

УДК 371.2:52+53

**ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ
ПІД ЧАС ВИВЧЕННЯ ДИНАМІКИ РІДИН У КУРСІ ФІЗИКИ
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ПРИРОДНИЧИХ ФАКУЛЬТЕТІВ ВНЗ**

Губанова Антоніна Олександрівна
м. Кам'янець-Подільський
Савченко Віталій Федорович
м. Чернівці

Стаття присвячена вивченню розділу гідродинаміки, розглядається ламінарний режим течії рідини. Вивчається залежність тиску текучої рідини від глибини занурення та швидкості течії, наведенні приклади фізичних дослідів та моделей, показаний зв'язок гідродинаміки з гемодинамікою. Наведені приклади моделей фізичних явищ надають емоційного навантаження студентам, показують шляхи застосування фізичних законів у пізнанні навколишнього середовища та функціонування живих організмів.

Ключові слова: ваговий тиск, збереження енергії, статичний та динамічний тиск, потенціальна та кінетична енергії, ньютонівська рідина, робота сили тертя, швидкість, гемодинаміка.

Сучасне виховання конкурентно-спроможного фахівця в галузі природничих наук, зокрема біології та екології, потребує набуття студентами навичок спостереження навколишнього світу і розуміння фізичних законів тих процесів, що відбуваються в природі та техніці. Розвиток системи освіти в Україні відповідає запитам сьогодення, створюючи умови для найбільш ефективного шляху навчання спеціалістів.

Застосування різних форм і методів навчання обумовлене індивідуальними здібностями студентів і вимогами навчальних програм. Відбувається впровадження нових і запозичених форм навчання, коли з'являються гібридні дидактичні утворення, які тим чи іншим чином пристосовуються до нових умов. На загальному фоні революційних перетворень

специфічне місце займає навчальний фізичний експеримент. Відображаючи специфіку фізики як науки, в якій експеримент займає провідне положення, навчальний фізичний експеримент давно став фундаментом навчального процесу з фізики [2, с.121].

У більшості студентів природничих спеціальностей розвинуте образне мислення та зорове сприйняття, тому, метод навчального фізичного експерименту та метод моделювання фізичних явищ, незважаючи на їх значний консерватизм відіграють значну роль у вивченні таких розділів фізики як гідродинаміка та пневматика, що слугують основою для розуміння гемодинаміки живих організмів. База навчального фізичного експерименту поповнюється новими приладами і обладнанням, упроваджуються комп'ютеризовані технології експерименту та опрацювання його результатів. Багато прикладів того, що навіть давно відомі досліди, які в дидактичному плані стали класичними, зазнають глибокого аналізу і модернізації. Дієвим чинником у цьому процесі виступає зміст і структура нових програм, рівень загального розвитку студентів.

Доводиться вносити зміни і уточнення в систему трактування результатів, змінювати дидактичне спрямування дослідів. Людина може тривалий час спостерігати за плином річок, падінням води у водоспадах. Для одержання задоволення люди ще з часів Давньої Греції почали будувати різноманітні фонтани, для забезпечення потреб у воді створювати водогони. Усі ці споруди завжди виконувалися з застосуванням законів збереження енергії. Розглянемо, наприклад, фонтан Змія у Софіївському парку (рис. 1). Посеред Нижнього ставу з широко роззявленої пащі змії, що звивається на камені, б'ється стовп води – фонтан «Змія». Вода надходить до фонтану по самопливному підземному водогону, викладеному з гранітного тесаного каменя вздовж дороги, яка веде від академії та оранжереї до павільйону Флори.

Напроти Грозового гроту (гроту Каліпсо), знаходиться відстійник та відгалуження водоводу, щоб подавати воду в інтер'єр гроту. Відстояна і таким чином очищена вода по чавунних трубах, укладених під невеликим нахилом, самопливом, що зводить до мінімуму втрату сили тиску при терті води об стінки трубопроводу, подається до фонтану. Діаметр фонтанної голівки «Змії» в порівнянні з трубою водопроводу зменшено в 10 разів. Точно розрахована подача води і просте інженерне рішення виверження її з фонтану забезпечує невелику різницю у висоті між стовпком фонтану і рівнем Верхнього ставу – всього лише 1,5-2,5 метри і, таким чином, висота фонтану досягає 12-16 метрів [8].

