

Дарія Біда

fig. XV

ВЕЛИКИЙ – СЛАБКИЙ,

ЕНЕРГІЯ ЖИТТЯ

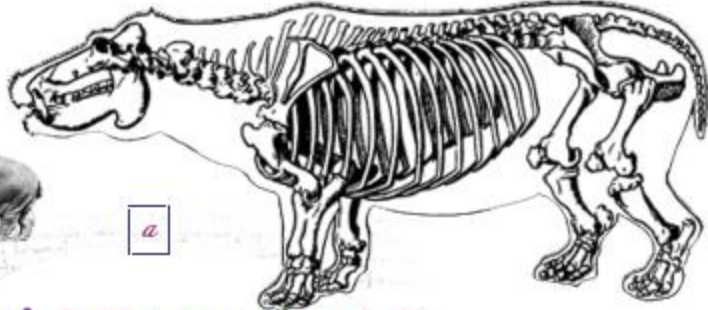


Мал. 1. Лемінг і бегемот

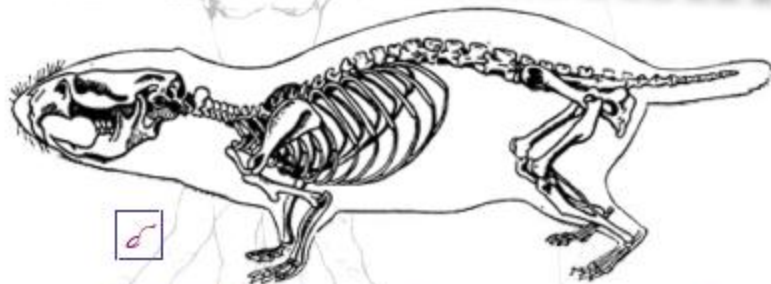
Великий і малий

Погляньте на бегемота і дрібного гризуна лемінга (мал. 1). Що у них спільного? По-перше, вони ссавці, а по друге, мають досить схожі зовнішні обриси. Це добре видно на мал. 2, бо для наочності скелети тварин приведені до однакового розміру. Скелет є опорою для тіла тварини, його механічним каркасом. Саме він визначає загальну форму тіла, його розміри і спосіб пересування. У кажанів скелет пристосований до польоту, у китів – до плавання, у собаки – до пересування на суходолі.

А тепер спробуємо знайти відмінності у скелетах лемінга і бегемота. На малюнку добре видно, що скелет бегемота є огрядним порівняно з легким, „ажурним” скелетом лемінга. Але є ще одна, не помітна на малюнку особливість: зі збільшенням лінійних розмірів тварин співвідношення між масою її тіла і силою м’язів змінюється у невигідну для неї сторону. Зрозуміти таку, на перший погляд дивну, закономірність нам допоможуть закони фізики.



МАЛЕНЬКИЙ – СИЛЬНИЙ?



Мал. 2. Скелети і контури тіла бегемота (а) і леонінга (б)

Одиниці і еталони

У навколишньому світі безліч живих істот різних розмірів. Найдрібніші клітини мають розміри приблизно 10^{-6} м, а найбільші рослини – гігантські секвої – сягають 100 м у висоту. Отож, розміри живих істот відрізняються у 10^8 , або у 100 мільйонів разів. Вражаюча різниця! Не дивно, що природа урізноманітнила не лише розміри, але й життя організмів на планеті: хтось живе на суходолі, хтось – у водоймах, хтось – під землею, а хтось парить в небесах. З'ясувати, у чому полягає зв'язок способу життя живих організмів з їхніми розмірами нам допоможуть *фізичні величини: довжина, маса, сила, імпульс, енергія та інші*. Вони мають не лише числове значення, але й розмірність: немає сенсу стверджувати, що якась довжина дорівнює 25; погодьтеся, дуже суттєво, чи це 25 м, чи 25 км.





