

П. Г. ПОНОМАРЕНКО

Stepico, Львів, Україна

ГЕЙМІФІКАЦІЯ ПРИ ВИВЧЕННІ НЕБЕСНОЇ МЕХАНІКИ ЗА ДОПОМОГОЮ KERBAL SPACE PROGRAM

Стрімкий розвиток технологій та впровадження їх в освітній процес надають можливість застосувати гейміфікацію – використання ігрових механік та елементів для поглибленого вивчення складної технічної дисципліни. Такі комп'ютерні ігри як Kerbal Space Program (KSP) вже створили середовище, де студенти можуть досягати та практично застосувати теорію космічної механіки з відчуттям виклику та винагороди. Використання гейміфікації в процесі навчання має ряд переваг: покращення успішності, розвиток взаємодії між студентами та підвищення зацікавленості у технічних науках. **Предметом** вивчення в статті є можливості та процеси гри KSP. **Об'єктом** дослідження є процес і засіб гейміфікації при вивченні небесної механіки. **Метою** роботи є дослідження можливостей, обмежень та перспектив використання Kerbal Space Program у гейміфікації вивченні основних концепцій небесної механіки. Реалізація зазначеної мети дослідження передбачає розв'язання таких **завдань**: аналіз здатності KSP реалізувати певні небесні механіки; дослідження перспективи KSP у викладанні основних понять небесної механіки через ігрові механіки; дослідження відповідностей ігрової фізичної моделі реальним фізичним процесам; визначення обмежень та перспектив використання гейміфікації через KSP в освітніх цілях. При дослідженні використовувався **метод** системного аналізу комп'ютерних засобів гейміфікації. У процесі дослідження було отримано такі **результати**: під час комплексного аналізу KSP було встановлено, що гра відповідає основним законам небесної механіки й здатна досить точно моделювати орбітальний рух, маневри, гравітаційні явища тощо; було окреслено основні обмеження та перспективи використання KSP в освітньому процесі. **Висновки**: дослідження демонструють, що KSP реалізує основні принципи небесної механіки й надає інструментарій для практичного засвоєння студентами складних понять. Робота показує значний потенціал гри, яка дозволяє значно розширити навчальні можливості у вивченні небесної механіки, а інтерактивний формат гри дозволяє доступно й наочно навчати студентів складних фізичних явищ та концепцій.

Keywords: гейміфікація; небесна механіка; Kerbal Space Program; орбітальні маневри; космічна інженерія; інтерактивне навчання.

1. Вступ

1.1. Мотивація дослідження

Освіта завжди шукає нові способи донесення складних технічних дисциплін в більш цікавій та доступній для студентів формі. Космічна механіка через свою складність та контрінтуїтивність часто є для молоді викликом. Ця фундаментальна наука точно описує рух космічних тіл та штучних супутників великою кількістю формул, але для інтуїтивного розуміння студентами суті цього руху варто звертатися не тільки до теоретичного викладу, але й до більш сучасних методів.

Еволюція цифрових технологій надає можливість гнучко впровадити гейміфікацію – використання ігрових механік та елементів для поглибленого вивчення складної технічної дисципліни. Такі комп'ютерні ігри як Kerbal Space

Program (KSP) [1] вже створили середовище, де студенти можуть досягати та практично застосувати теорію космічної механіки з відчуттям виклику та винагороди.

Сучасне покоління формувалося маючи необмежений доступ до цифрових девайсів. Як наслідок, студенти краще сприймають інформацію, що подана у вигляді інтерактивних моделей та середовищ, тому є потреба в модернізації методів викладання складних технічних дисциплін і гейміфікація дозволить створити захопливе навчальне середовище, де теоретичні знання тісно взаємодіють із практичними експериментами.

В англійській мові ідіома "Its rocket science" [2] використовується на позначення чогось надзвичайно складного через незвичність поведінки об'єктів та її невідповідність тому, що люди спостерігають на Землі, тому використання комп'ютерних симуляцій надає візуалізоване та доступне пояснення цієї контрінтуїтивної поведінки.



Найголовніше, знайомство з глибокими та розвиненими ігровими інструментами дозволить студентам самонавчатися, експериментувати і підвищують мотивацію та зацікавленість у вивченні космічної механіки.

1.2. Огляд літератури

Останнім часом зріс інтерес до дослідження гейміфікації в освіті. Стаття “Gamification in Education: A Systematic Mapping Study” (D. Dicheva, G. Agre) [3] досліджує опубліковані статті щодо застосування гейміфікації в освіті і зазначає, що досі недостатньо знань про ефективність впровадження ігрових елементів. Автори наголошують, що необхідне проведення більш ґрунтовних досліджень у конкретних освітніх контекстах та на різних типах студентів.

“Gamification in engineering education – An empirical assessment on learning and game performance” (J. Díaz-Ramírez) [4] повідомляє про позитивний вплив гейміфікації на академічну успішність та соціальну взаємодію серед студентів інженерних спеціальностей. У дослідженні запропоновано комплексний підхід, що поєднує три типи активностей: майстерність (пов'язану з основними темами курсу), інституційну (пов'язану з університетським життям) та командну роботу.

