (Росія) потужністю 400 кВт, Цзянсян потужністю 3,2 МВт (Китай) та Аннаполіс потужністю 20 МВт (Канада).

В липні 2014 р. у Великобританії компанія «Marine Current Technologies» запустила комерційну приливну електростанцію «SeaGen» потужністю 1,2 МВт. Ротор турбіни «SeaGen» має діаметр 16 м. Швидкість її обертання складає 14 обертів на хвилину. Закріплення роторів виконано на горизонтальній балці, яка кріпиться на чотирьохточковій опорі [9].

Аналіз актуальних досліджень. В історії фізики відомий трактат, у якому автор запропонував побудувати вічний двигун: за допомогою міцної жердини Місяць зв'язується із Землею [9]. На Землі кінець жердини слід закріпити на кривошипно-шатунному механізмі та поворотною пружиною. За задумом Місяць за допомогою жердини приводить у рух механізм на Землі, який перетворює енергію з одного виду в інший. Коли нічне світило йшло за Землю, пружина повертала жердину в початкове положення до нового приходу Місяця.

Здавна людям було відомо, що двічі на день здійснюється зміна рівня води у великих водоймах. Грецький географ та купець Пифей [2] у IV ст. до н.е. помітив, що зміна рівня води в океані та морі пов'язана з рухом Місяця та Сонця по небосхилу. Він же описав явище північного сьйва і вічних льодів.

Посидоній [7] вважав, що небесні світила мають напівмагнітне тяжіння на зразок магніту. Він спостерігав приливи і відливи на березі Атлантики в Гадири і пояснював це через зв'язок із фазами Місяця. Його ідея швидко була забута, хоч перші приливні млини були побудовані у I ст. н.е.

I. Ньютон перший помітив таку «жердину» і назвав образно її гравітацією.

Відомий англійський Королівський астроном, геофізик, математик, метеоролог, фізик и демограф Е. Галлей організовував і брав безпосередню участь у навколосемних морських подорожах і у своїх працях добре описав явища приливів, але пояснити їх не міг. Відомі на той час вчені теоретично не могли пояснити причини їх виникнення і радили звернутись до замкнутої і некоммунікабельної людини – I. Ньютона. Е. Галлею вдалось подружитись з вченим.

За його наполяганням I. Ньютон у 1687 році створив наукову теорію приливів на основі явища Всесвітнього тяжіння. Вона була пов'язана з новим у фізиці явищем тяжіння мас. Щодо приливів, то Місяць і Сонце були причиною цього. Було постульовано, що тяжіння слабне з відстанню за функцією $f \sim \frac{1}{r^2}$. Так як Земля має протяжність, то Місяць, Сонце, інші світила намагаються змінити її у розмірах – витягнути. Зокрема, Місяць ближню до нього частину Землі притягує на 6,5 % сильніше ніж дальшу, рис. 1.

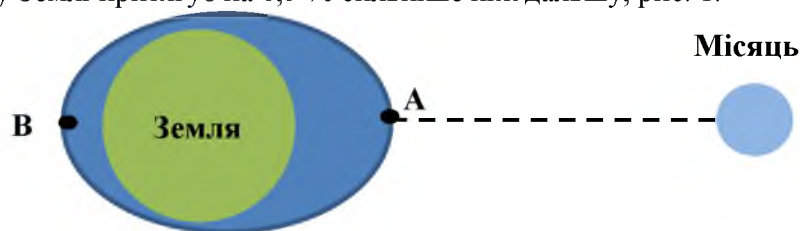


Рис. 1. Взаємодія частинок речовини Землі з Місяцем

Доба Місяця довша сонячної на 50 хвилин. Тому за 24 години 50 хвилин має місце два припливи (повна вода) і два відливи (мала вода). Тобто кожні 6 годин 12,5 хв. відбуваються приливи. Вони досягають найбільшої величини у вузьких затоках. Так у затоці Фанді (Канада) висота хвиль сягає 18 м, а в затоці Сен-Мало у Франції – до 14 м.