Нагадаємо, що є етало-
ни фізичних величин. Якщо
ми говоримо, що довжина ди-
тячого майданчика 9 кроків, а
ширина – 12 , то ми можемо лише
оцінити площу майданчика. Але якщо ми

знаємо, що ці розміри становлять 6 м і 8 м відповідно, то площу
можна визначити точно.

Одиниці всіх механічних величин можна виразити через три
основні – одиниці довжини, маси і часу. Одиницям таких величин
як, наприклад, сила та енергія для зручності дають спеціальні назви
(*ньютон* або *джоуль*), але їх можна виразити через комбінацію
одиниць довжини, часу і маси. Ці три одиниці – *метр, секунда, кіло-
грам* – все, що нам необхідно, бо будь-яка механічна величина може
бути виражена через них.

Наближення і оцінки

Фізика – наука точна. Але давайте без фанатизму! Фізики – люди
розумні, тож за деяких обставин користуються наближенням або
грубою оцінкою, моделюючи явище. Наприклад, якщо йдеться про
рух Землі навколо Сонця, без потреби брати до уваги особливості
її рельєфу або внутрішню будову. Ми отримуємо досить точний
результат, вважаючи Землю матеріальною точкою. Але якщо ми ви-
вчаємо землетруси або вулкани, без розуміння внутрішньої будови
і рельєфу планети нам не обійтися.



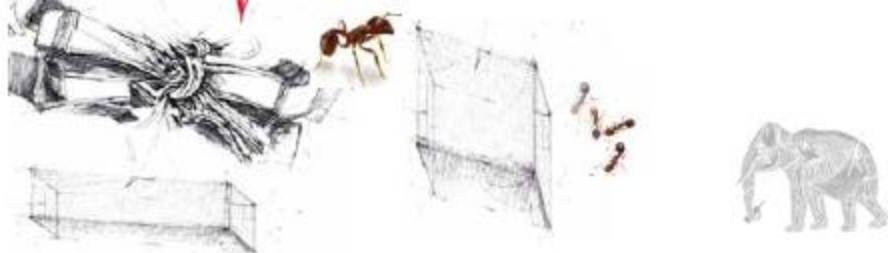


Ти можеш розвивати вміння робити оцінки. Інколи дуже прості роздуми дають можливість оцінити щось таке, з чим ти раніше не мав справи. Нумо, спробуй! Скільки машин у полоні вуличного корку завдовжки 2 км на трьох смугах автостради? Скільки тенісних м'ячів може поміститися у твоїй кімнаті? Відповіді ти знайдеш в кінці статті.

Шкалювання і розміри предметів

Характеристики і функції організму відповідають його розмірам. Кролик, збільшений до розмірів слона, не міг би існувати. І людина, зменшена до розмірів мишки, теж не вижила б у цьому світі. Щоб зрозуміти, чому біологічні властивості організму відчутно залежать від його геометричної форми, площі поверхні і об'єму, нам треба ввести поняття шкалювання.





Знайти співвідношення між характеристиками тіл правильної форми досить просто. Наприклад, для куба, ребро якого дорівнює L , площа поверхні $\sim L^2$, а об'єм $\sim L^3$.

$$\text{Площа поверхні} \sim L^2, \text{ об'єм} \sim L^3$$

А якщо маса розподілена рівномірно (тобто густина тіла однакова), то і маса тіла також пропорційна кубу характеристичної довжини.

Шкалювати предмет означає ввести для нього характеристичну довжину, співмірну з його розмірами. Тоді площа і об'єм змінюються так, як ми встановили вище. Якщо характеристичну довжину подвоїти, то площа поверхні збільшиться у 4 рази, а об'єм збільшиться у 8 разів. Деякі біологічні властивості організмів залежать від відношення площі поверхні до об'єму. Це відношення визначається характеристичною довжиною.

$$\frac{\text{Площа поверхні}}{\text{об'єм}} \sim L^2 / L^3 = 1/L$$

З кубом все зрозуміло. Але яка характеристична довжина мурахи, собаки, людини? Оскільки нас цікавлять середні, а не точні значення порівняльних характеристик і функцій різних організмів, то характеристичну довжину будемо





вибирати з міркувань здорового глузду. Так, значенням L для людини буде її ріст (приблизно 2 м), для собаки $L \approx 1\text{ м}$, а для мурахи $L \approx 0,5\text{ см}$.

