АКСИОМАТИЧЕСКИЙ ДЕДУКТИВНЫЙ ФОРМАЛИЗМ МЕХАНИКИ В ПСЕВДОЕВКЛИДОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ-ВРЕМЕНИ

Спиричев Ю.А. E-mail: yurii.spirichev@mail.ru

АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт радиоэлектронной техники», г. Заречный

***Аннотация**: описан аксиоматический дедуктивный формализм механики в псевдоевклидовом пространстве-времени. С помощью этого формализма получены уравнения сохранения энергии-импульса с описанием всех сил инерции для идеальной сплошной упругой среды и материальной точки. Получены новые дифференциальные уравнения небесной механики для среды и материальной точки, уравнения третьего закона Кеплера и инерциального углового ускорения, уравнения гравитационных волн для среды и свободного пространства. Показано, что вихревое движение среды является фундаментальным движением, а дивергенция центробежной силы эквивалентна источнику потенциального гравитационного поля.*

***Ключевые слова:** аксиоматический дедуктивный формализм, псевдоевклидово пространство-время, тензор энергии-импульса, силы инерции, центробежная сила, силы гравитации, гравитационные волны, небесная механика, третий закон Кеплера, эффект Джанибекова.*

AXIOMATIC DEDUCTIVE FORMALISM OF MECHANICS IN PSEUDO-EUCLIDEAN SPACE-TIME

Spirichev Yurii A. E-mail: yurii.spirichev@mail.ru

JSC "Scientific Research and Design Institute of Radioelectronic Technology", Zarechny

***Abstract**: an axiomatic deductive formalism of mechanics in pseudo-Euclidean space-time is described. Using this formalism, energy-momentum conservation equations are derived, describing all inertial forces for an ideal continuous elastic medium and a particle. New differential equations of celestial mechanics are obtained for the medium and the particle, along with equations for Kepler's third law and inertial angular acceleration, and gravitational wave equations for the medium and free space. It is shown that the vortex motion of the medium is a fundamental motion, and the divergence of the centrifugal force is equivalent to the source of a potential gravitational field.*
***Keywords**: axiomatic deductive formalism, pseudo-Euclidean space-time, stress-energy tensor, inertial forces, centrifugal force, gravitational forces, gravitational waves, celestial mechanics, Kepler's third law, Dzhanibekov effect.*

УДК 517.9

DOI 10.24412/2312-8089-2026-11101

1 Введение

Аксиоматический дедуктивный метод относится к основным научным методам теоретического исследования, позволяющим построить последовательную и непротиворечивую теорию. Большинство утверждений в такой теории являются аналитическими истинами, не требующими эмпирического обоснования, так как их истинность гарантирована их логической и математической выводимостью из аксиом теории. Теория, построенная этим методом, обладает свойством предсказания и синтеза новых научных знаний.

Первой научной теорией, построенной этим методом, была геометрия Евклида, которая длительное время служила эталоном аксиоматического дедуктивного метода и стала примером для построения геометрий Н. Лобачевского и Б. Римана.

Первой аксиоматической дедуктивной теорией в физике была теория Ньютона, построенная на основе трехмерного пространства Евклида и абсолютного времени. В свою механику Ньютон ввел силу инерции, которая стала играть фундаментальную роль в динамике движения тел, но

с момента ее введения и до настоящего времени она вызывает споры, а многие механики считают силу инерции Ньютона и центробежную силу инерции фиктивными.

На основе анализа электромагнитной теории Дж. Максвелла и работ Х. Лоренца французский математик А. Пуанкаре в 1904 году сделал фундаментальное открытие новой геометрии нашего мира - четырехмерного псевдоевклидова пространства-времени [1]. В этом пространстве протекают все физические процессы нашего мира, а закон сохранения энергии-импульса и волновые уравнения электромагнитного поля являются прямым следствием геометрии этого пространства. Это позволяет построить новый аксиоматический дедуктивный формализм механики и электродинамики. Теорию псевдоевклидова пространства-времени в дальнейшем развивал Г. Минковский и это пространство часто называют пространством Минковского. А. Пуанкаре первым перешел к четырехмерным физическим показателям. Для описания электромагнитного поля и его источников он ввел четырехмерный электромагнитный потенциал и четырехмерную плотность тока, положив начало дедуктивному формализму электродинамики. Для описания механики он ввел четырехмерный импульс $P_\mu(cm, i\boldsymbol{P})$, и четырехмерную скорость $V_\mu(c, i\boldsymbol{V})$, положив начало дедуктивному формализму механики.

В работе [2] автором был построен аксиоматический дедуктивный формализм электродинамики, показавший свою эффективность в решении ее проблем и теоретического обоснования электродинамических явлений. Этот формализм не является новой теорией, а является дополнением и исправлением построенной индуктивным методом теории Дж. Максвелла. Предлагаемый аксиоматический формализм сил инерции и небесной механики также не является новой теорией, а является переводом механики из трехмерного пространства Евклида в псевдоевклидово пространство-время.