У дослідженнях “Gamification in space law: A strategy to navigate the growing landscape” (A. Hurova, M. Becker) [5] та “Gamification in the Space Sector: How Gamification Activities Can Foster the Passion and Interest for STEM Related Studies (A. Galeone) [6] розкривається ефективне використання гейміфікації у STEM-освіті та вивченні космічної механіки. А також представлений аналіз використання таких інструментів, як KSP, MinecraftEdu та інших. У статті згадано співпрацю розробників KSP з такими впливовими космічними агентствами як NASA, European Space Agency (ESA).

Гейміфікація є також предметом для наукових розробок, що підтверджується існуванням патенту WO 2015/148491 [7], який описує системи та методи гейміфікації з освітніми цілями.

Провідні космічні агентства, такі як NASA та ESA, використовують гейміфікацію для збільшення інтересу до технічних деталей космічної програми [8, 9].

1.3. Мета, завдання та структура

Мета роботи: дослідити можливості, обмеження та перспективи використання Kerbal Space Program у гейміфікації вивченні основних концепцій небесної механіки.

Завдання дослідження:

- 1) проаналізувати здатність KSP реалізувати певні небесні механіки;
- 2) розкрити перспективи KSP у викладанні основних понять небесної механіки через ігрові механіки;
- 3) дослідити відповідність ігрової фізичної моделі реальним фізичним процесам;
- 4) визначити обмеження та перспективи використання гейміфікації через KSP в освітніх цілях.

Структура роботи побудована наступним чином: у розділі 2 проаналізована імплементація основних небесних механік в KSP. Розділ 3 розкриває відмінності KSP від реальності. Розділ 4 описує перспективи розвитку гейміфікації на базі KSP.

Кожен розділ супроводжується практичними прикладами з гри та математичними розрахунками, що дозволяє порівняти теоретичні передбачення з результатами симуляції.

2. Аналіз механік

2.1. Кеплерові елементи

Необхідно розглянути поняття орбіти та її основні характеристики, щоб зрозуміти основи небесної механіки. Орбіта — це траєкторія, якою рухається космічний об'єкт під дією гравітації центрального тіла. Основними параметрами, що визначають орбіту, є її форма, розмір і орієнтація у просторі.

У класичній небесній механіці [10] для опису орбіти використовуються шість кеплерових елементів (рис. 1):

- 1) **велика піввісь** (Semi-Major Axis) — середня відстань між об'єктом і центром планети.
- 2) **ексцентриситет** (Eccentricity) — показує, наскільки орбіта відрізняється від кола.
- 3) **нахил** (Inclination) — кут між площиною орбіти та площиною екватора центрального тіла.
- 4) **довгота висхідного вузла** (Lan) — визначає, де орбіта перетинає екваторіальну площину.
- 5) **аргумент перицентру** (Arg Pe) — описує орієнтацію орбіти відносно висхідного вузла.
- 6) **середня аномалія** (MNA) — положення об'єкта на орбіті у певний момент часу.

2.2. Перевірка кругової орбіти

На орбітальному дисплеї (рис. 2) відображається візуальна інформація про поточну орбіту апарата навколо планети Kerbin, а саме перигей (Periapsis) та апогей (Apoapsis). Це кругова орбіта з

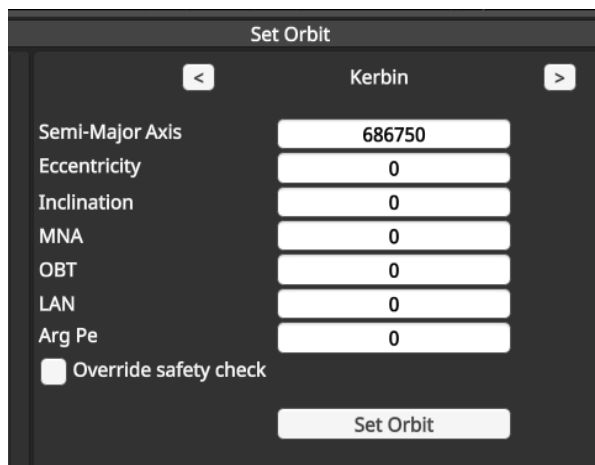


Рис. 1. Вікно “Set Orbit”, задає орбіту космічному апарату за допомогою кеплерових елементів

висотою над рівнем моря 300 км. Отримавши з таблиці значення радіусу планети та її маси, можна розрахувати велику піввісь орбіти a , та обчислити гравітаційний параметр центрального тіла μ , де G – гравітаційна стала 2014 року [11], а M – маса планети з таблиці [12]

$$\mu = GM.$$

На основі цих даних можна розрахувати період обертання T за формулою періоду орбітального руху,

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{a^3}{\mu}},$$

а також визначити орбітальну швидкість V для кругової орбіти та порівняти зі значенням з гри:

$$v = \sqrt{\frac{\mu}{a}}.$$

```

1 var height = 300000; // Висота над рівнем моря
2 var radius = 600000; // Радіус планети
3 var mass = 5.2915158e22; // Маса планети
4 var G = 6.6740831e-11; // Гравітаційна стала
5 var a = height + radius; // Радіус орбіти
6 var m = mass * G; // Грав. параметр планети
7
8 var T = 2 * Math.PI * Math.sqrt(a * a * a / m);
9 var V = Math.sqrt(m / a);
10
11 console.log( `Період: ${T.toFixed(2)} секунд` );
12 console.log( `Швидкість: ${V.toFixed(2)} м/с` );

```

Рис. 3. Код на JavaScript для розрахунку періоду та швидкості кругової орбіти

Період: 2854.68 секунд
Швидкість: 1980.91 м/с



Рис. 2. Кругова орбіта

Розраховані (рис. 3) значення можна порівняти зі значеннями в грі (рис. 4), і зробити висновок, що обидва показники збігаються з розрахунками.