Розглянемо деякі біологічні властивості організмів залежно від їхньої характеристичної довжини.





Сила

Чи насправді великі тварини сильніші, ніж малі? І як можна порівняти мускульну силу різних тварин? Доросла людина масою 80 кг може підняти предмет, маса якого дорівнює її власній масі. Слони різних видів піднімають різну масу, але максимальна зафіксована маса, піднята слоном, – 9 т . Саме стільки підняв слон масою 5 т . Горила може підняти масу у 10 разів більшу за свою. А маса у неї немаленька: самець зростом $1,75 \text{ м}$ має масу 200 кг . Хто з людей може підняти 2 тонни? До речі, живуть горили досить довго, приблизно 50 років. А ще вони мають власні відбитки пальців, як і люди. Дуже сильна тварина – тигр. Він може підняти зубами масу, вдвічі більшу за свою (маса дорослого самця сягає 270 кг). А як щодо маленьких тварин? Нас очікує сюрприз! Коник масою 1 г задньою лапою піднімає предмет, маса якого у 15 разів більша, ніж його власна. То коник сильніший, ніж людина, тигр і навіть слон?! Таке твердження викликає посмішку. Однак світовий рекорд, встановлений на олімпіаді у 2004 році іранцем *Hossein Reza Zadeh*, становить у ривку 209 кг , а у поштовху $263,5 \text{ кг}$. Тому треба визнати, що коник – ще той силач, і у світі людей, мабуть, не знайдеться бажаючих повторити його рекорд.

Щоб порівняння сили людини і коника було коректним, треба брати до уваги характеристики джерела сили – м'язів. Усі м'язи складаються з волокон. Ці волокна майже однакові і „упаковані” з однаковою густиною у м'язах різних організмів. Для оцінки можна вважати, що сила м'язів прямо пропорційна кількості волокон, які припадають на одиницю площі поперечного перерізу м'язу. Площа перерізу м'язів організму (у певному наближенні) прямо пропорційна характеристичному поперечному перерізу, а отже, квадрату характеристичної довжини:

$$\text{Сила} \sim L^2$$





Щоб коректно порівнювати силу двох різних організмів, введемо поняття сили, що припадає на одиницю маси, – питому силу:

$$\text{Питома сила} = \frac{\text{сила}}{\text{маса}} \sim \frac{L^2}{L^3} = \frac{1}{L}$$

Ми скористалися тим фактом, що маса пропорційна об'єму, а, отже, кубу характеристичної довжини. Порівняємо питому силу людини і коника.

$$\frac{\text{Питома сила коника}}{\text{Питома сила людини}} = \frac{1}{L_{\text{коника}}} / \frac{1}{L_{\text{людини}}} = \frac{L_{\text{людини}}}{L_{\text{коника}}} = \frac{200 \text{ см}}{2 \text{ см}} = 100$$

Отже, завдяки малим розмірам коник має питому силу у 100 разів більше, ніж людина. Але ми вже з'ясували, що людина може підняти тіло, маса якого дорівнює масі людини, а коник може підняти тіло масою у 15 разів більшою, ніж його власна. Тому реальна сила коника менша, ніж можна було б сподіватися, посилаючись на його розміри. Людина досконаліша і використовує можливості своїх м'язів ефективніше, ніж коник.

Зі збільшенням лінійних розмірів питома сила тварин зменшується. Якщо лінійні розміри тварини збільшилися у 2 рази, то його маса збільшилася у $2^3=8$ разів, а сила м'язів (величина якої залежить від площі поперечного перерізу м'язів) зростає лише у $2^2=4$ рази; якщо розміри тіла тварини збільшуються у 10 разів, його маса збільшується у 1000 разів, а сила лише у 100 разів тощо. Тому у крупних тварин співвідношення між силою м'язів і масою тіла є менш вигідним, ніж у маленьких. Тому великі тварини мають товстіші м'язи.



