

Хурсенко Світлана Миколаївна

кандидат фізико-математичних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет
ORCID 0000-0001-6307-2042
email: svitlana.khursenko@snaau.edu.ua

У статті проведений аналіз рівняння руху тіла в неінерціальній системі відліку. Розглянуто інерціальні сили, які не зустрічаються в інерціальних системах відліку, їх прояв у повсякденному житті і використання в технічних механізмах. Показана суттєва роль, як негативна, так і позитивна, сил інерції в сучасній техніці, що характеризується великими швидкостями і прискореннями.

Ключові слова: інерціальні системи відліку, неінерціальні системи відліку, сили інерції, принцип еквівалентності Ейнштейна, принцип Даламбера.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2020.3.7>

Постановка проблеми. У сучасній техніці, яка характеризується великими швидкостями і прискореннями, неабияку роль відіграють сили інерції. Зазвичай, при русі з постійною швидкістю ми не помічаємо сил інерції, оскільки їх просто немає, а проявляють вони себе лише у тих випадках, коли відбувається рух із прискоренням. Існує багато прикладів, які можуть бути інтерпретовані як прояв сил інерції. Коли потяг набирає швидкість, пасажири у вагоні відчувають дію сили, спрямованої проти його руху. Це і є сила інерції. Сили інерції викликають перевантаження, що діють на пілота при великих прискореннях літака. Якщо у вагоні, який рухається з прискоренням, висить кулька маси m , то сила інерції відхиляє її в сторону, протилежну прискоренню і т.д.

Аналіз публікацій по темі дослідження. Навколо поняття сил інерції часто виникають розбіжності, суперечки, різні трактування. Тема даного дослідження є актуальною і на сьогоднішній день в силу того, що ряд авторів визнають силу інерції, як реально існуючу [1-3], у той час як з іншого боку, не рідко доводиться зустріти твердження, що сили інерції не існують в дійсності, лише є штучне фіктивне поняття, яке вводиться заради формальної можливості і зручності запису рівнянь руху тіл в неінерціальних системах відліку [4-6]. Таким чином, виникає безліч питань. Фіктивні чи ні сили інерції? Якщо вони фіктивні, то наскільки правомірно говорити про дію сил інерції на тіла або їх прояв тощо.

Мета даної роботи полягає в більш детальному розгляді поняття сил інерції, їх фізичної інтерпретації і проявів у побуті та техніці.

Виклад основного змісту дослідження. У точних науках сила інерції зазвичай являє собою поняття, яке використовується в цілях зручності при розгляді руху матеріальних тіл в неінерціальній системі відліку (НІСВ) [7]. Наприклад, рух рухомих деталей автомобіля зручно описувати в системі координат, пов'язаних з автомобілем (у разі прискорення автомобіля ця система стає неінерціальною); рух тіла по коловій траєкторії іноді зручно описувати в системі координат, пов'язаних з цим тілом (така система координат неінерціальна через доцентрове прискорення) і т.д.

У НІСВ закони Ньютона не виконуються. Так, при прискоренні автомобіля, у пов'язаних з корпусом автомобіля системі координат незакріплені предмети всередині отримують прискорення за відсутності будь-якої прикладеної до них сили; а

при русі тіла по орбіті, у пов'язаних з тілом неінерціальній системі координат тіло зберігає спокій, хоча на нього діє нічим не збалансована сила гравітації, яка виступала в якості доцентрової в тій інерціальній системі координат, в якій спостерігалось обертання по орбіті. Для відновлення можливості застосування в цих випадках звичних формулювань законів Ньютона і пов'язаних з ними рівнянь руху, для кожного розглянутого тіла виявляється зручно ввести силу інерції, пропорційну масі цього тіла і величині прискорення системи координат, і протилежно спрямовану вектору цього прискорення.

