

# СИСТЕМЫ ОТСЧЁТА В РЕЛЯТИВИСТСКОЙ МЕХАНИКЕ

---

*Халецкий Михаил Борисович*

*Израиль, г. Хадера, 2023 г.*

*тл. +972 523298930 , (0523298930)*

## АННОТАЦИЯ

Характеристика подвижных систем отсчёта в СТО (*Специальная теория относительности*). Альтернативные системы отсчёта и основные принципы относительности в ЭТО (*Элементарная теория относительности*).

**Ключевые слова:** системы отсчёта (СО); движение; принципы.

## Содержание

- П.1 Подвижные системы отсчёта
- П.2 Альтернативные системы отсчёта
  - П.2.1 Относительная скорость и импульсы
  - П.2.2 Размерные постоянные
  - П.2.3 Обобщённый импульс и кинетическая энергия
  - П.2.4 Принцип относительности
  - П.2.5 Равноправие систем отсчёта

## П.1 Подвижные системы отсчёта.

В физике всегда существовала проблема решения механических задач, когда происходит сложное движение материальной точки относительно тела отсчёта. Для упрощения таких задач Галилей предложил разделять сложное движение на ряд простых с использованием понятия *подвижных систем отсчёта*. Этот метод действительно работает в классической механике и работает очень хорошо. В основе метода лежит равенство единиц измерений во всех системах отсчёта (СО) и принцип: **все законы динамики одинаковы во всех инерциальных системах отсчёта (ИСО)**. Относительность движения определяется основным уравнением для одномерного случая:

$$x' = x - vt ,$$

где:

$x$  — абсцисса точки в неподвижной ИСО;

$x'$  — абсцисса точки в подвижной ИСО;

$v$  — скорость равномерного движения координат подвижной ИСО относительно неподвижной ИСО;

$t$  — время движения одинаковое для обеих ИСО.

Стандартные преобразования координат из подвижной системы в неподвижную позволяют рассчитать кривую движения практически любой сложности и определить параметры движения точки относительно тела отсчёта в неподвижной ИСО. Основной проблемой относительности по Галилею является правильный выбор неподвижной ИСО, связанной с телом отсчёта и подвижной ИСО, связанной с материальной точкой. Чтобы решить эту проблему надо ответить на вопрос, чем физическая система координат отличается от геометрической и почему у подвижных координат отсутствует собственное тело отсчёта.

Эйнштейн в 1905 г., создавая свою теорию относительности, двигался тем-же путём. Использовал подвижные геометрические координаты. Однако он изначально положил в основу теории принцип постоянства скорости света в любых системах отсчёта независимо от собственных единиц измерений, а принцип Галилея распространил на все физические процессы без исключения. Принцип постоянства скорости света сразу создал проблему синхронизации часов в разных ИСО и оценки одновременности происходящих в них событий. В результате анализа исходного уравнения Галилея, путём хитроумных размышлений и математических выкладок, Эйнштейн показывает, что для скоростей близких к скорости света исходное уравнение некорректно и между  $x'$  и  $x$  должна существовать передаточная функция. Значение функции зависит от скорости движения координат подвижной системы в неподвижной ИСО. Он активно использует понятие наблюдателей (подвижного и неподвижного) которые оценивают одновременность событий в разных ИСО по собственным часам. На наблюдателей не накладываются

никакие ограничения, отношение к ним свободное, используются для мысленных экспериментов и синхронизации часов. Изначально Эйнштейн анализировал изменение длины движущегося стержня вдоль оси  $x$ , а затем распространил полученные результаты на время и координаты всего движущегося пространства. В конечном итоге - Эйнштейн подтвердил преобразования Лоренца вдоль траектории движения (оригинальный вид)[6]:

$$\tau = \beta \left( t - \frac{v}{c^2} x \right); \quad \beta^{-1} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

$$\xi = \beta(x - vt);$$

$$\eta = y;$$

$$\zeta = z;$$

Где:

$\tau$  – время в подвижной ИСО ;       $\xi$  – абсцисса в подвижной ИСО ;  
 $\eta$  – ордината в подвижной ИСО ;       $\zeta$  – аппликата в подвижной ИСО ;

$V$  – скорость света,  $c = 30 * 10^7 \text{ m/s}$  .