Але товстіші і масивніші м'язи потребують відповідних кісток скелету, до яких вони кріпляться, з ширшою поверхнею у вигляді різних гребенів і виростів на



кістках кінцівок, на лопатках, на потиличній частині черепа, характерних для крупних ссавців. Сильніше виступають у великих тварин і остисті відростки на хребті, а весь кістяк є масивніший. Потовщення кісток і поява на них гребенів і виростів збільшує масу тіла і ускладнює пересування тварини, не дивлячись на те, що мускулатура у неї добре розвинена.

Тепер ми можемо пояснити ще один факт, який бачимо на *мал. 2*. Кістки лемінга збільшилися непропорційно – у бегемота вони значно товщі. Лінійні розміри бегемота у 25 разів більші, ніж лемінга (довжина бегемота 5 м, а лемінга 20 см). Маса бегемота в $25^3 - 15\ 625$ разів більша, ніж маса лемінга. Якби скелет теж збільшувався пропорційно, то площа перерізу кісток на лапах бегемота збільшилась би у $25^2 - 625$ разів більше, ніж у лемінга. Але тоді кістки бегемота зазнали б тиску у 25 разів більшого, ніж кістки лемінга. Природно припустити, що кістки лемінга і бегемота мають однакову міцність (матеріал кістки приблизно однаковий). Звідси відразу висновок: площа перерізу кісток бегемота не в 25^2 , а в 25^3 більша. А отже, при „переході від лемінга до бегемота” довжина кожної кістки збільшується у 25 разів, а товщина у $\sqrt{25^3} - 125$ разів. Співвідношення між довжиною кістки та її діаметром не зберігається, окремі кістки і весь скелет у цілому стають значно масивнішими, що добре видно на *мал. 2*. Саме тому є верхня межа в історичному розвитку наземних ссавців.

Свіфтові помилки

На нашій планеті фізично неможливе існування героїв з повісті „*Мандрі Пулівера*” – ліліпутів і велетнів, які зберігають пропорції нашого реального земного світу. Тож Свіфт погрішив проти фізики ☺. Його велетні у 12 разів більші, ніж звичайні люди. За законами фізики людиноподібна істота заввишки 20 м мала б такий масивний скелет, що, скоріш за все, вона зламалася б під власною вагою. Носити на собі таку ношу – не до снаги людям з нашими пропорціями скелету. З цього приводу ще до появи роману Свіфта висловився Галілео Галілей: „Той,

хто хотів би зберегти у велетня пропорції звичайного людського тіла, мав би знайти для кісток якийсь інший, міцніший матеріал, або примиритися з тим, що тіло велетня було б не таким міцним, як у людини звичайних розмірів. Внаслідок збільшення розмірів тіло було б розчавлене власною вагою”. Галілей робить





Галілей

правильний висновок: „Досягнути надзвичайно великих розмірів тварини можуть лише за умови, що їхні кістки суттєво потовщають, і такі тварини будуть дуже огрядними”.

Це справді так: найбільші тварини суходолу товсті і неповороткі. У боротьбі за існування така тварина має деякі переваги. Вона може здолати дрібних тварин, налякати своїм грізним виглядом. Однак великі розміри тіла мають принципові незручності. Про це ми поговоримо у наступній статті.

Далі буде.

Оцінювання. Якщо машини середніх розмірів 6 м стоять впритул, то їхня кількість $N = (3 \times 2 \text{ км}) \times (1000 \text{ м/км}) : (6 \text{ м/машину}) = 1000 \text{ машин}$.

Якщо розмір кімнати $3 \times 3 \times 2,8 \text{ м}$, а діаметр м'ячика 25 мм , то їхня кількість приблизно дорівнює: $25,2 \text{ м}^3 : 7,8 \times 10^{-6} \text{ м}^3 = 3,2 \times 10^6$.

