

ДО ОБМЕЖЕНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАКОНІВ В'ЯЗКОСТІ

Анотація: З метою наглядної ілюстрації законів гідродинаміки, зокрема закону Стокса розглянуто можливість його застосування в деяких нових модельних ситуаціях, пов'язаних з підвищеними швидкостями руху тіл. Одержані результати вказують на обмеженість проявів законів в'язкості, зокрема закону Стокса, в практичних чи дослідницьких задачах. При їх застосуванні обов'язково необхідно перевірити критерії ламінарності потоку.

Ключові слова: в'язкість рідин та газів, закон Стокса, ламінарність та турбулентність потоку.

Summary: In order to illustrate the laws of hydrodynamics, in particular, the Stokes law, we consider the possibility of its application in some new model situations due to the increased speeds of motion of bodies. The results indicate that viscosity laws, such as Stokes law, are limited in practical or research tasks. When applying them, it is essential to check the laminar flow criteria.

Key words: viscosity of liquids and gases, Stokes law, laminarity and flow turbulence.

До провідних розділів курсу біофізики, який вивчається на факультетах ветеринарної медицини, зокрема Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ), відноситься розділ «Гемодинаміка», в якому аналізуються **закономірності руху крові** в серцево-судинній системі (в перекладі з грецької “*haima*” означає “кров”). В структурі розділу спершу розглядаються **фізичні закони** руху ідеальних та реальних потоків рідини, що відносяться, власне, до механіки рідин та газів – гідродинаміки, а потім дані

закони застосовуються для опису руху крові в процесі її циркуляції від серця, по артеріям, артеріолам, капілярам, венулам, венам – і знову до серця, за малим та великим колами кругообігу. Студенти завжди намагаються у загальних класичних законах побачити відображення більш простої, але конкретної істини. Наприклад, після вивчення закону Пуазейля і зв'язаного з ним поняття **гідравлічного опору**, що визначально мало чітко виражений технічний зміст, студенти біологічних напрямків навчання бажали спеціальної конкретизації, надання йому біофізичної форми. Так була поставлена і розв'язана задача визначення **гідравлічного опору кровоносної судинної системи** людини [1, с. 319-321].

З **явищем в'язкості**, яке формує бар'єрні енергетичні затрати на постійну циркуляцію крові в судинній системі (роботу серця), тісно зв'язане поняття **коефіцієнта в'язкості**. Вказана базова характеристика реального потоку стандартно визначається за методами Пуазейля або Стокса. В основі **методу Стокса** [2, с. 23-24] визначення коефіцієнта в'язкості або, як його називають, методу падаючої кульки, лежить вимірювання швидкості рівномірного руху (падіння) сферичного тіла у в'язкому середовищі. Метод Стокса ґрунтується на законі Стокса та допоміжних законах – законі тяжіння та законі Архімеда .

За мету ставилось завдання популяризувати **закон Стокса**, надавши йому **яскравої** сучасної форми. Була поставлена **задача**, використовуючи закон Стокса, визначити **швидкість** падіння парашутиста перед відкриттям купола парашута поблизу земної поверхні. Оцінка даної швидкості проводилась в наближенні форми тіла до сферичної.

Згідно закону Стокса, сила опору руху сферичного тіла у в'язкому середовищі (сила Стокса) пропорційна його швидкості v , коефіцієнту в'язкості η середовища та радіусу тіла R : $F_C = 6\pi\eta Rv$. При рівномірному падінні тіла дана сила в сумі з силою Архімеда F_A врівноважується силою тяжіння тіла: $P = F_A + F_C$. Оскільки сили тяжіння та сила Архімеда легко визначаються за масою тіла m та через його об'єм і густину середовища ρ_c : $P = mg$;

$F_A = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_c g$, то з рівняння $mg = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_c g + 6\pi\eta Rv$ отримаємо формулу для

швидкості падіння тіла:

$$v = \frac{1}{6\pi} \cdot \frac{mg}{\eta R} - \frac{2}{9} \cdot \frac{g\rho R^2}{\eta}.$$

Розрахунок даної швидкості при наступних значеннях параметрів: маса тіла – 76 кг, прискорення вільного падіння - 9,81 м/с², середній “радіус” парашутиста – 0,6...0,9 м, густина повітря у нижніх шарах атмосфери за нормальних умов – 1,29 кг/м³, коефіцієнт в’язкості повітря при нормальних умовах – 17,1 мкПа·с, дає наступний результат - $v \approx 2,1 \cdot 10^6$ м/с.

Одержаний результат значно відрізняється від реальної швидкості падіння парашутистів перед розкриттям парашута, яка складає ≈ 50 м/с. Це означає, що по-перше, сила опору при високих швидкостях руху **залежить не лінійно** від швидкості, а за більш складним, наприклад ступеневим або експоненціальним законом, по-друге, на перший план виходять аеродинамічні сили опору, що залежать від площі поперечного розміру та **форми** тіл, тобто, крім сил в’язкості, які описують ламінарний рух в потоці, виникають сили **турбулентного** характеру, границя переходу до яких може бути оцінена за числом Рейнольдса - $Re = \frac{\rho v R}{\eta}$, яке перевищує при реальних параметрах падіння кілька мільйонів.

Так, розрахунок швидкості падіння пробних кульок (дробинок) діаметром 3 мм у **воді**, дає швидкість 33,4 м/с, що значно вище **критичної** швидкості, яка для даних параметрів потоку не перевищує 1 м/с. Таким чином, турбулентність і супутні з нею сили аеродинамічного опору проявляють себе при незначних швидкостях навіть у воді, в’язкість якої перевищує в’язкість повітря на кілька порядків.

Одержані результати вказують на **обмеженість проявів** законів в’язкості, зокрема закону Стокса, в практичних чи дослідницьких задачах. При їх застосуванні обов’язково необхідно перевірити **критерії ламінарності** потоку.

ДЖЕРЕЛА ТА ЛІТЕРАТУРА

1. Цоцко В.І. Визначення гідравлічного опору серцево-судинної системи людини. / Віталій Цоцко, Аліна Камишова // Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції “Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації”: Зб. наук. праць. - Переяслав-Хмельницький, 2019. Вип. 45.– 555 с.

2. Белановский А.С. Основы биофизики в ветеринарии: учебное пособие для вузов / А.С. Белановский.- М.: Дрофа, 2007. - 332 с.

*

TO THE LIMITS OF THE APPLICATION OF VISCOSITY LAWS

Тематичний напрямок роботи конференції (Суми)*

- (Фазовий контраст, біофізика та медицина) **(4)**

- **Питання теорії та методики навчання фізики та нанотехнологій (6)**