В аксиоматическом дедуктивном формализме электродинамики первой аксиомой является существование четырехмерного псевдоевклидова пространства-времени. Второй аксиомой является существование четырехмерного электромагнитного потенциала и четырехмерной плотности тока.

В аксиоматическом дедуктивном формализме механики, аналогично формализму электродинамики, первой аксиомой является существование четырехмерного псевдоевклидова пространства-времени. Второй аксиомой можно было бы принять четырехмерный импульс $P_\mu(cm, i\boldsymbol{P})$, предложенный А. Пуанкаре, но этот вектор является скалярным произведением вектора четырехмерной скорости $V_\mu(c, i\boldsymbol{V})$. на массу m. Поэтому второй аксиомой является существование массы (плотности массы) m, имеющей четырехмерную скорость $V_\mu(c, i\boldsymbol{V})$. Структура аксиоматического дедуктивного формализма механики приведена на рисунке 1. С помощью этого формализма получено уравнения сохранения энергии-импульса с описанием всех сил инерции для идеальной сплошной упругой среды и материальной точки. Получены уравнения инерциального движения среды и материальной точки, уравнения небесной механики и волновые уравнения гравитационных волн, получено новым способом дифференциальное уравнение третьего закона Кеплера и уравнение инерциального углового ускорения. Показано, что дивергенция центробежной силы эквивалентна источнику потенциального поля гравитации.

Четырёхмерное пространство-время Пуанкаре - Минковского является линейным. Движения в нём рассмотрены в четырёхмерной декартовой системе координат с действительной временной и мнимыми пространственными координатами. Силы инерции эквивалентны силам гравитации, а инерциальное движение среды или материальной точки понимается как движение под действием только сил инерции и гравитации

при отсутствии влияния иных видов сил. В ОТО такое движение трактуется как движение по геодезической линии в искривлённом пространстве-времени.