У цій роботі використовується модифікація Kerbal Engineer Redux (KER) [13], що надає додаткову інформацію, включно з усіма параметрами орбіти та апарата.

2.3. Перевірка еліптичної орбіти

Для підрахунків обрано еліптичну орбіту з великою піввісю = 960000 м. та ексцентриситетом = 0.125, що дає висоту апогею 480 км та висоту перигею 240 км над рівнем моря (рис. 5).



Рис. 4. Скриншот KER для кругової орбіти

За допомогою закону Vis-Viva Equation [14] вираховується швидкість апарату в апогеї та перигеї еліптичної орбіти (де r – відстань до центру планети):

$$v = \sqrt{\mu \cdot \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}.$$

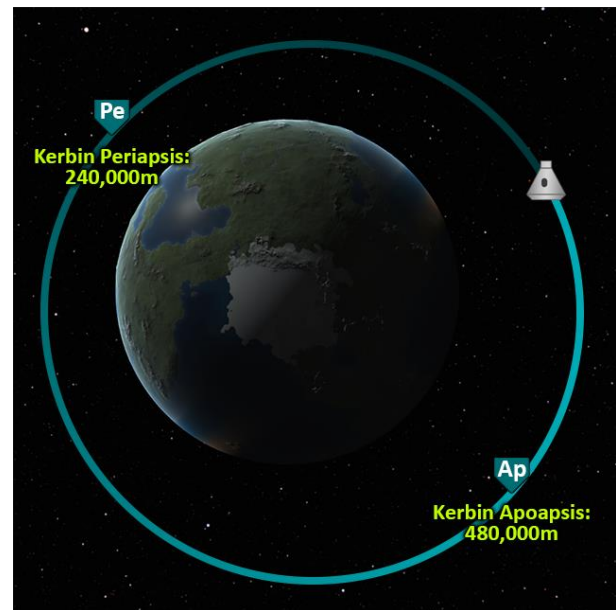


Рис. 5. Еліптична орбіта в грі

Розраховані (рис. 6) значення швидкості в збігаються з наданими грою (рис. 7).

```

1  var apogee = 480000;           // Апогей над рівнем моря
2  var perigee = 240000;          // Перигей над рівнем моря
3  var meanAltitude = (apogee + perigee) / 2;
4
5  var radius = 600000;           // Радіус планети
6  var mass = 5.2915158e22;       // Маса планети
7  var G = 6.6740831e-11;        // Гравітаційна стала
8
9  var a = radius + meanAltitude; // Велика піввісь орбіти
10 var m = mass * G;              // Грав. параметр планети
11
12 function speed (height) {
13     var r = height + radius;
14     var v = Math.sqrt(m * (2 / r - 1 / a));
15     return v.toFixed(2);
16 }
17
18 console.log( `V в апогеї : ${speed(apogee)} м/с` );
19 console.log( `V в перигеї: ${speed(perigee)} м/с` );

```

Рис. 6. Код на JavaScript для розрахунку швидкості в апогеї та перигеї еліптичної орбіти

V в апогеї : 1691.52 м/с
V в перигеї: 2174.82 м/с

FLIGHT ENGINEER 1.1.9.0	
ORBT	SURF
HEAT	BODY
VESL	BURN
RDZV	LAND
ORBITAL	
EDIT FLOAT	
Apoapsis Height	480,000.0m
Time to Apoapsis	41m 10s
Periapsis Height	240,000.0m
Time to Periapsis	14m 58s
Semi-major Axis	960,000.000m
Eccentricity	0.12500
Inclination	0.00000°
Longitude of AN	0.00000°
Arg. Of Periapsis	0.00000°
True Anomaly	-116.14734°
Orbital Period	52m 24.857s
Speed at Apoapsis	1,691.52m/s
Speed at Periapsis	2,174.82m/s

Рис. 7. Скриншот KER для еліптичної орбіти

2.4. Орієнтація апарату в KSP

В космосі не працює інтуїтивне “верх-низ”. Натомість використовуються орбітальні орієнтації: координатна вісь відносно напрямку руху апарату, яка складається з трьох осей або шести напрямків (рис. 8):



Рис. 8. Орієнтації апарату на орбіті

Prograde (прямий рух) – напрямок, що співпадає з вектором орбітальної швидкості об’єкта.

Retrograde (зворотний рух) – напрямок, що протилежний до вектора орбітальної швидкості об’єкта (рис. 9)

Radial In (радіально всередину) – направлено в центр планети.

Radial Out (радіально назовні) – направлено від центру планети (рис. 10)

Normal (нормальний напрямок) – вгору з площини орбіти (перпендикулярно їй).