Введення сил інерції дає можливість описувати рух тіл у будь-яких (як інерціальних, так і неінерціальних) системах відліку за допомогою одних і тих самих рівнянь руху. Повне виведення рівняння руху тіла маси m в неінерціальній системі відліку наведено, наприклад, у фундаментальній роботі [8], де воно отримане виходячи з принципу найменшої дії. Більш доступне виведення наведено у відомому курсі загальної фізики [3], у результаті якого рівняння руху тіла має вигляд:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{\partial U}{\partial \vec{r}} - m\vec{a} + m[\vec{r}\vec{\omega}] + 2m[\vec{v}\vec{\omega}] + m[\vec{\omega}[\vec{r}\vec{\omega}]]. \quad (1)$$

У правій частині рівняння (1) представлені: «звичайна сила», виражена у вигляді градієнта потенційної енергії тіла, і чотири інерціальні сили, які не зустрічаються в інерціальних системах відліку (ІСВ):

- сила інерції ($-m\vec{a}$) виникає завдяки прискоренню \vec{a} поступального руху розглянутої системи відліку відносно ІСВ;
- сила $m[\vec{r}\vec{\omega}]$ обумовлена несталістю в часі кутової швидкості обертання $\vec{\omega}$;
- сила Коріоліса, що дорівнює $2m[\vec{v}\vec{\omega}]$, на відміну від інших інерціальних сил залежить від швидкості тіла;
- відцентрова сила $m[\vec{\omega}[\vec{r}\vec{\omega}]]$ лежить в площині, що проходить через радіус-вектор тіла \vec{r} і вектор кутової швидкості $\vec{\omega}$, і спрямована перпендикулярно до осі обертання (тобто до напрямку $\vec{\omega}$) в сторону від осі.

Сила інерції. Розглянемо візок з укріпленням на ньому кронштейном, до якого підвішена на нитці кулька (рис. 1).

Поки візок не рухається або рухається без прискорення, нитка розташована вертикально і сила тяжіння \vec{P} врівноважується реакцією нитки \vec{F}_p . Якщо тепер привести візок у поступальний рух з прискоренням \vec{a} , нитка відхилиться від вертикалі на такий кут, щоб результуюча сил \vec{P} і \vec{F}_p надавала кульці прискорення, рівне \vec{a} . Відносно системи відліку, пов'язаної з візком, кулька знаходиться в стані спокою, не дивлячись на те, що результуюча сил \vec{P} і \vec{F}_p відмінна від нуля. Відсутність прискорення кульки відносно цієї системи відліку можна формально пояснити тим, що крім сил \vec{P} і \vec{F}_p , рівних в сумі $m\vec{a}$, на кульку діє також сила інерції $\vec{F}_{in} = -m\vec{a}$. Сила інерції при поступальному русі НІСВ має такі властивості: пропорційна прискоренню; пропорційна масі тіла; спрямована проти вектора прискорення. Таким чином, закон динаміки в НІСВ можна сформулювати наступним чином: в неінерціальних системах відліку добуток маси тіла на його прискорення дорівнює векторній сумі всіх реальних сил, що діють на тіло, і сили інерції.

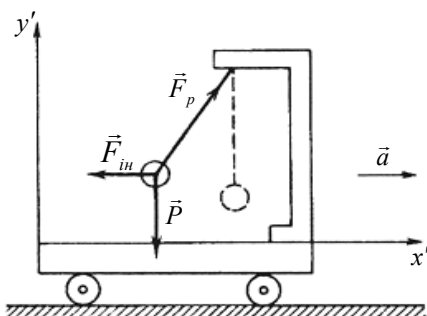


Рис. 1. Інерціальні та неінерціальні системи відліку [3]

Сили інерції в НІСВ, що рухаються прямолінійно, виявляються певною мірою аналогічними до сил тяжіння, оскільки обидві сили пропорційні масі тіл, а значення і напрям цих сил

не залежить від точки простору НІСВ, що рухаються поступально. Таким чином, поле сили інерції еквівалентне однорідному полю сили тяжіння. Це твердження є *принципом еквівалентності Ейнштейна*, що лежить в основі загальної теорії відносності Ейнштейна [3].

Таким чином, відповідаючи на питання про реальність сил інерції, можна прийти до висновку щодо їх фіктивності, оскільки сили інерції: 1) не характеризують якусь реальну взаємодію; 2) не підкоряються третьому закону Ньютона (для них немає протидіючих сил); 3) сили інерції завжди є зовнішніми (в середині системи немає тіла, яке виступало би матеріальним джерелом сил інерції). З іншого боку вони є реальними, оскільки викликають прискорення і можна передбачити результат фізичного дії цих сил, наприклад, переміщення тіл, зміну траєкторій їх руху (падіння вантажу з полиці при гальмуванні) тощо.