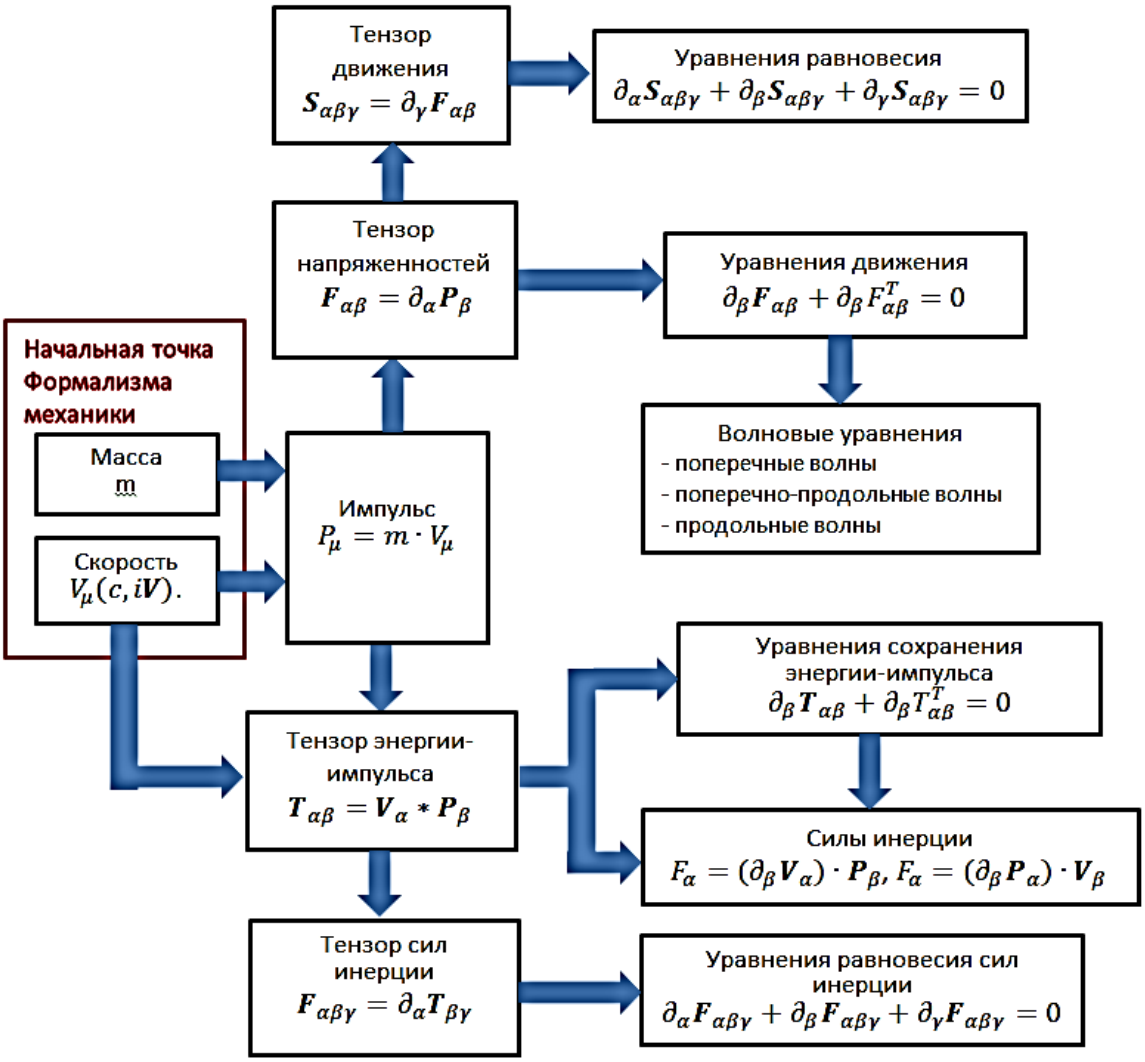

Рисунок 1 - Аксиоматический дедуктивный формализм механики

Для механики предлагаемый аксиоматический формализм особенно важен, так как до настоящего времени для малых скоростей движения тел в ней используется теория Ньютона, созданная для трёхмерного евклидова пространства и абсолютного времени. Для высоких скоростей движения в механике также используют теорию Ньютона, но с релятивистскими поправками. Эту механику называют релятивистской. Таким образом, механика фактически не перешла из трёхмерного евклидова пространства

в четырехмерное псевдоевклидово пространство-время. Именно поэтому в механике не решены проблемы сил инерции, и их до настоящего времени некоторые механики считают фиктивными.

Силы инерции, с момента введения их Ньютоном, являются предметом споров. Критика второго закона Ньютона современниками была основана на том, что был не понятен источник силы инерции, т.е. невозможно было указать, со стороны каких тел она возникает. Это привело к тому, что часть физиков стала называть силы инерции фиктивными силами. Особенность инерции понимал и сам Ньютон, называя ее «врожденной силой материи»: «Врождённая сила материи есть присущая ей способность сопротивления, по которой всякое отдельно взятое тело, поскольку оно предоставлено самому себе, удерживает своё состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. От инерции материи происходит, что всякое тело лишь с трудом выводится из своего покоя или движения. Поэтому врождённая сила могла бы быть весьма вразумительно названа силою инерции». По этой проблеме Л. Эйлер написал «Проявление инерции отлично от того, какое свойственно обычным силам. Поэтому для избегания какой-либо путаницы на этой почве мы опустим слово «сила» и будем рассматриваемое свойство тел называть просто инерцией». А. Ю. Ишлинский отмечал, что «ни одно новое понятие в механике не принесло в дальнейшем столько хлопот и недоразумений, как именно ньютонова сила инерции» [3]. Несмотря на то, что в дальнейшем силы инерции связали (отождествили) с силами гравитации с точностью до 10^{-14} [4], ошибки в понимании сил инерции существуют в теоретической механике до настоящего времени. Примером является неспособность механики Ньютона объяснить безопорное перемещение инерционных механизмов, получивших название «инерциоидов». Эти механизмы перемещаются с использованием центробежной силы, которая, «официально» считается фиктивной. В механике Ньютона отсутствуют критерии, позволяющие

отделить реальные силы от фиктивных (воображаемых), вводимых для упрощения расчетов. Критерием реальности сил является энергия взаимодействия, связанная с этими силами. Поэтому все силы инерции, входящие в закон сохранения энергии-импульса, являются реальными силами, а те, которые в него не входят, являются фиктивными силами. К сожалению, в понимании законов сохранения энергии, импульса и момента импульса в механике псевдоевклидова пространства существуют проблемы. Это утверждение требует пояснения.

В механике Ньютона для энергии, импульса и момента импульса действуют самостоятельные законы сохранения этих фундаментальных физических величин. Такое положение закрепила известная теорема Э. Нётер [5, с. 611-630], согласно которой эти законы сохранения являются следствиями симметрий пространства и времени нашего мира. Закон сохранения энергии вытекает из однородности времени. Закон сохранения импульса - из однородности пространства, а закон сохранения момента импульса - из изотропности пространства. В учебной литературе эти законы сохранения обычно рассматривают в отдельных главах с раздельным математическим описанием. Однако в псевдоевклидовом пространстве-времени эти три закона объединяются в единый закон сохранения энергии-импульса, который описывается одним четырёхмерным дифференциальным уравнением, которое следует из тензора энергии-импульса (ТЭИ) в виде его четырёхмерной дивергенции. Это уравнение описывает прямолинейные и криволинейные (в том числе и вращательные) движения. Таким образом, энергия-импульс (вместе с моментом импульса) это единая физическая величина, и её компоненты нельзя рассматривать раздельно и независимо друг от друга, поскольку они связаны между собой одним четырёхмерным дифференциальным уравнением.

Применение аксиоматического дедуктивного формализма в механике решает описанные проблемы с силами инерции и пониманием законов сохранения энергии-импульса. Для получения уравнений механики свободного инерциального движения среды и материальной точки, куда входят силы инерции, необходимо получить ТЭИ и тензор напряженностей в виде четырехмерной производной импульса $\partial_\gamma P_\mu(cm, i\boldsymbol{P})$. Дивергенция ТЭИ дает нам уравнения сохранения энергии-импульса и уравнения баланса сил инерции. Дивергенция тензора напряженностей дает нам уравнения движения сплошной среды и материальной точки, а также волновые уравнения для сил инерции.