В исходной неподвижной ИСО длина стержня постоянна и не зависит от положения в собственных координатах. В подвижной ИСО, когда её скорость движения близка к скорости света, поднятый вертикально стержень меняет свою длину в зависимости от угла подъёма. Масштабы длины вдоль траектории движения и в поперечном направлении разные. Явно нарушается симметрия подвижного пространства. Равенства  $\eta = y$  и  $\zeta = z$  для ненулевых значений вызывают сомнения.

Галилей, предлагал подвижные системы отсчёта как математический метод и не утверждал их реального существования. Возможно - подвижные ИСО, как самостоятельные пространства, не могут существовать в принципе. Так река не существует без Земли, самолёт без воздуха, корабль без воды, автомобиль без дороги, и т. п. За неподвижную ИСО всегда выбирается конкретное тело отсчёта, конкретная система координат и постоянные эталоны мер. Такая система отсчёта имеет локальный характер и принимается за **абсолютную**. Возможно, подвижные ИСО существуют только методологически, в рамках неподвижной системы. Как самостоятельные пространства они должны иметь собственное тело отсчёта определённой массы.

Метод подвижных систем отсчёта в **релятивистской** механике, это общий случай сложных физических представлений человека о пространстве и времени. Сложность представлений приводит к множеству парадоксов (Эренфеста, Белла, близнецов астронавтов, шеста и сарая и т. п.) Приведём самый простой из парадоксов шеста и сарая. Когда шест намного длиннее сарая в состоянии покоя, двигаясь на скорости близкой к скорости света, помещается в покоящийся сарай. Возможно, автор настоящей статьи чего-

то не понимает или казуистика мышления отказывает ему, но на первый взгляд всё кажется ненормальным. Как шест, **без обратных преобразований** пространства и времени, из подвижной ИСО попадает в неподвижную и помещается в сарай, непонятно. Надо полагать, что этому процессу помогают наблюдатели подвижной ИСО и синхронизируют свои часы, обеспечивая одновременность событий на концах шеста. Но тогда в неподвижной системе шест должен быть резиновым, а скорость её сжатия должна превышать скорость света. Возможно, сарай и шест всегда **находились в разных ИСО и несовместимы**. Автор статьи не намерен детально разбираться в парадоксах теории. По его мнению, с относительностью представлений люди встречаются постоянно в физике, технике и бытовой жизни. Относительность не требует доказательств. Гениальность Эйнштейна заключается в том, что он сумел поднять относительность представлений о разных событиях до уровня теоретической физики.

## П.2 Альтернативные системы отсчёта.

Дополнением к СТО может являться Элементарная Теория Относительности (ЭТО), статья в интернете от 8 мая 2018г. [Элементарная теория относительности (ЭТО) - Михаил Халецкий; <https://halmich.ru> ]. Теория выглядит просто в плане математического аппарата, но далека от совершенства. Требуется серьёзная доработка и шлифовка теории с позиций современных научных определений. Однако основы теории заложены правильно. В ЭТО, задаются две неподвижные **альтернативные** системы отсчёта: основная (лабораторная) и параллельная. Параллельная СО выступает как математическая модель симметричного пространства основной СО и отличается от последней масштабами измерений. Преобразования Галилея **на малых скоростях движения** можно трактовать как взаимный сдвиг координат и начала отсчёта времени в параллельной системе отсчёта.

$$x - x' = vt$$

Здесь:  $x$  — абсцисса точки в координатах основной ИСО;

$x'$  — сдвиг начала координат параллельной ИСО;

В ЭТО рассматривается общий случай: собственные системы отсчёта **неподвижны** относительно друг друга; координатные оси и центры координат совпадают. Каждая система представлена собственными эталонами длины, времени, массы и подвижной материальной точкой. Действует соглашение: — **альтернативные материальные точки, имея разные масштабы измерений, всегда совпадают в абсолютном пространстве единой системы отсчёта**. В состоянии ускоренного движения точки участвуют в относительном силовом взаимодействии. В ЭТО определяются соотношения единиц измерений и параметров точек, когда их собственные скорости сравнимы со скоростью света. Единицы измерения длины не зависят от направления в пространстве, пространственные углы инварианты. Значит, единичные векторы перемещения могут

раскладываться по ортогональному базису как в классической механике. В отдельной статье выводятся одномерные преобразования Лоренца для событий, разобщённых в пространстве и времени [1]. В этих преобразованиях координаты и время относятся к разным точкам, их нельзя путать между собой. **Прямые и обратные преобразования координат связаны математическим формализмом и не отображают физической разницы происходящих событий.** Следует отметить ещё раз, неподвижные ИСО не допускают произвольного отрыва системы координат от тела отсчёта.