Якщо ж Місяць, Сонце і Земля знаходяться на одній прямій, то Сонце своїм тяжінням підсилює дію Місяця. Відбувається сумарний приплив. Коли ж Сонце знаходиться під прямим кутом до відрізка Земля-Місяць (квадратура), то настає слабкий

приплив (мала вода). Період зміни сильного і слабкого припливів – сім днів. Через їх вплив в океані виникає приливний горб. Обертання Землі зумовлює виникнення відцентрової сили. Тоді відповідний водяний виступ з'являється і на протилежній стороні земної кулі. Найслабші, або квадратурні, приливи відбуваються в період першої і третьої чверті Місяця, коли Сонце, Земля і Місяць розташовані так, що утворюють прямий кут і сонячне і місячне гравітаційне тяжіння протидіють один одному.

Висота приливів та відливів кожного дня змінюється в одному й тому місці Землі. Це пояснюється тим, що для однієї й тієї ж місцевості відстань між Землею та Місяцем в момент кульмінації міняється. Звідси випливає висновок, що не є сталою й величина

приливоутворюючої сили
$$F = 2G \frac{MR}{r^3} \sqrt{1 - \frac{3}{4} \cos^2 h}$$
, де G – стала тяжіння, R – радіус Землі, r – відстань від Місяця до Землі, h – висота Місяця над обрієм в момент кульмінації.

У реальних процесах на характер припливів і відпливів впливають ще й особливості руху інших небесних тіл, характер берегової лінії, глибина води, морські течії і вітер тощо. В цілому середня висота приливу становить лише 0,5 м, за винятком тих випадків, коли водяні маси переміщуються у відносно вузьких межах. Тоді висота хвилі може у 10-20 разів перевищувати нормальну висоту припливного підйому.

Постійне обертання Землі є причиною й того, що вона розташована до Місяця іншим боком, як тільки починається деформація.

Таким чином, по поверхні Землі, відстаючи від Місяця, постійно поширюються дві приливні хвилі. У твердому земному середовищі амплітуда коливання складає до 0,5 м. У воді вона досягає одного метра. Коли хвиля поширюється до берега, амплітуда океанської чи морської приливної хвилі збільшується у багато разів. Логічно, що такий ріст є помітним у вузьких місцях узбережжя: заливах, звужуваннях, гирлах річок (створюється висота до 5 м при швидкості поширення 7,5 м/с); навіть змінює напрям течії річок.

В Амазонці приливи поширюються до 1400 км від берега і мають місце навіть тоді, коли розпочався відлив. На Північній Двіні відстань поширення приливів сягає 200 км.

Враховуючи значно більшу відстань між Сонцем й Землею у порівнянні з Місяцем та те, що маса Сонця (1,988·10³⁰ кг) більша за масу Місяця (7,3477·10²² кг) у 2,7·10⁷ разів перепад сили тяжіння на краях Землі в цьому випадку складає 0,02 %.

Мета статті. Показати взаємозв'язок між гравітаційною, енергетичною та екологічною складовими явища приливів та відливів.

Виклад основного матеріалу. На нашу думку, якісну картину припливів та відпливів доцільно доповнити кількісною. Для цього суб'єктам навчання пропонуємо розв'язати задачу, де визначити як впливає на приливи і відпливи Місяць і Сонце окремо й разом.

Із спостережень астрономів відомо, що найбільші приливи будуть тоді, коли Місяць знаходиться найвище над обрієм. На рис. 2 зображені положення Землі ($R_z = 6370$ км) та Місяця ($R_m = 1740$ км). Відстань між їх центрами $R = 384\,400$ км. Місяць

рухається колом радіуса $r_M = R - \frac{3R_3}{4}$, а Земля – по радіусу $r_3 = \frac{3R_3}{4}$. Сили взаємодії обчислюються за формулами $F_3 = G \frac{M_M M_3}{R^2}$; $F_M = G \frac{M_M M_3}{R^2}$.