Anti-Normal (антинормальний напрямок) – вниз з площини орбіти (рис. 11)

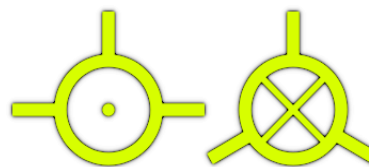


Рис. 9. Іконки Prograde та Retrograde



Рис. 10. Іконки Radial In та Radial Out

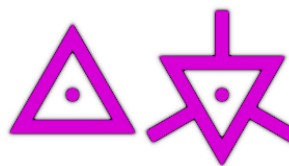


Рис. 11. Іконки Normal та Anti-Normal

Для визначення нормального напрямку використовується правило правої руки:

1. Витягнути праву руку.
2. Направити пальці у бік руху корабля.
3. Зігнути пальці так, щоб вони "оберталися" в напрямку руху орбіти.
4. Великий палець, що направлений вгору, – це напрямок Normal.
5. Протилежний до нього – це Anti-Normal.

2.5. Робота з імпульсом в KSP

Переміщення в космосі відбувається не так, як на Землі, а через зміни орбіти. Для нього використовуються короточасні включення двигунів, які називаються імпульсами. В KSP за допомогою вузлів маневру можна планувати та візуалізувати, як конкретний імпульс змінить орбіту апарата.

Імпульс у напрямку **Prograde** (рис. 12):

- збільшує орбітальну швидкість;
- збільшує висоту в протилежній точці орбіти;
- при достатній величині імпульсу орбіта може стати еліптичною з більшою великою піввіссю, параболичною чи гіперболичною.

Імпульс у напрямку **Retrograde** (рис. 13):

- зменшує орбітальну швидкість;
- знижує висоту в протилежній точці орбіти;
- при достатній величині імпульсу орбіта може стати більш низькою еліптичною чи перейти в суборбітальну траєкторію.

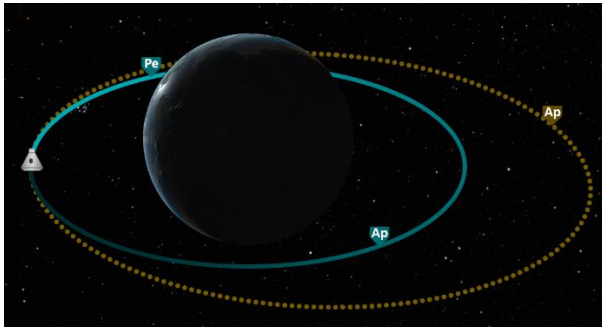


Рис. 12. Імпульс у напрямку Prograde

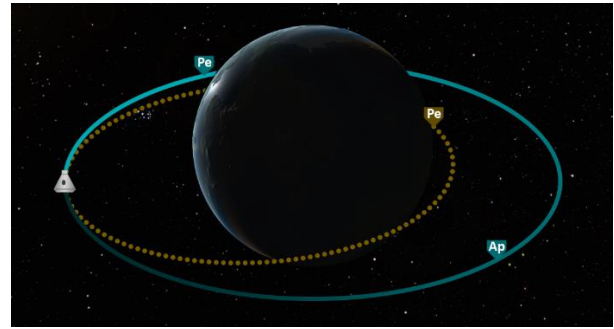


Рис. 13. Імпульс у напрямку Retrograde

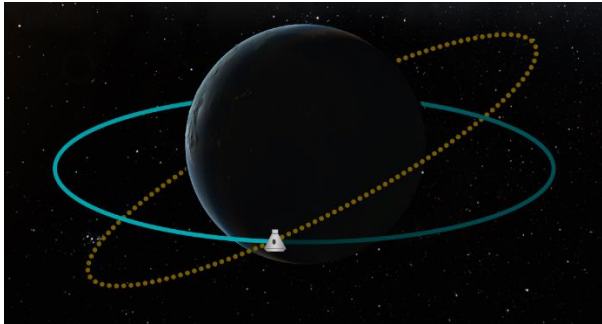


Рис. 14. Імпульс у напрямку Normal

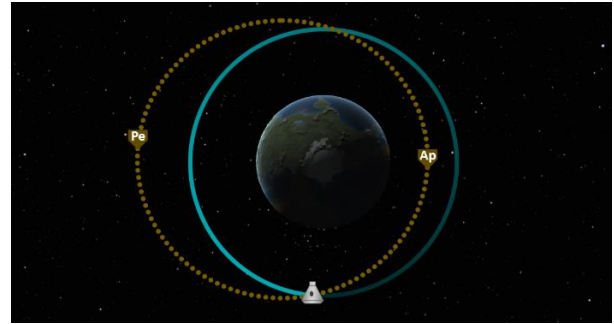


Рис. 15. Імпульс в напрямку Radial In

Імпульс у напрямках Normal/Anti-Normal (рис. 14) змінює нахил орбіти.

Імпульс у напрямках Radial In/Radial Out (рис. 15) "розвертає" орбіту навколо апарату без зміни її енергетики. Імпульс в напрямку планети знижує висоту попереду апарата та підвищує позаду. Імпульс в напрямку від планети, навпаки, підвищує висоту попереду апарата та знижує позаду.