Прикладом більш складної споруди, з точки зору фізики, може слугувати фонтан Герона, фізична модель якого зображена на рис. 2.

Фонтан Герона складається з відкритої чаші та

двох розташованих під нею герметичних посудів [6, с.104]. З верхньої чаші у нижній посуд іде повністю герметизована труба, з нижньої посудини у верхню проведена герметизована труба по якій повітря може переходити з нижнього посуду у верхній, при цьому створюється у верхньому посуді тиск, рівний тиску у нижньому посуді. З верхнього посуду назовні виведена труба фонтану. Якщо до початку роботи у верхній герметизованій посуді налити води то тиск, який створює повітря, що потрапляє з нижнього со-

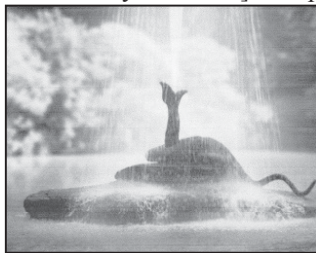


Рис. 1. Фонтан Змія у Софіївському парку

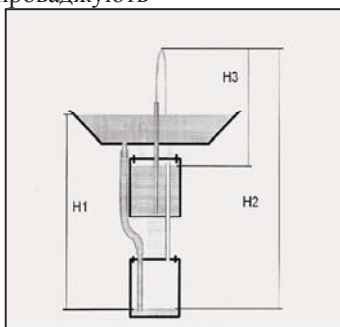


Рис. 2. Фонтан Герона

суда витісняє воду через трубу з верхнього посуду, яка виходить на зовні, тобто встановлюється так, що її верхній кінець знаходиться на рівні, вищому за рівень води у верхній чаші. Підйом води у верхню чашу відбувається за рахунок напору води висотою H_1 , при цьому вода у струї фонтану піднімається на висоту H_2 . Максимальна висота H_3 може бути рівна висоті H_1 (рис. 2).

Наведені приклади з фонтанами зацікавлюють студентів до вивчення фізичних законів пов'язаних з функціонуванням гідродинамічних споруд, завдяки різним способам передачі тиску. Одним з найпростіших прикладів розподілу тисків води в залежності від глибини, що дорівнює стовпчику рідини над розглянутою точкою є відома демонстрація залежності вагового тиску рідини від висоти стовпа. Простий за змістом, дослід передбачає спостереження витікання рідини через отвори в стінках високої посудини, яка стоїть на горизонтальній площині. За твердженням авторів [1, с.242], відстань падіння струменя на площину буде залежати від висоти отвору, з якого витікає рідина (рис. 3). Це дозволяє стверджувати, що ваговий тиск рідини залежить від висоти стовпа рідини над отвором. Нечіткі результати реального демонстраційного дослідів послужили стимулом для проведення теоретичного аналізу цього дослідів.

Рівень дна циліндра позначимо $H = 0$. Відстань падіння крапель відраховуємо по горизонталі. Проведемо наступні розрахунки. На рис. 3 видно, що швидкості витікання води різні і зростають зі збільшенням відстані отвору від рівня рідини. У момент витікання напрямки швидкостей горизонтальні, вони співпадають з напрямками дотичних, проведених до траєкторій в точках витікання. Припустимо, що загальна висота стовпчика рідини складає $H = 1,5$ м і не змінюється з часом. Відстань по горизонталі фіксуємо на рівні $H = 0$.

Кількісний зв'язок між тиском та швидкістю рідини при ламінарному русі в трубах із змінним перерізом отримується з закону збереження енергії. Уявимо кількість рідини масою m , об'ємом V і густиною ρ . Статичний тиск і швидкість перед звуженням труби p_0 та v_0 , а в самому звуженні p і v . При втіканні в звуження швидкість збільшується від v_0 до v . При цьому виконується робота:

$$V(p_0 - p) = \frac{1}{2} m(v^2 - v_0^2) \quad (1)$$

Після ділення обох частин рівняння на V отримаємо:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = p_0 + \frac{1}{2} \rho v_0^2 = const \quad (1^*)$$

Тому, що величина $\frac{1}{2} \rho v^2$ додається до тиску p вона відповідає тискові. Цю величину називають динамічним тиском або швидкісним напором. Отже, сума - також є тиском, який називають повним тиском p_1 .