Сила, обумовлена зміною частоти обертання НІСВ, є дуже незначною, оскільки частота обертання Землі майже не змінюється. Як показано в роботі [9], збільшення земної доби приблизно на 1 с (внаслідок глобального танення льодів Арктики і Антарктики та підвищення рівня світового Океану протягом доби), призведе до того, що тіло масою 1 кг буде відчувати додаткову силу інерції, яка дорівнює 5 мН. Якщо ж подібне танення льодовиків відбудеться протягом року, то сила буде в 365 разів менше, тобто мізерно мала.

Сила Коріоліса. Прояв сили Коріоліса можна виявити на прикладі руху кульки по горизонтально розташованому абсолютно гладкому диску, який може обертатися навколо вертикальної осі. Якщо диск не обертається, то запущена зі швидкістю \vec{v} в напрямку від центру диска кулька скочуватиметься уздовж радіальної прямої OA (рис. 2а). Якщо ж диск привести в обертання в напрямку, наприклад, проти годинникової стрілки, то кулька котитиметься по штриховий лінії OB , причому її швидкість \vec{v} відносно диска буде змінювати свій напрям. Отже, відносно системи відліку, що обертається, кулька поводить себе так, якби на неї діяла сила \vec{F}_K , перпендикулярна швидкості \vec{v} . Сила \vec{F}_K і є коріолісова сила інерції.

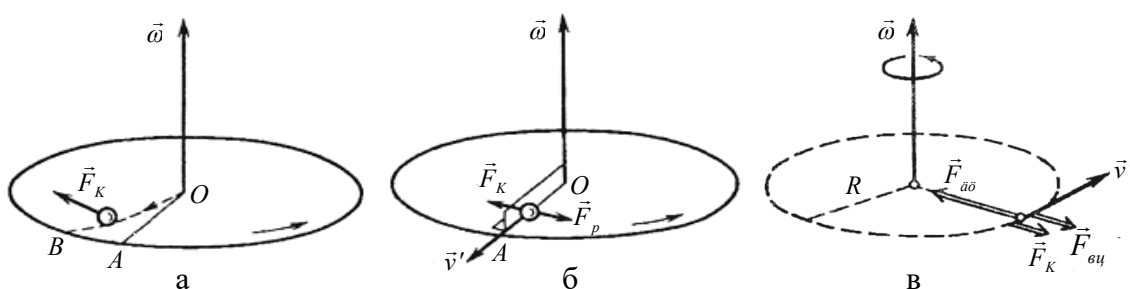


Рис. 2. Виникнення сили Коріоліса і визначення напрямку її дії [3]

Щоб змусити кульку котитися уздовж радіальної прямої по диску, що обертається, можна зробити направляючу, наприклад, уздовж ребра OA (рис. 2б). При коченні кульки направляюче ребро діє на нього з деякою силою \vec{F}_p . Відносно диска кулька буде рухатися з постійною за напрямом швидкістю \vec{v}' . Це можна формально пояснити тим, що сила \vec{F}_r врівноважується прикладеною до кульки коріолісовою силою

інерції \vec{F}_K , перпендикулярною до швидкості кульки в системі диска. В окремому випадку, коли кулька рухається відносно диска, що обертається, рівномірно по колу, яке лежить в площині, перпендикулярній до осі обертання, з центром, що знаходиться на цій осі, напрям сили Коріоліса представлено на рис. 2в.

Дією сили Коріоліса пояснюється ряд ефектів, що спостерігаються на поверхні Землі, наприклад, поворот площини коливань маятника Фуко відносно Землі, відхилення на схід від

лінії виска вільно падаючих тіл, розмиття правого берега річок в північній півкулі і лівого в південній, неоднаковий знос рейок при двоколійному русі тощо.

Відцентрова сила інерції. Для наочного уявлення цієї сили, яку зазвичай позначають як $\vec{F}_{\text{вц}}$, розглянемо диск, що обертається навколо перпендикулярної до нього вертикальної осі z' з кутовою швидкістю $\vec{\omega}$ (рис. 3).