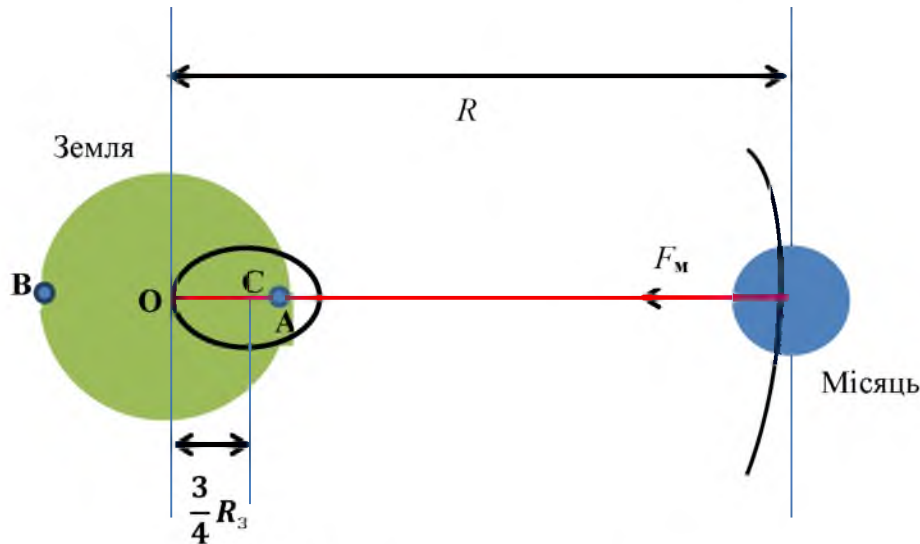


Рис. 2. Сили взаємодії між об'єктами

Внаслідок обертання Земля набуває доцентрового прискорення за рахунок взаємодії з Місяцем $a_{доц} = a_0 = \frac{GM_M}{R^2}$.

$R_3 = 6370$ км, а $F_{сп} \sim \frac{1}{R^2}$. Тоді протилежні частинки A та B на діаметрі Землі за рахунок гравітаційної взаємодії з Місяцем набувають прискорення:

$$\text{в точці A: } a_A = \frac{GM_M}{(R - R_3)^2}, \quad \text{в точці B: } a_B = \frac{GM_M}{(R + R_3)^2}.$$

З одержаних співвідношень $a_A < a_0 < a_B$. Звідси робимо висновок, що під час руху Землі під дією притягання Місяця, частинки плинної води у точці A випереджають тверду оболонку Землі, а часточки води в точці B з протилежного боку – відстають. На поверхні океану на лінії з'єднання центрів Місяця та Землі виникають два горби.

Спостерігач на Землі двічі на добу побачить наступ хвилі зі сходу на захід. Це стосується кожної точки земної кулі в області морів і океанів. Наступ хвилі здійснюється назустріч обертанню Землі. Таку хвилю називають припливною.

Наступний етап полягає в оцінці припливного ефекту спочатку Місяця а потім Сонця.

$$\Delta a_M = a_A - a_0 = \frac{GM_M}{(R - R_3)^2} - \frac{GM_M}{R^2} = \frac{GM_M(2R - R_3)R_3}{R^2(R - R_3)^2};$$

$$\Delta a_c = a_{Bc} - a_{0c} = \frac{GM_c}{(R_{3c} - R_3)^2} - \frac{GM_c}{R_{3c}^2} = \frac{GM_c(2R_{3c} - R_3)R_3}{R_{3c}^2(R_{3c} - R_3)^2}.$$

Так як $R_3 \ll R_{3c}$; $R_3 \ll R$, то припливний ефект для Місяця: $\Delta a_M = \frac{2GM_M R_3}{R^3}$.