Рівняння Бернуллі має вигляд [7, с. 208]:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = p_1 \quad (2)$$

де p – статичний тиск; $\frac{1}{2} \rho v^2$ – динамічний тиск; p_1 – повний тиск.

Динамічний тиск рівний різниці між повним тиском і статичним. При використанні закону збереження енергії можна вважати, що статичний тиск викликає зменшення об'єму рідини і, за фізичною суттю, зумовлює силу пружності, а енергія стиснутої рідини є енергією пружної деформації. При витіканні рідини саме ця частина енергії перетворюється на кінетичну енергію рідини.

Опускаючи перше та друге перетворення енергії отримаємо:

$$mgh_i = \frac{m v_i^2}{2} \quad (3)$$

де h_i – глибина i -го отвору, v_i – горизонтальна швидкість витікання води:

$$gh_i = \frac{v_i^2}{2} \Rightarrow v_i = \sqrt{2gh_i} \quad (4)$$

Результати розрахунків швидкості виконуємо для отворів, що знаходяться на відстанях 10 см один від одного.

Час польоту краплин рідини визначаємо за висотою отвору над рівнем, на якому визначаємо горизонтальне зміщення ($H-h_i$). Рух у вертикальному напрямку відбувається за законом вільного падіння, тому для h_i :

$$H - h_i = \frac{gt_i^2}{2} \Rightarrow t_i = \sqrt{\frac{2(H - h_i)}{g}} \quad (5)$$

Відстань Ox_i розраховуємо за формулою:

$$\begin{aligned} Ox_i &= v_i t_i = \sqrt{2gh_i} \sqrt{\frac{2(H - h_i)}{g}} = \sqrt{4h_i(H - h_i)} \\ &= 2\sqrt{h_i(H - h_i)} \end{aligned} \quad (6)$$

Результати проведених розрахунків подано в табл. 1 [3, с. 166].

Таблиця 1

Результати проведених розрахунків

H, м	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
h, м	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4
v, м/с	1,4	2	2,4	2,8	3,13	3,4	3,7	3,96	4,2	4,42	4,64	4,85	5	5,2
t, с	0,5	0,5	0,5	0,5	0,45	0,4	0,4	0,38	0,35	0,32	0,29	0,25	0,2	0,14
Ox, м	0,8	1	1,2	1,3	1,41	1,47	1,5	1,5	1,47	1,41	1,33	1,2	1	0,74

За даними таблиці будемо графік залежності $x(h)$ (рис. 4). З графіка видно, що відстань Ox має

максимум при $h = 0,75$ м., тобто $h = \frac{H}{2}$. Отже,

найбільше горизонтальне зміщення в заданих вище умовах, зазнає струмінь рідини, що витікає з отвору, глибина якого рівна половині загальної висоти стовпчика рідини.

Дослідження залежності $x(h)$ проводимо також з використанням умови рівності нулеві першої похідної:

$$\frac{d(Ox)}{dh} = \frac{1}{2\sqrt{h_3(H - h_3)}} \Rightarrow \frac{d(hH - h^2)}{dh} = H - 2h \quad (7)$$

Функція має максимум при умові:

$$H - 2h = 0 \Rightarrow h = \frac{H}{2}$$

Це значення співпадає з результатом отриманим за графіком.

