Научная статья

УДК 530.1

DOI: 10.18384/2949-5067-2025-2-19-26

ПРИНЦИП УСТОЙЧИВОСТИ В ФИЗИКЕ НЕИНЕРЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ ОТСЧЁТА

Камалов Т. Ф.

*Государственный университет просвещения, г. Москва, Российская Федерация
e-mail: timkamalov@gmail.com*

Поступила в редакцию 28.03.2025

После доработки 11.04.2025

Принята к публикации 21.04.2025

Аннотация

Цель: показать, что принцип наименьшего действия следует из требования устойчивости. Это означает возможность получения фундаментальных законов физики из устойчивости, т. к. они выводятся из принципа наименьшего действия.

Процедура и методы. Рассматривается вариационный принцип, который обобщает классический принцип наименьшего действия на любые системы отсчёта, включая случайные неинерциальные и требуя не только равенства нулю первой вариации функции действия, но и неотрицательности второй вариации функции действия.

Результаты. Из принципа наименьшего действия можно получить основные фундаментальные законы физики, поэтому можно утверждать, что они следуют из требования устойчивости.

Теоретическая и/или практическая значимость заключается в том, что аксиоматическое введение принципа устойчивости приводит к аксиоматике механики, электродинамики и других областей физики.

Ключевые слова: стохастическая физика, неинерциальная физика, принцип устойчивости, неустойчивость

Благодарности: автор благодарен профессору Беляеву В. В. за ценные обсуждения и интерес к этой работе.

Для цитирования.

Камалов Т. Ф. Принцип устойчивости в физике неинерциальных систем отсчёта // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-математика. 2025. № 2. С.19–26. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2025-2-19-26>

Original research article

THE STABILITY PRINCIPLE IN PHYSICS OF NON-INERTIAL REFERENCE FRAMES

T. Kamalov

Federal State University of Education, Moscow, Russian Federation

e-mail: timkamalov@gmail.com

Received by the editorial office 28.03.2025

Revised by the author 11.04.2025

Accepted for publication 21.04.2025

Abstract

Aim is to demonstrate that the principle of least action follows from the stability requirement. This means that it is possible to obtain fundamental laws of physics from stability, since they are derived from the principle of least action.

Methodology. A variational principle is considered which generalizes the classical principle of least action to any reference frames, including random non-inertial ones, and requires not only the first variation of the action function to be zero, but also the second variation of the action function to be non-negative.

Results. The principle of least action can be used to obtain the main fundamental laws of physics, therefore it can be argued that they follow from the stability requirement.

Research implications. The significance of the study lies in the fact that the axiomatic introduction of the stability principle leads to the axiomatics of mechanics, electrodynamics and other areas of physics.

Keywords: stochastic physics, non-inertial physics, stability principle, instability

Acknowledgments: The author is grateful to Professor V. V. Belyaev for valuable discussions and interest in this work.

For citation:

Kamalov, T. F. (2025). The stability principle in physics of non-inertial reference frames. In: *Bulletin of Federal State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 2, pp.19–26. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2025-2-19-26>

Введение

В реальности инерциальные системы отсчёта не существуют. Всегда присутствуют малые воздействия случайных сил и полей, делающие систему отсчёта случайной неинерциальной стохастической. При использовании стохастических систем отсчёта и отказе от инерциальных базовых принципы и аксиомы физики подвергаются изменению.

Принцип устойчивости в физике

Учёт влияния случайных малых сил и полей расширяет уравнения классической физики, дополняя их переменными, обладающими недетерминированным, вероятностным поведением. В этом случае

рассматриваются не только устойчивые детерминированные траектории, но и неустойчивые [1], случайные, которые обычно считают погрешностью измерений в экспериментах при использовании классической физики.

Стохастические системы отсчёта (системы отсчёта со случайными силами инерции) позволяют описывать влияние случайных полей как на частицу, так и на наблюдателя. Переход от стохастической системы отсчёта к инерциальной приводит к тому, что свободная частица начинает случайным образом осциллировать, коррелируя с осцилляциями других свободных частиц.

Если рассматривать осцилляции с одной частотой, они выглядят когерентными. Преобразования инерциальных систем отсчёта представлены преобразованиями Галилея. Преобразования случайных неинерциальных систем отсчёта отличаются от преобразований Галилея на остаточные члены разложения Тейлора координаты $Q(t)$

$$Q = q(t) + \dot{q}(t)\tau + \Delta q(t),$$

$$T' = t,$$

где

$$\Delta q(t) = \sum_{k=2}^N (-1)^k \frac{1}{k!} \tau^k q^{(k)}(t).$$

В результате свободные частицы в инерциальных системах характеризуются неопределённостью в координате и импульсе, времени и энергии, равной остаточным членам разложения Тейлора.