2.6. Орбітальний маневр Гомана

Після розгляду впливу окремих імпульсів на орбітальні параметри, доцільно дослідити їх практичне застосування при виконанні орбітальних переходів. У контексті орбітальної механіки використовуються терміни "вища" та "нижча" орбіта, які характеризуються більшим та меншим значенням великої півосі відповідно. Перехід з нижчої орбіти на вищу здійснюється шляхом збільшення орбітальної швидкості (імпульс у напрямку Prograde), тоді як для зниження орбіти необхідне зменшення швидкості (імпульс у напрямку Retrograde).

Для виконання таких маневрів потрібно витратити певну кількість палива. В космічній механіці прийнято вимірювати витрати палива не в кілограмах чи літрах, а в зміні швидкості, яку воно може забезпечити, - це значення називається дельта- v (позначається Δv) і вимірюється в метрах за секунду. В KSP це значення відображається при плануванні маневрів. Δv відображає наскільки

потрібно змінити швидкість апарату для досягнення бажаної орбіти. Загальний запас дельта- v корабля, який показується в редакторі, визначає, які маневри він зможе виконати з наявним паливом.

Маневр Гомана [15] – це найефективніший спосіб переходу між круговими копланарними орбітами. Для здійснення маневру Гомана використовуються два імпульси для переходу з однієї кругової орбіти на іншу через еліптичну траєкторію. Перший імпульс переводить апарат на еліптичну орбіту, у якої перицентр співпадає з радіусом початкової (parking) орбіти, а апоцентр - з радіусом цільової (target) орбіти. Після досягнення апоцентру виконується другий імпульс, який перетворює еліптичну орбіту у кругову.

Розглянемо це на прикладі KSP. Встановимо апарат на кругову орбіту з висотою 160 км і спробуємо перевести його на кругову орбіту з висотою 480 км. Перший імпульс у напрямку Prograde збільшить швидкість так, щоб апоцентр еліптичної орбіти досягнув 480 км. Коли апарат досягає цієї точки, другий імпульс у напрямку Prograde "піднімає" перицентр, знову роблячи орбіту круговою. Кожен з цих імпульсів потребує певного дельта- v . Чим більша різниця між початковою та кінцевою орбітами, тим більше дельта- v потрібно витратити.

Розрахунок необхідних величин дельта- v для обох імпульсів орбітального переходу здійснюється за формулами, де r_1 – це висота початкової орбіти,

r_2 – це висота цільової орбіти, Δv_1 – це зміна швидкості під час першого імпульсу, а Δv_2 – це зміна швидкості під час другого імпульсу:

$$\Delta v_1 = \sqrt{\frac{\mu}{r_1}} \cdot \left(\sqrt{\frac{2r_2}{r_1 + r_2}} - 1 \right),$$

$$\Delta v_2 = \sqrt{\frac{\mu}{r_2}} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{2r_1}{r_1 + r_2}} \right).$$

На рис. 17 та рис. 18 видно, що в Kerbal Space Program імпульси з розрахованими параметрами виводять апарат точно на цільову орбіту.

```

1  var hParking = 160000;           // Висота початкової орбіти
2  var hTarget  = 480000;           // Висота цільової орбіти
3
4  var radius = 600000;              // Радіус планети
5  var mass = 5.2915158e22;          // Маса планети
6  var G = 6.6740831e-11;           // Гравітаційна стала
7  var m = mass * G;                 // Грав. параметр планети
8
9  var r1 = radius + hParking;
10 var r2 = radius + hTarget;
11
12 var dv1 = Math.sqrt(m / r1) * (Math.sqrt(2*r2 / (r1 + r2)) - 1);
13 var dv2 = Math.sqrt(m / r2) * (1 - Math.sqrt(2*r1 / (r1 + r2)));
14
15 console.log( `dV I переходу: ${dv1.toFixed(2)} м/с` );
16 console.log( `dV II переходу: ${dv2.toFixed(2)} м/с` );

```

Рис. 16. Код на JavaScript для розрахунку ΔV маневру Гомана

dV I переходу: 179.94 м/с
dV II переходу: 164.75 м/с

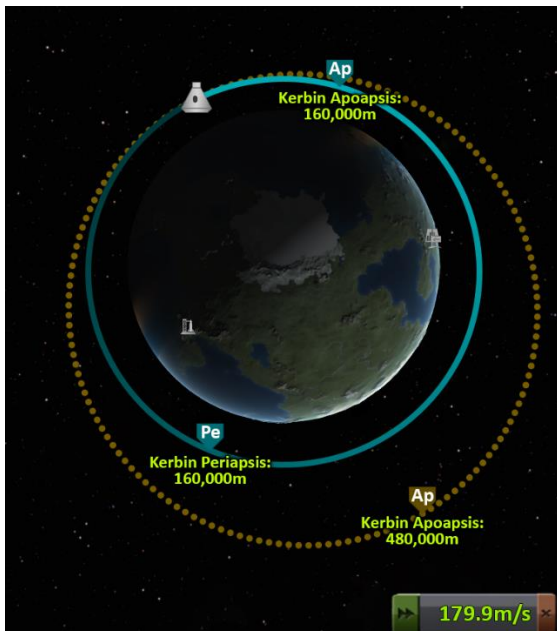


Рис. 17. Перший імпульс маневру Гомана



Рис. 18. Другий імпульс маневру Гомана

3. Відмінності KSP від реальності

Розрахунки показують, що KSP коректно імплементує перехід між орбітами, однак в грі є і спрощення фізичної моделі.