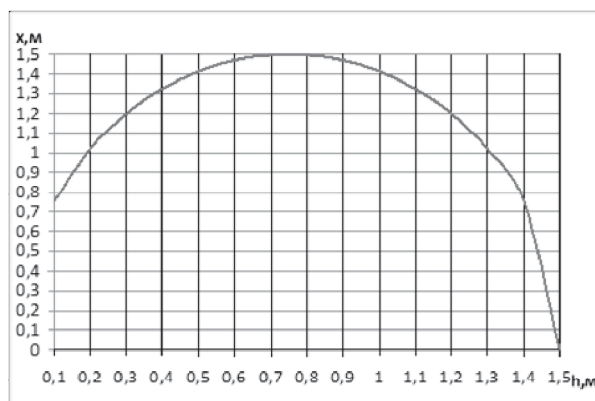


Рис. 4. Залежність дальності польоту струменя води від глибини отвору

Зміна умов спостереження, а саме, загального часу падіння (для цього треба проводити вимірювання горизонтального зміщення на рівні, набагато нижчому від рівня основи циліндра, показаного на рис. 3, приведе до того, що найбільше зміщення x буде у

найнижчого струменя рідини, що витікає з нижнього отвору. Отриманий результат підтверджується модельним експериментом із використанням важких кульок. поданий на рис. 5 [4, с. 22]

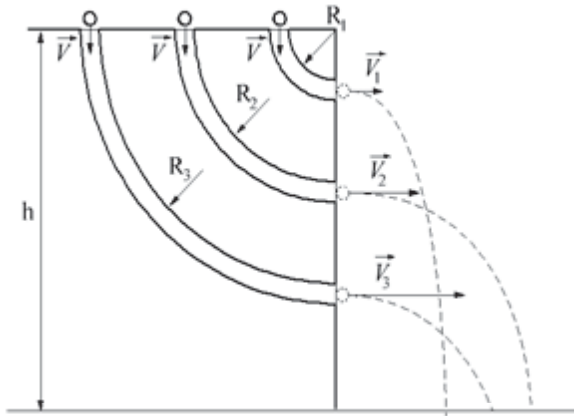


Рис. 5. Траєкторії та швидкості руху важких кульок по жолобах різного

Округлі жолоби мають різні радіуси кривизни і закріплені так, що верхні частини знаходяться на одному (горизонтальному) рівні, а нижні частини виходять через отвори у вертикальній стінці. Якщо кульки опускати на верхній частині жолоба, то вони будуть рухатися, набуваючи швидкості, яка визначається через зміну потенціальної енергії кульок.

Швидкість кульки під час вильоту з жолоба буде мати горизонтальний напрямок. Використовуючи ванночку з піском, розміщену справа від вертикальної стінки, можна вимірювати відстані від основи вертикалі, на якій розташовані точки вильоту кульок, і точками їх падіння в пісок – відстані Ox . Час руху кульок визначиться з умови, що кульки знаходяться у вільному польоті. Розрахунки показу-

ють правомірність моделювання досліду з рідиною, оскільки графіки залежності далькості польоту від висоти вильоту будуть ідентичними.

Форма жолобів дає можливість легко уявити процес зміни напрямку швидкості кульок. Варто зауважити, що використання запропонованої моделі не дасть значення модуля швидкості, тому що в досліді слід врахувати силу тертя, і, відповідно, втрату енергії на її подолання. Зміна потенціальної енергії рівна mgR_{θ} , набута кінетична енергія приймає значення $mv^2/2$. Різниця цих значень дасть енергію, що перейшла в теплову за рахунок тертя між кулькою та жолобом.

У біології рівняння Бернуллі, при виведенні якого використана модель ідеальної рідини (нестисненої та не в'язкої) може бути застосоване при вивченні протікання крові по кров'яних судинах. У фізиці за ньютонівську рідину приймають однорідну рідину, сила тертя між шарами якої описується формулою [5, с. 71]:

$$F = \eta S \frac{dv}{dx} \quad (8)$$

де η – коефіцієнт в'язкості рідини, S – площа

дотику шарів рідини, $\frac{dv}{dx}$ – складова градієнту швидкості,

перпендикулярна до напрямку течії. У ламінарному режимі течії профіль зміни швидкості для ньютонівської рідини наведений на рис. 6-б. На рис. 6-а суцільною кривою показаний профіль зміни швидкості неоднорідної рідини якою є кров.