Принцип устойчивости может не только обобщать, но и логически объяснять основные законы природы. Принцип устойчивости позволяет использовать устойчивость физических объектов и их состояний для объяснения и обобщения таких фундаментальных законов природы, как принцип наименьшего действия, устойчивость атомов, стационарность возможных траекторий и т. д. Он может быть использован как обобщённый закон, объясняющий такой фундаментальный закон природы, как принцип наименьшего действия. Поэтому его, очевидно, можно распространить и на все другие результаты, вытекающие из принципа наименьшего действия, такие как законы Ньютона, уравнения Эйлера-Лагранжа, уравнение Шредингера, законы распространения света и электромагнитных волн и т. д.

Условие устойчивости при расчёте механических траекторий предложено в работах Н. Г. Четаева, который считал «устойчивость, вероятно, по сути общим явлением, которое должно проявляться в основных законах природы» [2]. По мнению Н. Г. Четаева, устойчивость – это не просто случайность, а следствие воздействия на систему постоянно действующих бесконечно малых возмущений, которые, сколь бы малы они ни были, влияют на состояние механической системы. Развивая это явление и используя принцип

устойчивости в инерциальных системах отсчёта [1], перейдём к формулировке принципа устойчивости в стохастических системах отсчёта. Переход от стохастических систем отсчёта к инерциальным означает обнуление всех случайных переменных, описывающих неустойчивости в формализме высших производных Остроградского [3].

Принцип устойчивости

Существуют стохастические системы отсчёта, в которых устойчивая физическая система сохраняет свою энергию (в виде суммы квадратичных форм координат, скорости, ускорения и высших производных), если на неё не действуют диссипативные силы.

Математически это выражает, что энергия системы должна быть ограничена снизу, если первая вариация действия равна нулю ($\delta S=0$), а вторая вариация действия неотрицательна ($\delta^2 S > 0$).

Энергией устойчивых физических систем в стохастических системах отсчёта называется функция, которая сохраняется во времени [4]

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N a_k (q^{(k)})^2, \quad a_k > 0. \quad (1)$$

Действительно, первая вариация действия δS получается при варьировании $q, \dot{q}, \ddot{q}$:

$$\begin{aligned} \delta S &= \delta \int_{t_1}^{t_2} L_r(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dots, \dot{q}^{(n)}, \dots) dt = \\ &= \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{\partial L_r}{\partial q} \delta q + \frac{\partial L_r}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q} dt + \frac{\partial L_r}{\partial \ddot{q}} \delta \ddot{q} + \dots \right) dt = \\ &= \int_{t_1}^{t_2} \sum_{n=0}^N (-1)^n \frac{d^n}{dt^n} \frac{\partial L_r}{\partial q^{(n)}} \delta q^{(n)} dt = 0 \end{aligned}$$

Здесь, интегрируя по частям члены с $\delta \dot{q}$ и $\delta \ddot{q}$, получаем уравнения Эйлера-Остроградского [5]:

$$\sum_{n=0}^N (-1)^n \frac{d^n}{dt^n} \frac{\partial L_r}{\partial q^{(n)}} \delta q^{(n)} dt = 0, \quad (2)$$

Или

$$\frac{\partial L_r}{\partial q} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L_r}{\partial \dot{q}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial L_r}{\partial \ddot{q}} - \frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial L_r}{\partial \dot{q}^{(3)}} + \dots + (-1)^n \frac{d^n}{dt^n} \frac{\partial L_r}{\partial q^{(n)}} + \dots = 0 \quad (3)$$

Вторая вариация равна

$$\delta^2 S = \sum_{k=0}^N a_k \int (\delta q^{(k)})^2 dt > 0. \quad (3)$$

На экстремальных (где первая вариация $\delta S=0$) вторая вариация определяет устойчивость траектории. Если $\delta^2 S > 0$ для всех допустимых вариаций, то экстремаль соответствует минимуму действия.

Если ограничиться только вторыми производными обобщённых координат по времени, то функцию действия перепишем в виде

$$S(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \int_{t_1}^{t_2} L_r(q, \dot{q}, \ddot{q}) dt \quad (5)$$

Обобщённые импульсы для систем с высшими производными имеют вид:

$$p_1 = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \ddot{q}} \right), \quad p_2 = \frac{\partial L}{\partial \ddot{q}}, \quad (6)$$

а Гамильтониан принимает форму:

$$H = p_1 \dot{q} + p_2 \ddot{q} - L \quad (7)$$

Из закона сохранения энергии должно следовать:

$$\frac{dH}{dt} = 0 \quad (8)$$

(если L не зависит явно от времени).