Здесь следует отметить, что в ОТО принят за основу ТЭИ материи, являющийся источником искривления пространства-времени. Этот ТЭИ описывает сохранение энергии-импульса и баланс сил инерции, но не содержит описания законов движения поля сил инерции, или поля сил гравитации. Поэтому в ОТО существует проблема получения волновых уравнений гравитационных волн, как движения геометрии пространства-времени. Такие уравнения движения гравитационного поля автоматически вытекают из тензора напряженности $\partial_\gamma P_\mu(cm, i\boldsymbol{P})$, который в ОТО не рассматривается.

Следует подчеркнуть, что все теоретические результаты, полученные в настоящей работе, определяются только четырехмерной псевдоевклидовой геометрией пространства-времени и начальной точкой формализма в виде аксиомы существования плотности массы и четырехмерного вектора скорости, предложенного А. Пуанкаре. В формализм не вносятся какие-либо новые внешние дополнительные элементы, допущения, предположения или гипотезы. Предположения касаются только физической интерпретации полученных теоретических результатов, требующих экспериментальной верификации.

2 Тензор и уравнения сохранения энергии-импульса сплошной идеальной упругой среды и материальной точки

Четырехмерный импульс имеет представление $P_\mu(cm, i\mathbf{P}) = P_\mu(cm, im\mathbf{V})$, а четырехмерная скорость имеет представление $V_\mu(c, i\boldsymbol{V})$, где m – плотность массы среды, **P** – вектор трехмерного импульса, **V** - вектор трехмерной скорости среды, c – скорость света, i=$\sqrt{-1}$ – мнимая единица, μ=0,1,2,3. Обычно скорости движения тел в механике много меньше скорости света, поэтому для упрощения выражений и улучшения их восприятия примем релятивистский коэффициент $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ равным единице. Для введения релятивистской поправки при высоких скоростях движения, достаточно четырехмерный импульс и четырехмерную скорость умножить на релятивистский коэффициент. Для принятого представления псевдоевклидовой геометрии, оператор четырехмерной частной производной имеет вид $\partial_\mu(\partial_t/c, -i\cdot\nabla)$. При этом можно не различать ковариантные и контравариантные индексы четырехмерных векторов и тензоров.

Канонический тензор энергии-импульса (ТЭИ) имеет вид [6, с. 109]:

$$T_{\nu\mu} = \begin{bmatrix} W & i\frac{1}{c}\mathbf{S} \\ ic\cdot\mathbf{g} & t_{ik} \end{bmatrix} \quad (\nu, \mu=0,1,2,3;\ i, k=1, 2, 3) \qquad (1)$$

где W – плотность энергии;

S – плотность потока энергии (вектор Умова-Пойнтинга);

g – плотность импульса;

$\mathbf{t}_{ik}$ – тензор плотности потока импульса (тензор напряжений).

В соответствии с аксиоматическим дедуктивным формализмом получим ТЭИ для идеальной сплошной упругой среды в виде тензорного произведения четырехмерной скорости на четырехмерный импульс:

$$T_{\alpha\beta} = \mathbf{V}_\alpha \otimes \mathbf{P}_\beta = \begin{pmatrix} m\cdot c^2 & i\cdot c\cdot P_x & i\cdot c\cdot P_y & i\cdot c\cdot P_z \\ i\cdot c\cdot P_x & -V_x\cdot P_x & -V_x\cdot P_y & -V_x\cdot P_z \\ i\cdot c\cdot P_y & -V_y\cdot P_x & -V_y\cdot P_y & -V_y\cdot P_z \\ i\cdot c\cdot P_z & -V_z\cdot P_x & -V_z\cdot P_y & -V_z\cdot P_z \end{pmatrix} \qquad (2)$$

Инвариантом этого тензора является его след, равный $I = m\cdot c^2 - \mathbf{V}\cdot\mathbf{P}$. Уравнение закона сохранения энергии-импульса для замкнутой физической системы, при отсутствии воздействия на нее внешних сил и потерь энергии, имеет вид суммы четырехмерных дивергенций ТЭИ по каждому из его индексов или дивергенции его симметричной части по любому из индексов.

$$\partial_\beta (T_{\alpha\beta} + T^T_{\alpha\beta}) = \partial_\beta T_{(\alpha\beta)} = 0 \qquad (3)$$

Запишем это четырехмерное уравнение в развернутом виде, как систему трехмерных уравнений:

$$2\partial_t (mc^2)/c + c\nabla\cdot\mathbf{P} + c\nabla(m\cdot\mathbf{V}) = 0 \text{ или } \partial_t m + \nabla\cdot\mathbf{P} = 0 \qquad (4)$$

$$2\partial_t\mathbf{P} + \mathbf{P}(\nabla\cdot\mathbf{V}) + (\mathbf{P}\cdot\nabla)\mathbf{V} + \mathbf{V}(\nabla\cdot\mathbf{P}) + (\mathbf{V}\cdot\nabla)\mathbf{P} = 0 \qquad (5)$$