По-перше, замість вирішення задачі трьох тіл, гра використовує спрощену модель, де кожне небесне тіло має сферу гравітаційного впливу і апарат перебуває в одній із цих сфер залежно від дистанції. Це важлива відмінність, яку необхідно розглянути на заняттях із студентами, але вона не стане на заваді при вивченні основ небесної механіки, хоч це і матиме певні обмеження при вивченні деяких концепцій, таких як точки Лагранжа. При необхідності можна перейти до більш складного програмного забезпечення, якого як Orbiter, де задача трьох тіл врахована.

По-друге, для підвищення темпу гри масштаб об'єктів зменшений в порівнянні із реальним. В цьому є своя перевага, оскільки це дозволяє розглядати небесну механіку не в контексті знайомих значень розмірів небесних тіл, а абстрактно, де достатньо взяти із таблиці дані для формули, і результат буде коректним. Зрештою, на розсуд викладача, можна використати модифікацію RealSolarSystem, яка приведе параметри планет до реальних.

По-третє, умови в грі занадто ідеалізовані, де космос – це ідеальний вакуум без впливу релятивістських ефектів, сонячного вітру, космічного сміття, міжпланетного пилу, залишків атмосфер, ненадійність апаратів та інших фізичних явищ, розрахунок впливу яких важливий для планування реальних космічних місій. Деякі з цих явищ також додаються модифікаціями, але насправді, їх присутність не обов'язкова для розуміння теорії та формул.

Аеродинаміка в грі також значно спрощена порівняно з реальністю. Атмосферна модель не враховує багатьох складних ефектів, що виникають при вході та виході з атмосфери. Теплові навантаження та їх вплив на космічні апарати представлені в базовому вигляді, без детального моделювання теплопередачі та термічних напружень.

Усі ці спрощення існують з ціллю зробити гру доступною з можливістю працювати на пересічному комп'ютері та фокусом на головних принципах небесної механіки. Не зважаючи на спрощення, KSP успішно втілює фізичні закони й дозволяє розвинути інтуїтивне розуміння законів небесної механіки.

4. Перспективи розвитку

В межах роботи розглянуто тільки кілька базових елементів небесної механіки, які можна

вивчити за допомогою Kerbal Space Program. Проте потенціал гри для навчання значно ширший і включає багато складніших концепцій космічної навігації:

- зміна нахилу орбіти, полярна, екваторіальна та геостационарна орбіти;
- маневр орбітального рандеву (space rendezvous);
- міжпланетарний перехід;
- гравітаційний маневр;
- посадка апарату на небесне тіло в визначеному місці;
- перехоплення та зміна траєкторії астероїдів;
- повний цикл життя апарату – від проєктування та підрахунку необхідної дельта- v до запуску, приземлення на ціль та повернення апарату на Землю.

Також гра надає інструменти для розробки власних місій та завдань, що дозволяє викладачам створювати власні задачі різної складності. Можна налаштовувати початкові умови - параметри орбіти, характеристики космічного апарату, доступне паливо, встановити цілі та критерії успішного виконання завдання. Це дозволяє формувати повноцінні практичні курси з небесної механіки, де студенти будуть відпрацьовувати теоретичні знання.

Варто дослідити можливість автоматизації керування космічними апаратами. Хоча базова версія гри не підтримує програмування, існують модифікації (наприклад, kOS [16] та kRPC [17]), які дозволяють створювати скрипти для автоматизації різних маневрів в тому числі розділення та повернення бустера на місце запуску. І хоча в реальному житті є набагато більше факторів, ніж відображено в грі, це дозволить вивчити основні принципи побудови алгоритмів запуску та повернення космічних апаратів.

5. Висновки

Згідно з аналізом, гра коректно імплементує основні засади орбітальної механіки. Математичні розрахунки підтверджують відповідність ігрової механіки законам небесної механіки.

Kerbal Space Program – це потужний інструмент гейміфікації, що дає викладачам платформу для пояснення складних засад орбітального руху. Інтерактивне середовище, відчуття прогресу та виклику дозволяють поступово вивчати тему, а можливість експериментувати і отримувати миттєвий зворотній зв'язок сприяє глибокому розумінню теми студентом.

Попри певні спрощення, фізична модель KSP достатньо точно відтворює основні принципи

небесної механіки для навчальних цілей. Розрахунки орбітальних параметрів та результати маневрів відповідають теоретичним передбаченням.

Основними обмеженнями KSP при використанні як навчального інструменту є значно спрощена аеродинамічна модель та ідеалізація умов космічного простору. Зокрема, гра не враховує вплив сонячного вітру, космічного сміття та мікрометеоритів, міжпланетного пилу та інші фізичні явища, що впливають на реальні космічні місії. Це створює у студентів дещо спрощене уявлення про реальні умови космічних польотів, але не є перешкодою для опанування принципів небесної механіки.