Тогда для квадратичных форм лагранжиана энергия устойчивой системы в стохастических системах отсчёта примет вид [5]:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N \mathbf{a}_k (\mathbf{q}^{(k)})^2, \quad \mathbf{a}_k > 0,$$

Отсюда можно сформулировать следующее утверждение [6]:

Динамическая система устойчива в стохастических системах отсчёта и сохраняет полную энергию – поступательную, вращательную, колебательную, электромагнитную и гравитационную (выраженную в виде квадратичных форм координат, скоростей и высших производных), – если на неё не действуют диссипативные силы.

Из равенства нулю первой вариации функции действия получаем уравнения Эйлера-Лагранжа для стохастических систем отсчёта в форме Остроградского.

При измерении случайных неинерционных сил возникают погрешности. Поэтому идея Ньютона $F - ma + f = 0$ об описании физических систем дифференциальными уравнениями второго порядка с учётом принципа д'Аламбера со случайной силой инерции f выражает зависимость от высших производных координат по времени. Здесь сила f случайная даёт ошибку измерений и при усреднении равна нулю $\langle f \rangle = 0$. Однако описание квантово-механического поведения микрообъектов выражается распределениями вероятностей, и, отбрасывая переменные с высшими производными, мы перейдём ко второму закону Ньютона. Квантово-механическая теория описывает корреляции микрообъектов, и значения случайных неинерционных сил f для различных микрообъектов будут коррелированными. Следовательно, для описания физических систем в стохастических системах отсчёта необходимы уравнения с высшими производными в виде формализма Остроградского и (3) перепишем в виде [7–12]. Переход от стохастических систем отсчёта к инерциальным системам отсчёта означает, что усреднение по всем случайным переменным равняется нулю с получением второго закона Ньютона из уравнения динамики в стохастической системе отсчёта

$$F - ma + \tau m \dot{a} - \frac{1}{2!} \tau^2 m a^{(2)} + \dots + \frac{(-1)^n}{n!} \tau^n m a^{(n)} + \dots = 0 \quad (9)$$

$$\dot{a}(t_0) = 0, \ddot{a}(t_0) = 0, \dots, a^{(n)}(t_0) = 0, \dots$$

$\tau = \hbar/2mc^2$ – временной интервал усреднения, a – ускорение, t_0 – момент времени достижения траектории устойчивости.

Нечётные производные описывают диссипативные силы и могут быть исключены при рассмотрении в отсутствии диссипативных сил. Второй закон Ньютона $F - ma = 0$ – это дифференциальное уравнение второго порядка, описывающее устойчивую динамику в инерциальных системах отсчёта.

Заключение

Теоретическую физику можно построить исходя не из принципа наименьшего действия, а из устойчивости. Это, в свою очередь, позволяет вывести основные законы различных разделов физики. Принцип устойчивости устраняет необходимость одновременно вводить несколько аксиом в физике. Это относится к механике, электродинамике, теории относительности, квантовой физике и другим областям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Камалов Т. Ф. Принцип устойчивости // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2022. № 2. С. 51–55. DOI: 10.18384/2310-7251-2022-2-51-55.
2. Чегаев Н. Г. Об устойчивых траекториях динамики // Ученые записки Казанского университета. 1931. Т. 91. Кн. 4. С. 3–8.
3. Woodard R. P. Avoiding Dark Energy with 1/R Modifications of Gravity // The Invisible Universe: Dark Matter and Dark Energy / ed. L. Papantonopoulos. Berlin: Springer, 2007. P. 403–433 (Series: Lecture Notes in Physics, 720). DOI: 10.1007/978-3-540-71013-4_14.
4. Wheeler J. T. Not-so-classical mechanics: unexpected symmetries of classical motion // Canadian Journal of Physics. 2005. Vol. 83. No. 2. P. 91–138. DOI: 10.1139/p05-003.
5. El-Nabulsi R. A. Non-Standard Non-Local-in-Time Lagrangians in Classical Mechanics // Qualitative Theory of Dynamical Systems. 2014. Vol. 13. P. 149–160. DOI: 10.1007/s12346-014-0110-3.
6. Newton I. Philosophiae naturalis principia mathematica. London: Jussu Societatis Regiae ac typis Josephi Streater. Prostat apud plures bibliopolas, 1687. 516 p.
7. Kamalov T. F. Quantum correction for Newton's Law of Motion // Symmetry. 2020. Vol. 12 (1). Article no. 63. DOI: 10.3390/sym12010063.
8. Kamalov T. F. Quantum extension for Newton's law of motion // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1251: Advances in Fundamental Physics: Prelude to Paradigm Shift, 11th International Symposium Honoring Noted Mathematical Physicist Jean-Pierre Vigiér (6–9 August 2018, Liege, Belgium). Article no. 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/1251/1/012022.
9. Kamalov T. F. Instability states and Ostrogradsky formalism // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1051: XX International Meeting “Physical Interpretations of