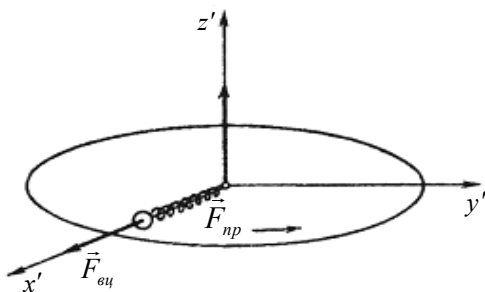


Рис. 3. Пояснення відцентрової сили інерції [3]

Разом з диском обертається надіта на спицю кулька, з'єднана з центром диска за допомогою пружини. Кулька займає на спиці таке положення, при якому сила натягу пружини $\vec{F}_{\text{нр}}$ виявляється рівною добутку маси кульки на її нормальне прискорення $\vec{a}_n = -\omega^2 \vec{R}$ (тут \vec{R} – радіус-вектор, проведений до кульки з центру диска, R – відстань кульки від центру диска):

$$\vec{F}_{\text{нр}} = -m\omega^2 \vec{R}. \quad (2)$$

Відносно системи відліку, пов'язаної з диском, кулька знаходиться в стані спокою. Це можна формально пояснити тим, що крім сили $\vec{F}_{\text{нр}}$ на кульку діє відцентрова сила інерції:

$$\vec{F}_{\text{вц}} = m\omega^2 \vec{R}, \quad (3)$$

яка спрямована уздовж радіуса від центру диска. Ця сила діє на тіло в системі відліку, що обертається, незалежно від того, покоїться тіло в цій системі або рухається відносно неї.

Якщо тіло знаходиться в стані спокою відносно системи відліку, що рівномірно обертається, то сума всіх реальних сил і відцентрової сили інерції дорівнює нулю. Це твердження називають *принципом Даламбера*.

Відцентрова сила інерції не характеризує якоїсь реальної взаємодії, а обумовлена обертальним рухом системи відліку. Відцентрова сила інерції і сила тяжіння еквівалентні в обмеженій області простору, оскільки в загальному випадку відцентрова сила інерції зростає зі збільшенням відстані, а гравітаційна – спадає.

Дії відцентрової сили піддається, наприклад, пасажир під час руху автобуса на поворотах. Якщо у відцентровій машині підвісити на нитках кілька кульок і привести машину до швидкого обертання, то відцентрові сили інерції відхилить кульки

від осі обертання. Кут відхилення тим більший, чим далі кулька знаходиться від осі. Відцентрові сили використовуються у відцентрових сушарках для віджимання білизни, у сепараторах для відділення вершків від молока, у відцентрових насосах, відцентрових регуляторах тощо. Ці сили обов'язково треба враховувати при проектуванні деталей механізмів, які швидко обертаються [10, 11].

Сили інерції в машинах можуть відігравати як негативну, так і позитивну роль. Наприклад, при початку руху потягу з місця і при його прискореному русі під дією сил інерції створюються динамічні навантаження на зчепленні вагонів. Такі ж навантаження зазнають стрічки конвеєрів, приводні ланцюги, канати та інші елементи механічних пристроїв. Сили інерції діють також на транспортні машини при русі по закругленій ділянці шляху. Будучи спрямовані від центру кривизни шляху, вони створюють перекидаючий момент. Щоб нейтралізувати дію відцентрової сили, зовнішній рейок на закругленій ділянці укладають з перевищенням над внутрішнім і відповідно перевищення встановлюють максимально допустиму швидкість проїзду на цій ділянці.

Вплив відцентрових сил враховують також при виборі допустимих швидкостей частин машин, які швидко обертаються (турбін, робочих коліс насосів і т.д.). За умовами міцності максимальна швидкість обмежується певною величиною, перевищення якої пов'язане з небезпекою розриву матеріалу під дією відцентрових сил.

Корисна дія сил інерції, особливо відцентрових, використовується в роботі багатьох машин. На такому принципі працюють відцентрові вентилятори, насоси, турбокомпресори, регулятори, сепаратори та інші механізми. Відцентрові сили дозволяють поліпшити якість виготовлення деяких видів продукції і спростити багато технологічних процесів. Як приклади можна назвати широко поширений спосіб відцентрового лиття, процеси виготовлення залізобетонних труб, арматури та інших виробів.