Крім описаного в роботі, KSP має значний потенціал гейміфікації вивчення різних: зміни нахилу орбіти, виконання орбітального рандеву, здійснення міжпланетних переходів, проведення гравітаційних маневрів, відпрацювання точної посадки на небесні тіла, перехоплення астероїдів та планування повного циклу космічних місій. Можливість програмування космічних апаратів за допомогою модифікацій kOS та kRPC поєднує космічну галузь з програмуванням.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо матеріалів цієї публікації, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автор підтверджує, що не використовував технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Автор прочитав та погодився з опублікованою версією рукопису.

Література

1. *Kerbal Space Program* [Electronic resource] / Private Division. – 2024. – Access mode: <https://www.kerbalspaceprogram.com/downloads> (accessed 10.01.2025)

2. *Rocket science landscape* [Electronic resource] // Urban Dictionary. – 2004. – Access mode: <https://www.urbandictionary.com/define.php?term=rocket%20science> (accessed 10.01.2025)

3. *Gamification in Education: A Systematic Mapping Study* [Electronic resource] / D. Dicheva, C. Dichev, G. Agre, G. Angelova // *Educational Technology & Society*. – 2015. – Vol. 18, no. 3. – P. 75-88. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/278328934_Gamification_in_Education_A_Systematic_Mapping_Study (accessed: 10.01.2025).

4. *Díaz-Ramírez, J. Gamification in engineering education – An empirical assessment on learning and game performance* [Electronic resource] / J. Díaz-Ramírez // *Heliyon*. – 2020. – Vol. 6, no. 9. – Article No. e04972. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04972.

5. *Hurova, A. Gamification in space law: A strategy to navigate the growing landscape* [Electronic resource] / A. Hurova, M. Becker, N. Becu // *Acta Astronautica*. – 2025. – Vol. 229. – P. 749-757. DOI: 10.1016/j.actaastro.2025.01.054.

6. *Galeone, A. Gamification in the Space Sector: How Gamification Activities Can Foster the Passion and Interest for STEM Related Studies* [Electronic resource] / A. Galeone // *Handbook of Research on the Influence and Effectiveness of Gamification in Education* / ed. by O. Bernardes, V. Amorim, A. Carrizo Moreira. – IGI Global, 2022. – P. 285-306.

7. *Gamification of actions in physical space* [Text] : pat. 2944023 Canada : A63F 13/428 / Fahmie Brian ; applicant Game Complex, Inc. – № US 2015/022227 ; filed 24.03.2015 ; publ. 01.10.2015. – 26 p.

8. *Gamers Tackle Virtual Asteroid Sampling Mission* [Electronic resource] / NASA Goddard Space Flight Center. – 2016. – Access mode: <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/goddard/gamers-tackle-virtual-asteroid-sampling-mission/> (accessed 10.01.2025).

9. *Kerbal includes Ariane 5 and real ESA missions for gamers* [Electronic resource] / European Space Agency. – 2020. – Access mode: https://www.esa.int/About_Us/Branding_and_Partnerships/Kerbal_includes_Ariane_5_and_real_ESA_missions_for_gamers (accessed 10.01.2025).

10. *Danby, J. M. A. Fundamentals of Celestial Mechanics* [Text] / J. M. A. Danby. – 2nd revised & enlarged. – Willmann-Bell, 1988. – 464 p.

11. *Mohr, P. J. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014* [Electronic resource] / P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor // *Rev. Mod. Phys.* – 2016. – Vol. 88, no. 035009. DOI: 10.1103/RevModPhys.88.035009.

12. *Kerbin* [Electronic resource] / Kerbal Space Program Wiki. – 2024. – Access mode: <https://wiki.kerbalspaceprogram.com/wiki/Kerbin>

(accessed 10.01.2025).

13. *Kerbal Engineer Redux* [Electronic resource] / CurseForge. – 2014. – Access mode: <https://www.curseforge.com/kerbal/ksp-mods/kerbal-engineer-redux> (accessed 10.02.2025).

14. Logsdon, T. *Orbital Mechanics: Theory and Applications* [Text] / T. Logsdon. – 1st ed. – Wiley, 1997. – 466 p.

15. Hohmann, W. *The attainability of heavenly bodies* [Electronic resource] : NASA-TR-R-36 / W. Hohmann ; NASA. – Washington : NASA, 1960. – Access mode: <http://hdl.handle.net/2060/19980230631> (accessed 10.01.2025).

16. kOS: Kerbal Operating System [Electronic resource] / kOS Documentation. – 2024. – Access mode: <https://ksp-kos.github.io/KOS/> (accessed 10.01.2025).

17. kRPC Documentation [Electronic resource] / kRPC. – 2024. – Access mode: <https://krpc.github.io/krpc/> (accessed 10.01.2025).

References

1. Private Division. *Kerbal Space Program*. Available at: <https://www.kerbalspaceprogram.com/downloads> (accessed 10.01.2025).

2. Urban Dictionary. *Rocket science*. Available at: <https://www.urbandictionary.com/define.php?term=rocket%20science> (accessed 10.01.2025).

3. Dicheva, D., Dichev, C., Agre, G., & Angelova, G. Gamification in Education: A Systematic Mapping Study. *Educational Technology & Society*, 2015, vol. 18, no. 3, pp. 75-88. Available at: https://www.researchgate.net/publication/278328934_Gamification_in_Education_A_Systematic_Mapping_Study (accessed 10.01.2025).