Используя известное векторное тождество и с учетом уравнения (4), уравнение (5), после простых преобразований, можно записать в эквивалентном виде:

$$2\partial_t\mathbf{P} - \mathbf{V}\cdot\partial_t m + \mathbf{P}(\nabla\cdot\mathbf{V}) + \nabla(\mathbf{V}\cdot\mathbf{P}) - \mathbf{V}\times\nabla\times\mathbf{P} - \mathbf{P}\times\nabla\times\mathbf{V} = 0 \qquad (6)$$

Уравнение (4) описывает закон сохранения плотности массы (энергии), а уравнения (5) и (6) закон сохранения плотности импульса. В уравнении (6) последние два члена описывают вихревое движение среды. В них можно ротор скорости заменить угловой скоростью вращения частиц среды. Поскольку все члены уравнения (6) представляют собой плотности сил инерции, то последние члены представляют собой описание плотности центробежной силы инерции при криволинейном движении. Если эти центробежные силы инерции перенести в правую часть уравнения, то силы, стоящие в левой части можно рассматривать как центростремительные силы инерции.

$$2\partial_t \mathbf{P} - \mathbf{V}\cdot\partial_t m + \mathbf{P}(\nabla\cdot\mathbf{V}) + \nabla(m\cdot|\mathbf{V}|^2) = \mathbf{V}\times\nabla\times\mathbf{P} + \mathbf{P}\times\nabla\times\mathbf{V} \qquad (7)$$

Центробежные силы инерции входят в уравнение (6) закона сохранения энергии-импульса и поэтому они являются реальными силами, действующими на среду в псевдоевклидовом пространстве-времени. Из уравнения (7) следует, что силы инерции зависят от скорости изменения плотности среды, скорости и ускорения ее движения. Используя известные векторные тождества уравнения (5) и (7) можно записать и в других эквивалентных вариантах.

Рассмотрим стационарный случай, когда плотность среды и ее скорость постоянны во времени. Для этого случая уравнения (4) и (7) примут вид:

$$\nabla\cdot\mathbf{P} = 0 \qquad \text{или} \qquad m\cdot\nabla\cdot\mathbf{V} + \mathbf{V}\cdot\nabla m = 0 \qquad (8)$$

$$\mathbf{P}(\nabla\cdot\mathbf{V}) + \nabla(m\cdot|\mathbf{V}|^2) = \mathbf{V}\times\nabla\times\mathbf{P} + \mathbf{P}\times\nabla\times\mathbf{V} \qquad (9)$$

С учетом уравнения (8), уравнение (9) можно записать в виде:

$$-|\mathbf{V}|^2\cdot\nabla m + \nabla(m\cdot|\mathbf{V}|^2) = \mathbf{V}\times\nabla\times\mathbf{P} + \mathbf{P}\times\nabla\times\mathbf{V} \qquad (10)$$

Окончательно получим равенство центростремительной силы и центробежных сил в виде:

$$m\cdot\nabla|\mathbf{V}|^2 = \mathbf{V}\times\nabla\times\mathbf{P} + \mathbf{P}\times\nabla\times\mathbf{V} \qquad (11)$$

Рассмотрим случай, когда плотность среды является постоянной величиной m_0. В этом случае силы инерции будут зависеть только от ускорений во времени и пространстве, а уравнения (4) и (7) примут более простой вид:

$$\nabla\cdot\mathbf{V} = 0 \qquad (12)$$

$$m_0\cdot\partial_t\mathbf{V} + \nabla(m_0\cdot|\mathbf{V}|^2/2) = m_0\cdot\mathbf{V}\times\nabla\times\mathbf{V} \qquad (13)$$

Поскольку эти уравнения описывают силы инерции, действующие на среду в любой ее выбранной точке, то они будут справедливы для любой материальной точки, имеющей массу m_0. В уравнение (13) сохранения импульса и момента импульса материальной точки в псевдоевклидовом пространстве-времени входят три силы инерции: первый член – сила

инерции Ньютона, второй член – центростремительная сила инерции, равная градиенту кинетической энергии материальной точки и третий член – центробежная сила инерции. Никаких других сил инерции для материальной точки в природе не существует, поскольку они будут противоречить закону сохранения энергии-импульса в виде системы уравнений (12) и (13). Все другие силы, вводимые для упрощения вычислений, являются фиктивными (воображаемыми). Из уравнения (13) следует, что в псевдоевклидовом пространстве-времени инерциальное движение материальной точки может быть ускоренным во времени и криволинейным в трехмерном пространстве. Таким образом, закон инерциального движения материальной точки в псевдоевклидовом пространстве-времени принципиально отличается от второго закона Ньютона в евклидовом пространстве.