Висновки. Слід чітко розуміти, що сили інерції не можна ставити в один ряд з такими силами, як пружні, гравітаційні сили і сили тертя, тобто силами, зумовленими впливом на тіло з боку інших тіл. Сили інерції обумовлені властивостями тієї системи відліку, в якій розглядаються механічні явища. У цьому сенсі їх можна назвати фіктивними силами. Введення до розгляду сил інерції не є принципово необхідним, оскільки в принципі будь-який рух можна завжди розглянути по відношенню до інерціальної системи відліку. Однак на практиці часто являє інтерес саме рух тіл відносно неінерціальної системи відліку, наприклад, відносно земної поверхні. Використання сил інерції дає можливість вирішити відповідну задачу безпосередньо по відношенню до такої системи відліку, що часто виявляється значно простіше, ніж розгляд руху в інерціальній системі.

Насамкінець необхідно зауважити, що прояв сил інерції на Землі відіграє дуже важливу роль, як в побудові фізичної картини світу, так і в житті самих людей. Навіть із проведеного короткого аналізу стає ясно зрозуміло, що сили інерції не варто залишати без уваги, їх необхідно враховувати в різних сферах діяльності.

Список літератури:

1. Бутиков Е.Н. Кондратьев А.С. Физика: Кн.1. Механика. – М.: Физматлит, 2008. – 352 с.

2. Емельянов А.В. Новый взгляд на физическую природу динамических процессов во Вселенной. – М.: Дом Надежды, 2011. – 332 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: Кн.1. Механика. – М.: Астрель, 2002. – 336 с.
4. Ишлинский А.Ю. Классическая механика и силы инерции. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
5. Закинян Р.Г. О силах инерции / Р.Г. Закинян // Естественные науки. – 2006. – №3. – С. 89-96.
6. Блумфилд Л. Как все работает. Законы физики в нашей жизни. – М.: АСТ Corpus, 2016. – 704 с.
7. Вакуленко М., Вакуленко О. Фізичний тлумачний словник. – К.: Київський університет, 2008. – 767 с.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Том 1. Механика. – М.: Физматлит, 2004. – 223 с.
9. Сафиуллин Р.К. Движение и силы в неинерциальных системах отсчета. Влияние силы Кориолиса на климат Земли / Р.К. Сафиуллин // Известия КГАСУ. 2014. – №1. – С. 253-260.
10. Котов В. Физика внутри автобуса / В. Котов // Kvant. – 2006. – №1. – С. 27-28.
11. Балдаев Р., Раджендран В., Паланичами П. Мир физики и техники. – М.: Техносфера, 2006. – 579 с.

Khursenko S.M., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Physics in technology: forces of inertia and their manifestation

The forces of inertia play a very important role in modern technology, which is characterized by high speeds and accelerations. Usually, when moving at a constant speed, we do not notice the forces of inertia, since they are absent, but they manifest themselves in those cases when there is movement with acceleration. The introduction of inertial forces makes it possible to describe the motion of bodies in any (both inertial and non-inertial) frames of reference using the same equations of motion, in which, in addition to the "ordinary force", inertial forces are also presented that do not occur in inertial frames. Inertial forces include: the force of inertia, which arises due to the acceleration of the translational motion of the considered frame of reference relative to inertial frames of reference; the force of inertia due to the variability of the angular velocity of rotation in time; Coriolis force and centrifugal inertia force. It should be noted that the forces of inertia cannot be placed on a par with such forces as elastic, gravitational and frictional forces, i.e. forces due to the impact on the body from other bodies. The forces of inertia are determined by the properties of the frame of reference in which mechanical phenomena are considered. In this sense, they can be called fictitious forces. The manifestation of inertial forces on Earth plays a crucial role, both in the construction of the physical picture of the world, and in the life of the inhabitants of our planet themselves. From the work done, it becomes clear that the forces of inertia should not be ignored, they must be taken into account in various fields of activity. The beneficial action of inertial forces, especially centrifugal forces, is used in the operation of many machines. Centrifugal fans, pumps, turbochargers, regulators, separators and other mechanisms work on this principle. Centrifugal forces improve the manufacturing quality of certain types of products and simplify many technological processes. Examples include the widespread method of centrifugal casting, processes for the manufacture of reinforced concrete pipes, fittings and other products.

Keywords: *inertial reference frames, non-inertial reference frames, inertial forces, Einstein's equivalence principle, d'Alembert principle.*

Дата надходження до редакції: 17.11.2020