4. Diaz-Ramirez, J. Gamification in engineering education – An empirical assessment on learning and game performance. *Heliyon*, 2020, vol. 6, no. 9, article no. e04972. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04972.

5. Hurova, A., Becker, M., & Becu, N. Gamification in space law: A strategy to navigate the growing landscape. *Acta Astronautica*, 2025, vol. 229, pp. 749-757. DOI: 10.1016/j.actaastro.2025.01.054.

6. Galeone, A. Gamification in the Space Sector: How Gamification Activities Can Foster the Passion and Interest for STEM Related Studies. In: Bernardes, O., Amorim, V., & Carrizo Moreira, A. (eds.) *Handbook of Research on the Influence and Effectiveness of Gamification in Education*, 2022. IGI Global, pp. 285-306.

7. Fahnle, B. *Gamification of actions in physical space*. Patent US, no. 2015/0222227.

8. NASA Goddard Space Flight Center. *Gamers Tackle Virtual Asteroid Sampling Mission*. Available at: <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/goddard/gamers-tackle-virtual-asteroid-sampling-mission/> (accessed 10.01.2025).

9. European Space Agency. *Kerbal includes Ariane 5 and real ESA missions for gamers*. Available at: https://www.esa.int/About_Us/Branding_and_Partnerships/Kerbal_includes_Ariane_5_and_real_ESA_missions_for_gamers (accessed 10.01.2025).

10. Danby, J. M. A. *Fundamentals of Celestial Mechanics*. 2nd edn. New York, Willmann-Bell, 1988. 464 p.

11. Mohr, P. J., Newell, D. B., & Taylor, B. N. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014. *Reviews of Modern Physics*, 2016, vol. 88, no. 3, article no. 035009. DOI: 10.1103/RevModPhys.88.035009.

12. Kerbal Space Program Wiki. *Kerbin*. Available at: <https://wiki.kerbalspaceprogram.com/wiki/Kerbin> (accessed 10.01.2025).

13. CurseForge. *Kerbal Engineer Redux*. Available at: <https://www.curseforge.com/kerbal/ksp-mods/kerbal-engineer-redux> (accessed 10.01.2025).

14. Logsdon, T. *Orbital Mechanics: Theory and Applications*. 1st edn. New York, Wiley, 1997. 466 p.

15. Hohmann, W. *The attainability of heavenly bodies*. NASA-TR-R-36. Washington, NASA, 1960. Available at: <http://hdl.handle.net/2060/19980230631> (accessed 10.01.2025).

16. KOS Documentation. *KOS: Kerbal Operating System*. Available at: <https://ksp-kos.github.io/KOS/> (accessed 10.01.2025).

17. kRPC. *kRPC Documentation*. Available at: <https://krpc.github.io/krpc/> (accessed 10.01.2025).

Надійшла до редакції 10.01.2025, розглянута на редколегії 21.01.2025

GAMIFICATION IN STUDYING CELESTIAL MECHANICS USING KERBAL SPACE PROGRAM

Pavlo Ponomarenko

The rapid development of technologies and their implementation in the educational process provide an opportunity to apply gamification, that is, the use of game mechanics and elements for in-depth study of a complex technical discipline. Computer games such as Kerbal Space Program (KSP) have already created an environment where students can comprehend and practically apply the theory of space mechanics with a sense of challenge and

reward. The use of gamification in the learning process has many advantages: improving academic performance, developing interaction between students, and increasing interest in technical sciences. **The subject of this study** is the capabilities and processes of the KSP game. **The object** of this research is the process and means of gamification in the study of celestial mechanics. **The aim** of this work is to study the possibilities, limitations, and prospects of using Kerbal Space Program in the gamification of the study of the basic concepts of celestial mechanics. The implementation of the stated research goal involves solving the following **tasks**: analyzing the ability of KSP to implement certain celestial mechanics; studying the prospects of KSP in teaching the basic concepts of celestial mechanics through game mechanics; study of the correspondence of the game physical model to real physical processes; and identification of limitations and prospects for the use of gamification through KSP for educational purposes. This study used **the system analysis method** of computer gamification tools. **The following results** were obtained in the course of the study: during the comprehensive analysis of KSP, it was established that the game complies with the basic laws of celestial mechanics and is capable of fairly accurately modeling orbital motion, maneuvers, gravitational phenomena, etc.; the main limitations and prospects for the use of KSP in the educational process were outlined. **Conclusions**: the study demonstrates that KSP implements the basic principles of celestial mechanics and provides tools for the practical mastery of complex concepts by students. This study shows the significant potential of the game, which allows significantly expanding educational opportunities in the study of celestial mechanics, and the interactive format of the game allows students to learn complex physical phenomena and concepts in an accessible and visual way.

Keywords: gamification; celestial mechanics; Kerbal Space Program; orbital maneuvers; space engineering; interactive learning.

Пономаренко Павло Геннадійович – провідний розробник, Stepico, Львів, Україна

Ponomarenko Pavlo – Lead Developer, Stepico, Lviv, Ukraine
e-mail: pg.ponomarenko@gmail.com, ORCID: 0009-0005-5998-2517.