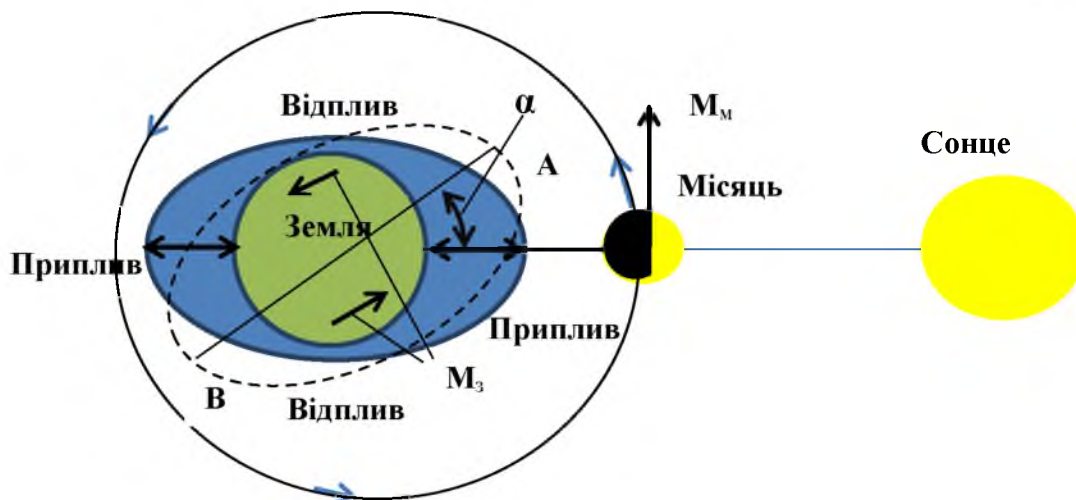


Рис. 3. Припливи та відпливи за участі Сонця та Місяця

Відповідно припливний ефект для Сонця: $\Delta a_M = \frac{2GM_C R_3}{R_{3C}^3}$, Але $R = 60R_3$; $R_{3C} = 25000R_3$, $M_C \approx 27 \cdot 10^6 M_M$.

Їх відношення складає $\frac{\Delta a_M}{\Delta a_C} \approx 2,3$. Припливна дія Місяця у 2,3 рази більша за таку ж дію Сонця.

Для закріплення пропонуємо суб'єктам навчання відповідати на запитання:

1. Як впливає припливна хвиля на швидкість обертання Землі? (гальмує). Який екологічний вплив має місце при цьому?
2. Як припливна хвиля впливає на тривалість доби? (довшає). Що це означає для екологічних змін на Землі та в сонячній системі?
3. Чим викликано, що Місяць повернутий до Землі завжди однією й тією частиною? Як це впливає та екологію Землі?

Місячні та сонячні припливи співпадають в період сигналації молодиків та повних місяців, рис. 3. Тоді хвилі накладаються і досягають набагато більшої висоти. На рис. 3 приведена ідеальна схема, і в ній не враховані втрати на тертя. Якщо врахувати втрати, то горби будуть переміщені у точку А та В.

Коли місячна і сонячна хвилі накладаються і посилюють одна одну, трапляються особливо високі припливи. Їх називають сизигійними, оскільки відбувається це в дні сизигій – молодих і повних місяців. Пряма протилежність їм – припливи, що відбуваються в моменти квадратури (першою і останньою чверть місяця). У такі дні Місяць і Сонце розташовуються по відношенню до Землі під прямим кутом і послабляють припливний вплив один одного. В результаті вода під час сизигійних припливів може підніматися в 2-3 рази вище, ніж під час квадратурних. Висота припливу в деяких місцях дійсно вражає. Наприклад, в Гранвиле (Франція) перепад рівня води досягає 14,7 м, в гирлі річки Северн (Бристольський затока, Англія) доходить до 16,3 метра, а в районі затоки Фанди (атлантичне узбережжя Канади) – майже до 20 м (висота семиповерхового будинку). Але є

і такі місця, де припливи майже не відчуються. У Чорному морі вода піднімається всього на 8 см, а у Фінській затоці амплітуда приливу рідко перевершує 4-5 см. У науковій літературі не досить розкриваються екологічні впливи приливів та відливів. Доцільно наголосити, що різний підйом вод у водоймищах, зміна напрямку руху води, періодичне обміління та заводнення берегів має як біологічний, так і механічний вплив на живі істоти [8].