- Relativity Theory 2017” (3–6 July 2017, Moscow, Russian Federation). Article no. 012033. DOI: 10.1088/1742-6596/1051/1/012033.
10. Kamalov T. F. Instability Criterion and Uncertainty Relation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1557: XXI International Meeting “Physical Interpretations of Relativity Theory 2019” (1-5 July 2019, Moscow, Russian Federation). Article no. 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/1557/1/012003.
 11. Kamalov T. F. Physics of Non-Inertial Reference Frames // *American Institute of Physics Conference Proceedings*. 2010. Vol. 1316. Iss. 1. P. 455–459. DOI: 10.1063/1.3536452.
 12. Kamalov T. F., Kamalov Yu. T. Physics of Non-Inertial Reference Frames, conclusions and consequences // *Journal of Physics: Conference Series*. 2025. Vol. 3017: Eleventh International Workshop on Decoherence, Information, Complexity and Entropy (DICE 2024). Article no. 012020. DOI: 10.1088/1742-6596/3017/1/012020.

REFERENCES

1. Kamalov, T. F. (2022). Stability principle. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2, 51–55. DOI: 10.18384/2310-7251-2022-2-51-55 (in Russ.).
2. Chetaev, N. G. (1931). On stable trajectories of dynamics. In: *Scientific Notes of Kazan University*, 91 (4), 3–8 (in Russ.).
3. Woodard, R. P. (2007). Avoiding Dark Energy with 1/R Modifications of Gravity. In: Papantonopoulos, L. ed. *The Invisible Universe: Dark Matter and Dark Energy*. Berlin: Springer, pp. 403–433 (Series: Lecture Notes in Physics, 720). DOI: 10.1007/978-3-540-71013-4_14.
4. Wheeler, J. T. (2005). Not-so-classical mechanics: unexpected symmetries of classical motion. In: *Canadian Journal of Physics*, 83 (2), 91–138. DOI: 10.1139/p05-003.
5. El-Nabulsi, R. A. (2014). Non-Standard Non-Local-in-Time Lagrangians in Classical Mechanics. In: *Qualitative Theory of Dynamical Systems*, 13, 149–160. DOI: 10.1007/s12346-014-0110-3.
6. Newton, I. (1687). *Philosophiae naturalis principia mathematica*. London: Jussu Societatis Regiae ac typis Josephi Streater. Prostat apud plures bibliopolas.
7. Kamalov, T. F. (2020). Quantum correction for Newton's Law of Motion. In: *Symmetry*, 12 (1), article no. 63. DOI: 10.3390/sym12010063.
8. Kamalov, T. F. (2020). Quantum extension for Newton's law of motion. In: *Journal of Physics: Conference Series*, 1251, 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/1251/1/012022.
9. Kamalov, T. F. (2018). Instability states and Ostrogradsky formalism. In: *Journal of Physics: Conference Series*, 1051, 012033. DOI: 10.1088/1742-6596/1051/1/012033.
10. Kamalov, T. F. (2020). Instability Criterion and Uncertainty Relation. In: *Journal of Physics: Conference Series*, 1557, 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/1557/1/012003.
11. Kamalov, T. F. (2010). Physics of Non-Inertial Reference Frames. In: *AIP Conference Proceedings*, 1316 (1), 455–459. DOI: 10.1063/1.3536452.

12. Kamalov, T. F. & Kamalov, Yu. T. (2025). Physics of Non-Inertial Reference Frames, conclusions and consequences. In: *Journal of Physics: Conference Series*, 3017, 012020. DOI: 10.1088/1742-6596/3017/1/012020.
-

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Камалов Тимур Фянович (г. Москва) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры фундаментальной физики и нанотехнологий Государственного университета просвещения;

<https://orcid.org/0000-0002-4349-4747>; e-mail: timkamalov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Timur F. Kamalov (Moscow) – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, Federal State University of Education;

<https://orcid.org/0000-0002-4349-4747>; e-mail: timkamalov@gmail.com