У прилеглих до стінок судині областях кров більш розріджена (в цьому шарі товщиною приблизно 1 мкм в'язкість найменша. Внаслідок цього кров рухається швидше [5, с.55]. Зазначимо також що стінки кров'яних судин еластичні, а не жорсткі, як у скляної трубки.

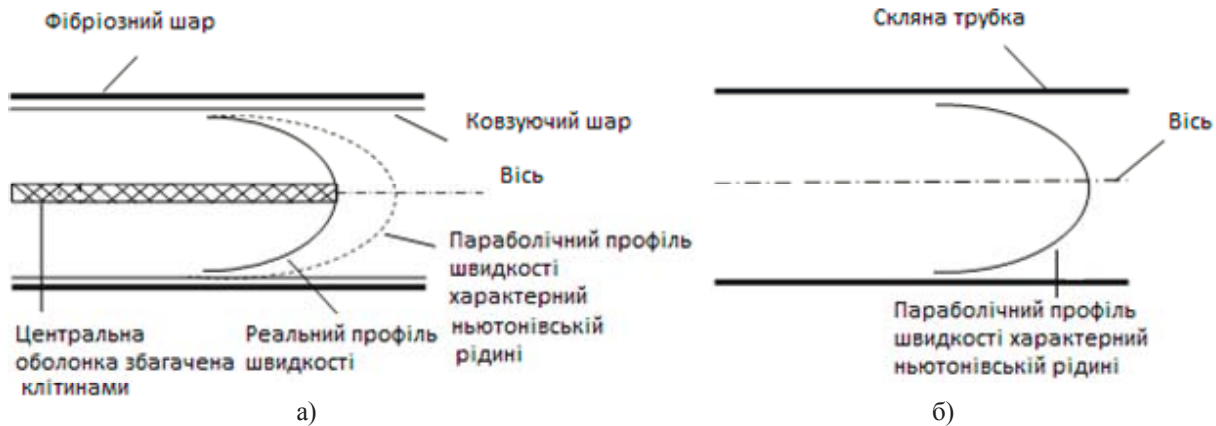


Рис.6. Профілі швидкості характерні для протікання ньютонівської рідини – б), та порівняння профілів швидкості ньютонівської рідини та реальної рідини (для крові) – а)

Розглянемо приклад застосування теореми Бернуллі для вивчення аневризми [5, с.72]. Нехай у артерії діаметром $d_1 = 2,5$ см (переріз A_1), на якій присутнє здуття (аневризма) діаметром $d_2 = 5$ см (переріз A_2), що показане на рис. 7. Умова неперервності потоку (1*) приводить до рівняння:

$$\frac{\pi d_1^2}{4} v_1 = \frac{\pi d_2^2}{4} v_2 \Rightarrow v_2 = v_1 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \quad (9)$$

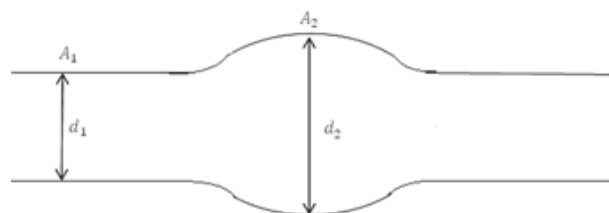


Рис.7 Здуття на артерії (аневризма)

З рівнянь (1*) та (9) знайдемо різницю тисків:

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 \right] \quad (10)$$

Підстановка чисельних значень у (10) дає величину, чисельне значення якої 0,32 мм.рт.ст. [5, с.73]. Зростання аневризми призводить до збільшення додаткового тиску, яке може мати незворотні наслідки.

Другим прикладом застосування рівняння Бернуллі слугує явище тромбозу – часткової закупорки артерій (рис 8). Умова наявності кровотоку пов'язана з величиною тиску p_0 ззовні і запишеться у вигляді:

$$p_1 - p_0 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 \right] > 0 \quad (11)$$

Зміною величиною в рівнянні 10 є діаметр d_2 . Коли діаметр d_2 стає менший критичної величини, артерія сплющується під дією зовнішнього тиску. Тиск p_1 зростає, внаслідок роботи серця, кров починає протікати нерівномірно, і за допомогою стетоскопа прослуховується перервний шум, який свідчить про порушення циркуляції крові.