При движении космических тел, например спутников Земли, в роли центростремительной силы выступает сила тяготения, равная градиенту гравитационной энергии тела $\nabla(m_0 \cdot \varphi)$, где φ – гравитационный потенциал. Из этого следует, что при инерциальном движении материальной точки в гравитационном поле градиент кинетической энергии, связанной с центростремительной силой, равен градиенту гравитационной энергии силы тяготения $\nabla(m_0 \cdot \mathbf{V}^2/2) = \nabla(m_0 \cdot \varphi)$. В общем случае уравнение инерциального движения тела в гравитационном поле с переменной скоростью можно записать в виде:

$$m_0 \cdot \partial_t \mathbf{V} + m_0 \cdot \nabla\varphi = m_0 \cdot \mathbf{V} \times \nabla \times \mathbf{V} \qquad (14)$$

Это уравнение является уравнением небесной механики в псевдоевклидовом пространстве-времени. При инерциальном криволинейном движении в гравитационном поле с переменной скоростью, например, космической станции на эллиптической орбите, сила Ньютона и центростремительная сила тяготения равны центробежной силе

инерции, что обеспечивает на станции состояние невесомости и устойчивое положение станции на орбите.

Центростремительную силу гравитационного притяжения можно записать в виде закона всемирного тяготения Ньютона:

$$\mathbf{F} = GM \cdot m_0 \cdot \mathbf{n}_R / R^2 \qquad (15)$$

M - масса центрального тела, $\mathbf{n}_R$ - орт в направлении радиус-вектора **R**. Тогда уравнение небесной механики (14) можно записать в виде:

$$m_0 \cdot \partial_t \mathbf{V} + GM \cdot m_0 \cdot \mathbf{n}_R / R^2 = m_0 \cdot \mathbf{V} \times \nabla \times \mathbf{V} \qquad (16)$$

или, сократив m_0 и выполнив простые преобразования, получим уравнение небесной механики в виде:

$$R^2 \cdot \partial_t \mathbf{V} + GM \cdot \mathbf{n}_R = R^2 \cdot \mathbf{R} \cdot |\mathbf{\Omega}|^2 \qquad (17)$$

Здесь $\mathbf{\Omega}$ - угловая скорость движения по орбите. Для стационарного приближения скорость движения планеты постоянная и сила инерции Ньютона в уравнении (16) равна нулю. При этом уравнение (17) приходит к выражению третьего закона Кеплера:

$GM \cdot \mathbf{n}_R = R^2 \cdot \mathbf{R} \cdot |\mathbf{\Omega}|^2$ или в скалярном виде

$$R^3 \cdot \Omega^2 = R^3 / T^2 = GM = const \qquad (18)$$

Здесь T – период обращения планеты. Третий закон Кеплера гласит «Отношение куба среднего расстояния планеты от Солнца к квадрату периода ее обращения вокруг Солнца есть константа для всех планет». Таким образом, уравнение небесной механики (16) является точным дифференциальным уравнением третьего закона Кеплера, учитывающим динамику движения и полученным на основе аксиоматического дедуктивного формализма. Это является подтверждением правильности уравнения (13) для сил инерции.

Взяв ротор от обеих частей уравнения (13) получим уравнение для углового ускорения, которое равно ротору центробежной силы:

$$\nabla \times (\partial_t \mathbf{V}) = \nabla \times (\mathbf{V} \times \nabla \times \mathbf{V}) \quad \text{или} \quad \partial_t \mathbf{\Omega} = \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{\Omega}) \qquad (19)$$

Применив известное векторное тождество и уравнение (12), уравнение (19) можно также записать в виде:

$$\partial_t \mathbf{\Omega} = (\mathbf{\Omega} \cdot \nabla)\mathbf{V} - (\mathbf{V} \cdot \nabla)\mathbf{\Omega} \tag{20}$$

Из нелинейных уравнений (19) и (20) следует, что в псевдоевклидовом пространстве-времени инерциальное вращательное движение может иметь угловое ускорение, что подтверждает инерциальный эффект Джанибекова в невесомости.

Взяв дивергенцию от обеих частей уравнения (14) сократив массу и, с учетом уравнения (12), получим уравнение:

$$\Delta\varphi = \nabla \cdot (\mathbf{V} \times \nabla \times \mathbf{V}) = 4\left|\mathbf{\Omega}\right|^2 \tag{21}$$

Левую часть этого уравнения можно записать в виде источника потенциального гравитационного поля, который в теории тяготения Ньютона выражается уравнением $4\pi G\rho=\Delta\varphi$ (где ρ - плотность массы, G – гравитационная постоянная). Тогда из уравнения (21) следует, что дивергенция центробежной силы эквивалентна источнику потенциального гравитационного поля, пропорциональному квадрату угловой скорости. Уравнение (21) можно записать в виде:

$$\Delta\varphi = 4\pi G\rho = 4\left|\mathbf{\Omega}\right|^2 \text{ или } \pi G\rho = \left|\mathbf{\Omega}\right|^2 \tag{22}$$

Это выражение подтверждает, что центробежная сила инерции является силой гравитации.