Приливні хвилі поширюються поверхнею Землі назустріч її обертанню, а тому гальмують це обертання. Втрати обертаючої енергії складають близько 2 ТВт. Така електроенергія нині використовується всім людством. Безумовно, маса Землі досить велика і вплив на період обертання несуттєвий. Він складає 2 мілісекунди на століття. Згідно закону збереження енергії частина її йде на збільшення місячної орбіти. Астрономи розрахували, що вона збільшується на 3 см на рік. Решта енергії витрачається на подолання сил тертя у гірських породах, внутрішнє тертя та у водяних масах $\Delta E_z = \Delta E_M + \Delta E_{тер} + \Delta E_{ен} + \Delta E_e$. Логічно зробити висновок, що через багато років обертання Землі повинно синхронізуватись з Місяцем. Періоди обертання їх зрівняються, а відповідно доба місячна та земна також. Місячні приливи припиняться. Які будуть екологічні зміни, наприклад, у планктоні, зниження солоності води у наукових дослідженнях мало висвітлено.

З енергетичної точки зору приливні гідроелектростанції використовують енергію приливів, тобто фактично кінетичну енергію обертання Землі з урахуванням інших астрономічних тіл. Тому не безпідставною є думка, що робота приливних електростанцій, які гальмують обертання Землі може штучно і суттєво порушити рівновагу у Всесвіті. Які можуть бути наслідки цього мало вивчено.

За іншої точки зору з огляду на колосальну масу Землі, вплив приливних електростанцій малопомітний. Кінетична енергія обертання Землі

$$E_{об} = \frac{I\omega^2}{2} = \frac{L^2}{2I} = 10^{29} \text{ Дж}$$

. Вона настільки велика, що робота приливних станцій потужністю $1000 \cdot 10^9$ Вт буде збільшувати тривалість доби на 9 порядків менше природного гальмування і складатиме $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ с на рік.

За підрахунками вчених зараз у Землі розсіюється приблизно $0,3 \cdot 10^{13}$ Дж приливної енергії за одну секунду, а в мантиї – $0,018 \cdot 10^{13}$. Це складає 94 % від всієї приливної енергії. Оскільки сучасний сумарний тепловий потік через поверхню Землі досягає приблизно $4,3 \cdot 10^{13}$ Дж/с. Тоді маємо, що 0,5 % енергії, що генерується у надрах Землі, складає частку приливної енергії. Напевне на перших етапах розвитку Землі місячні приливи склали висоту до 1500 м.

Ми пропонуємо більш детально розглянути фізичні процеси, пов'язані з приливами. Земля обертається з кутовою швидкістю $\omega_z = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, Місяць обертається навколо Землі з кутовою швидкістю $\omega_m = 2,66 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$. Зрозуміло, що в цьому випадку гравітаційні сили, які породжуються приливним горбом будуть створювати гальмування її обертання, а орбіта Місяця збільшуватись.

Коли обертання буде більш швидким, $\omega < n$ кутове переміщення приливної деформації випереджає рух Місяця орбітою. Тому гравітаційна взаємодія між Місяцем та

приливною деформацією гідросфери прискорює рух Місяця і гальмує обертання Землі. До того часу поки кут α буде додатнім, орбітальна швидкість Місяця зростає, а кутова швидкість обертання Землі зменшується. Така тенденція підтверджена спостереженнями [1]. Момент сил M , який гальмує обертання Землі і прискорює орбітальний рух Місяця позначений на рис. 3. Точки А та В не лежать на одній прямій, яка з'єднує центри Місяця та Землі. Вони розташовані на еліпсі і пояснюються приливним тертям.

О.Г. Сорохтін та С.А. Ушаков [11] розрахували енергію приливної енергії за

відомими формулами
$$E_3 = \frac{I\omega^2}{2}, \quad E_M = -\frac{km_M M_3}{2l}$$
, де $I = 8,3 \cdot 10^{37}$ кг·м² – момент інерції Землі; $M_3 = 5,98 \cdot 10^{24}$ кг – маса Землі; $m_M = 7,35 \cdot 10^{22}$ кг – маса Місяця; $l = 3,844 \cdot 10^8$ м – відстань між центрами Землі та Місяця; $E_3 = 2,12 \cdot 10^{29}$ Дж, $E_M = -0,38 \cdot 10^{29}$ Дж.