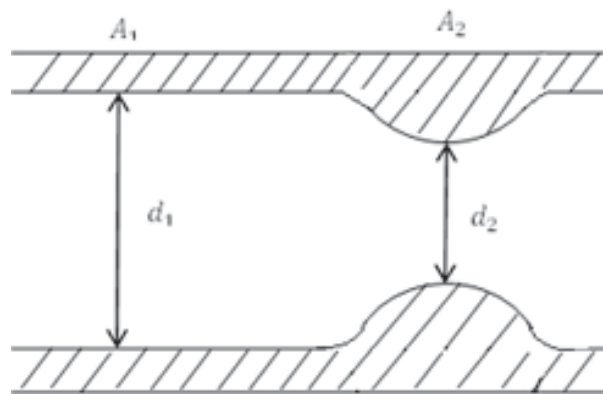


Рис.8 Атероматозна бляшка (тромбоз)

Висновок. Наведені приклади моделей фізичних явищ надають емоційного навантаження студентам, показують шляхи застосування фізичних законів у пізнанні навколишнього середовища та функціонування живих організмів.

Подальші розвідки полягатиме в пошуку нових методичних шляхів пояснення біофізичних явищ за допомогою законів фізики.

Література та джерела

- Архангельский М.М. Курс физики. Механика: Учеб. пособие для студ. физ.-мат.фак. пед. ин-тов / М.М. Архангельский. – [Изд. 3-е, перераб.]. – М.: Просвещение, 1975. – 423 с.
- Атаманчук П.С. Інноваційні технології управління навчанням фізики / П.С. Атаманчук. – Кам'янець-Подільський, 1999. – 174 с.
- Губанова А.О. Розширення інформативності при використанні малюнків у підручниках з фізики / А.О. Губанова, В.Ф. Савченко // Вісник Чернігівського національного педагогічного університету. Вип.109. – Чернігів, 2013. – С. 165-167.
- Губанова А.О. Модельний підхід у середній школі при трактуванні фізичних процесів / А.О. Губанова, В.Ф. Савченко // Сучасна освіта у гуманістичній парадигмі: Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції м. Керч, 12-15 вересня 2013р. – наук. ред. Т.М. Попова. – Керч: РВВ КДМУ, 2013. – С.21-25.
- Давид Р. Введение в биофизику / Р.Давид; Пер. с франц. Г.Г.Маленкова; под. ред. М.Д. Франка-Каменецкого. – М.: Мир, 1982. – 208 с.
- Перельман Я.И. Занимательная физика. Книга 2 / Я.И. Перельман. – М.: Наука, 1982. – 272 с.
- Поль Р.В. Механика, акустика и учение о теплоте / Р.В. Поль. – М.: Наука, 1971. – 480 с.
- Софіївка парк. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://sofiyivka.org.ua/index.html>. – Загол. з екрану. – Мова укр.

Стаття посвячена изучению раздела гидродинамики, рассматривается ламинарный режим течения жидкости. Изучается зависимость давления текучей жидкости от глубины погружения и скорости течения, приведены примеры физических опытов и моделей, показана связь гидродинамики с гемодинамикой. Приведенные примеры моделей физических явлений оказывают эмоциональной нагрузки студентам, показывают пути применения физических законов в познании окружающей среды и функционирования живых организмов

Ключевые слова. весовое давление, сохранение энергии, статическое и динамическое давление, потенциальная и кинетическая энергия, ньютоновская жидкость, работа силы трения, скорость, гемодинамика.

The article is devoted to consideration of section hydrodynamics. The laminar fluid flow regime is considered. The dependence of the pressure liquid fluid from the depth and flow velocity is studied. The examples of physical experiments and models are hovered. The relationship of hydrodynamics with a hemodynamic is shown. Examples of models of physical phenomena provides students with emotional stress, suggest ways to apply physical laws in the knowledge of the environment and the functioning of living organisms.

Key words: the weight pressure, energy conservation, static and dynamic pressure, potential and kinetic energy, the work of the friction force, velocity, hemodynamic.