3 Тензор напряженностей и уравнения движения поля сил инерции

В соответствии аксиоматическим дедуктивным формализмом, показанным на рис.1, получим тензор напряженностей сил инерции в среде, в виде четырехмерной производной импульса $P_\beta(cm, i\boldsymbol{P})$:

$$F_{\alpha\beta} = \partial_\alpha P_\beta = \begin{pmatrix} \partial_t m & \frac{1}{c} i \cdot \partial_t P_x & \frac{1}{c} i \cdot \partial_t P_y & \frac{1}{c} i \cdot \partial_t P_z \\ -i \cdot c \cdot \partial_x m & \partial_x P_x & \partial_x P_y & \partial_x P_z \\ -i \cdot c \cdot \partial_y m & \partial_y P_x & \partial_y P_y & \partial_y P_z \\ -i \cdot c \cdot \partial_z m & \partial_z P_x & \partial_z P_y & \partial_z P_z \end{pmatrix} \tag{23}$$

Для получения уравнений движения среды найдем дивергенцию тензора напряженностей (23). Поскольку он является несимметричным, то его дивергенцию находим для каждого индекса и суммируем результат. Сумма тензора и транспонированного тензора второго ранга сохраняет его симметричную часть, тогда уравнение движения среды получим в виде дивергенции симметричной части тензора напряженностей:

$$\partial_\beta (F_{\alpha\beta} + F^T_{\alpha\beta}) = \partial_\beta F_{(\alpha\beta)} = 0 \qquad (24)$$

Запишем это уравнение движения трехмерном виде:

$$2\frac{1}{c}\partial_{tt} m + \frac{1}{c}\partial_t \nabla\cdot\mathbf{P} - c\Delta m = 0 \quad \text{или} \quad (\frac{1}{c^2}\partial_{tt} m - \Delta m) + \partial_t \frac{1}{c^2}(\partial_t m + \nabla\cdot\mathbf{P}) = 0 \qquad (25)$$

$$\frac{1}{c^2}\partial_{tt}\mathbf{P} - \partial_t \nabla m - \nabla(\nabla\cdot\mathbf{P}) - \Delta\mathbf{P} = 0 \quad \text{или} \quad (\frac{1}{c^2}\partial_{tt}\mathbf{P} - \Delta\mathbf{P}) - \nabla(\partial_t m + \nabla\cdot\mathbf{P}) = 0 \qquad (26)$$

Система уравнений (25), (26) описывает свободное движение идеальной упругой сплошной среды в псевдоевклидовом пространстве-времени. Умножим уравнение (25) на c^2 и для статического случая получим уравнение Лапласа для энергии $\Delta(mc^2) = 0$. Из уравнения (26) получим уравнение стационарного движения среды:

$$\nabla(\nabla\cdot\mathbf{P}) + \Delta\mathbf{P} = 0 \quad \text{или} \quad \nabla\times\nabla\times\mathbf{P} = 2\nabla(\nabla\cdot\mathbf{P}) \text{ или } \nabla\times\nabla\times\mathbf{P} = -2\Delta\mathbf{P} \qquad (27)$$

Из этого уравнения следует, что вихревое (турбулентное) движение среды является фундаментальным движением, обусловленным геометрией псевдоевклидова пространства.

Умножим уравнение (25) на c^2. Затем возьмем градиент от обеих частей уравнения (25) и производную по времени от обеих частей уравнения (26):

$$c^2\cdot\nabla(\frac{1}{c^2}\partial_{tt} m - \Delta m) + \nabla\partial_t(\partial_t m + \nabla\cdot\mathbf{P}) = 0 \qquad (28)$$

$$\partial_t(\frac{1}{c^2}\partial_{tt}\mathbf{P} - \Delta\mathbf{P})/c - \partial_t\nabla(\partial_t m + \nabla\cdot\mathbf{P}) = 0 \qquad (29)$$

Найдем сумму и разность этих уравнений и в результате получим два волновых уравнения:

$$(\frac{1}{c^2}\partial_{tt} - \Delta)[\nabla(m\cdot c^2) + \partial_t\mathbf{P}] = 0 \qquad (30)$$

$$(\frac{1}{c^2}\partial_{tt}-\Delta)[\nabla(m\cdot c^2)-\partial_t\mathbf{P}]+2\partial_t\nabla(\partial_t m+\nabla\cdot\mathbf{P})=0 \qquad (31)$$

Уравнения (30) и (31) описывают волны плотности сил инерции, которые могут возбуждаться и существовать в сплошной упругой среде. Поскольку силы инерции эквивалентны силам гравитации, то эти уравнения можно считать уравнениями гравитационных волн. С помощью аксиоматического дедуктивного формализма электродинамики для электромагнитного поля [2] были получены структурно аналогичные волновые уравнения векторных поперечных, векторных поперечно-продольных и скалярных продольных волн электромагнитного поля. По этой аналогии гравитационные волны, описываемые уравнением (30) соответствуют векторным поперечным волнам. Гравитационные волны, описываемые уравнением (31), соответствуют векторным поперечно-продольным волнам.