Ми пропонуємо зробити оцінки втрати енергії в процесі розвитку Сонячної системи. Енергія приливів на початковій геологічній фазі $4,6 \cdot 10^9$ років тому оцінювалась у $3,28 \cdot 10^{30}$ Дж. Нині відстань між центрами мас Землі та Місяця збільшилась до $3,844 \cdot 10^8$ м, відповідно зросла й орбітальна енергія Місяця до $0,38 \cdot 10^{29}$ Дж. Отже, за час існування системи Земля-Місяць кінетична енергія обертання Землі зменшилась на $3,84 \cdot 10^{30}$ Дж, а кінетична енергія орбітального руху Місяця, навпаки, зросла на $0,76 \cdot 10^{30}$ Дж.

Робимо інший висновок: за цей же час в Землі дисипировало і перетворилося в тепло $3,84 \cdot 10^{30} - 0,76 \cdot 10^{30} = 3,08 \cdot 10^{30}$ Дж приливної енергії.

В цілому джерелами розігріву Землі є три види джерел енергії [6, с. 102-117]. Загальне рівняння теплового балансу на момент часу t має вигляд $E_T(t) = E_{ГД}(t) + E_P(t) + E_{II}(t) - \int Q(t)dt$, де E_T – зміна теплового запасу Землі з часом, $E_{ГД}$ – тепловиділення за рахунок гравітаційної диференціації Землі, E_P – виділення радіогенної енергії, E_{II} – розсіювання приливної енергії, $\int Q(t)dt$ – сумарна теплова енергія.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Таким чином, для знаходження основних закономірностей виділення в Землі приливної енергії треба використовувати залежність відстані між центрами мас Землі й Місяця від часу та скористатися основними рівняннями руху планет. Це дозволяє встановити зв'язок між кутовий швидкістю обертання Землі і цією відстанню. В результаті виявляється, що швидкість виділення приливної енергії в Землі пропорційна різниці кутових швидкостей осьового обертання Землі й Місяця. Необхідно врахувати добротність Землі відстані між планетою і супутником. В цьому зв'язку є доцільність проводити дослідження з екологічних наслідків приливних та відливних процесів.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Авсюк Ю.Н. Приливная эволюция системы Земля – Луна / Ю.Н. Авсюк // Геотектоника. – 1993. – № 1. – С. 13-22.
2. Ельницкий Л.А. Древнейшие океанские плавания / Ельницкий Л.А. – М.: Географгиз, 1962. – 88 с.
3. Манк У. Вращение Земли / У. Манк, Г. Макдональд. – М.: Мир, 1964. – 384 с.

4. Ньютон И. Математические начала натуральной философии / Ньютон И.; пер. и ред. Академика А.Н. Крылова. – М.: Гостехиздат, 1937. – 265 с.
5. Садовий М.І. Нетрадиційна енергетика та навколишнє середовище. / М.І. Садовий, О.М. Трифонова. – Кіровоград: РВВ КДПУ ім. В. Винниченка, 2015. – 52 с.
6. Сорохтин О.Г. Глобальная эволюция Земли / О.Г. Сорохтин, С.А. Ушаков. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. – 446 с.
7. Столяров А.А. Посидоний из Апамен / Столяров А.А. // В кн.: Античная философия: энциклопедический словарь; под ред. М.А. Солоповой. – М.: Прогресс-Традиция, 2008. – С. 607-613.
8. Усачов И.Н. Экономическая оценка приливных электростанций с учетом экологического эффекта / И.Н. Усачов // Труды XXI конгресса СИГБ. – Монреаль, Канада, 16-20 июня 2003. – С. 22.
9. Чумаков В. Прилив сил / В. Чумаков // Вокруг света. – №4 (2871). – апрель 2013. – С. 20-26.
10. Шейндлин А.Е. Проблемы новой энергетики: [монография] / Шейндлин А.Е. – М.: Наука, 2006. – 406 с.
11. Энергетика и электрификация // Научно-производственный журнал. - К.: НИИЭ-УНПО «Энергопрогресс», 1997. – № 1-6.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

Садовий Микола Ілліч – доктор педагогічних наук, професор, проректор з наукової роботи, завідувач кафедри теорії і методики технологічної підготовки, охорони праці та безпеки життєдіяльності, професор кафедри фізики та методики її викладання Кіровоградського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка.

Коло наукових інтересів: проблеми дидактики фізики.