Возьмем производную по времени уравнения (25) и дивергенцию уравнения (26):

$$\partial_t(\frac{1}{c^2}\partial_{tt}m-\Delta m)+\partial_t\partial_t\frac{1}{c^2}(\partial_t m+\nabla\cdot\mathbf{P})=0 \qquad (32)$$

$$\nabla\cdot(\frac{1}{c^2}\partial_{tt}\mathbf{P}-\Delta\mathbf{P})-\nabla\cdot(\nabla(\partial_t m+\nabla\cdot\mathbf{P}))=0 \qquad (33)$$

и, найдя их сумму, получим скалярное волновое уравнение:

$$(\frac{1}{c^2}\partial_{tt}-\Delta)(\partial_t m+\nabla\cdot\mathbf{P})=0 \qquad (34)$$

Тривиальным решением этого скалярного волнового уравнения является уравнение неразрывности Эйлера $\partial_t m+\nabla\cdot\mathbf{P}=0$. Еще один вид волнового уравнения получим, взяв ротор уравнения (30) или (31):

$$\frac{1}{c^2}\partial_{tt}\nabla\times\partial_t\mathbf{P}-\Delta\nabla\times\partial_t\mathbf{P}=0 \qquad (35)$$

Из волновых уравнений (30), (31), (34), (35) следует возможность существования в сплошной среде четырех видов волн сил инерции или гравитационных волн.

Для материальной точки волновые уравнения для сил инерции имеют более простой вид. Поскольку массу из этих уравнений можно исключить, то их можно считать геометрическими и существующими в свободном пространстве:

$$\frac{1}{c^2}\partial_{tt}\partial_t \mathbf{V} - \Delta\partial_t \mathbf{V} = 0 \qquad (36)$$

Взяв ротор этого уравнения, получим:

$$\frac{1}{c^2}\partial_{tt}\nabla\times\partial_t \mathbf{V} - \Delta\nabla\times\partial_t \mathbf{V} = 0 \qquad (37)$$

Из уравнений (36) и (37) следует, что в свободном пространстве существуют два вида векторных гравитационных волн: векторные поперечные и векторные вихревые волны (волны кручения).

4. Заключение

В аксиоматическом дедуктивном формализме истинность выводов гарантирована их логической и математической выводимостью из аксиом теории, следовательно, уравнения (4) – (6), (13), (14), (16), (17), (19) - (22), (25) - (27), (30), (31), (34) - (37) и вытекающие из них физические выводы можно считать истинами, если истинами являются исходные аксиомы. Однако уравнения (14), (16) дополнительно подтверждаются выводом из них третьего закона Кеплера, а уравнения (13), (19), (20) подтверждаются эффектом Джанибекова в невесомости. Эти экспериментальные подтверждения теоретических выводов формализма, автоматически подтверждают и правильность его исходных аксиом. Новое уравнение небесной механики (14) возможно поможет получить аналитическое объяснение динамической устойчивости планетарных орбит. Теоретический вывод, следующий из уравнения (27) о вихревом движении

среды, как фундаментальном движении, объясняет причину возникновения турбулентности в среде. Из уравнения (21) следует вывод о том, что дивергенция центробежной силы эквивалентна источнику потенциального гравитационного поля. Учет этого дополнительно гравитационного поля в небесной механике, возникающего при вращении, возможно, поможет в объяснении закономерности расположения орбит планет, т.е. правила Тициуса-Боде.

В соответствии с уравнениями (30), (31), (34), (35) в сплошной среде могут существовать четыре типа распространяющихся со скоростью света гравитационных волн, в том числе скалярные продольные волны. Тривиальным решением уравнения скалярных продольных волн является уравнение Эйлера неразрывности среды. В свободном псевдоевклидовом пространстве могут существовать только два типа поперечных гравитационных волн (36), (37), в том числе волны кручения.

Аксиоматический дедуктивный формализм механики в псевдоевклидовом пространстве-времени показал, что силы инерции являются реальными силами гравитации и входят в закон сохранения энергии-импульса.

Список литературы / References

1 *Логунов А.А.* Анри Пуанкаре и теория относительности М.: Наука, 2004. 255 с.

2 *Спиричев Ю.А.* Дедуктивный формализм электродинамики. Часть1. «Научный журнал» №3 (78). 2026. PROBLEMS OF SCIENCE [Электронный ресурс]. URL: https://doi.org/10.24411/2413-7081-2026-10301 (Дата обращения: 01.10.2026).

3 *Ишлинский А.Ю.* Классическая механика и силы инерции М.: Наука, 1987. 320 с.

4 The MICROSCOPE mission: first results of a space test of the Equivalence Principle arXiv:1712.01176 [astro-ph.IM] [Электронный ресурс]. 2017. URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.1712.01176 (Дата обращения: 01.10.2026).

5 *Нётер Э.* Инвариантные вариационные задачи // Вариационные принципы механики. Сборник статей Л С Полак, М.: Наука, 1959. С. 611-630.

6 *Ландау Л Д, Лифшиц Е.М.* Теория поля М.: Наука, 1973. 504 с.