### П.2.1 Относительная скорость и импульсы

В основе теории лежит **обобщённая** относительная скорость взаимодействия связанных альтернативных точек —  $\Delta$ . Понимание относительной скорости в ЭТО принципиально отличается от классической разницы скоростей. Относительная скорость **направленна поперёк движения** и по модулю равна:

$$|\vec{\Delta}| = \frac{v_1 t_1}{t_0} = \frac{v_0 t_0}{t_1}$$

Где:

$v_0, v_1$  — собственные скорости альтернативных точек в основной и параллельной ИСО вдоль траектории движения;

$t_0, t_1$  — собственное время в основной и параллельной ИСО.

Для практических целей используется **собственная относительная скорость** в параллельной ИСО  $\Delta_1 = v_0 / \sqrt{1 + v_0^2/c^2}$ . Различие между обобщённой и собственной относительной скоростью раскрывается в основной статье [2]. Вводится принцип обмена силовыми импульсами вдоль траектории движения:

**Силовой импульс из соседней системы отсчёта должен уравниваться соответствующим изменением количества движения материальной точки в собственной системе отсчёта.**

При **нулевых** начальных условиях и **неравноправии** систем отсчёта запись этого принципа (одномерный случай) выглядит следующим образом:

$$m_1 v_1 = F_{\tau 0} t_0 = m_1 \Delta ;$$

$$m_0 v_0 = F_{\tau 1} t_1 ;$$

$$F_{\tau 1} = F_{\tau 0} \quad (\text{третий закон Ньютона}).$$

Где:

$m_0, m_1$  — собственные массы точек в основной и параллельной ИСО;

$F_{\tau 0}, F_{\tau 1}$  — относительные силы взаимодействия точек из противоположных ИСО.

В такой записи **относительные** силы не равны **внешним** силам Ньютона, этот момент так же отражён в основной статье. Относительность в ЭТО понимается в прямом смысле, как отношение однородных параметров из разных систем отсчёта. Поле скоростей параллельной системы **существенно меньше** поля скоростей основной. Положим: нижний индекс "0" — вариант основной ИСО ( $x_0, y_0, z_0, t_0$ ); "1" — вариант параллельной ИСО ( $x_1, y_1, z_1, t_1$ ). Тогда скорости точек вдоль траектории движения связаны соотношением:

$$v_1 = v_0 \left(1 - \frac{\Delta_1^2}{c^2}\right) = v_0 / \left(1 + \frac{v_0^2}{c^2}\right)$$

Эта особенность позволяет решать задачи релятивистской механики в параллельной системе методами классической физики, а полученные результаты возвращать в исходную ИСО. **Преобразованиям в ЭТО подвергают только замкнутую механическую систему взаимно действующих тел, а не всё пространство в целом.** Это существенный момент теории, иначе возврат в исходную ИСО, по другой относительной скорости, невозможен. Если скорость  $v_0$  имеет компоненты по осям координат ( $v_{0x}, v_{0y}, v_{0z}$ ), то в параллельной системе отсчёта эти компоненты равны:

$$v_{1x} = v_{0x} / \left(1 + \frac{v_0^2}{c^2}\right); \quad v_{1y} = v_{0y} / \left(1 + \frac{v_0^2}{c^2}\right); \quad v_{1z} = v_{0z} / \left(1 + \frac{v_0^2}{c^2}\right).$$

## П.2.2 Размерные постоянные

Массовая точка ( $m_0$ ) с действующей скоростью ( $v_0$ ) является центром пространственного подобия при описании альтернативной точки в параллельной ИСО. Теории СТО и ЭТО описывают относительное движение отдельных материальных точек. Однако для группы взаимодействующих **не альтернативных** точек,двигающихся с разными скоростями в основной ИСО, возникает неопределённость в выборе параллельной системы отсчёта. Неопределённость усиливается, когда надо использовать размерные физические константы. Их необходимо масштабировать, прежде чем переходить в параллельную ИСО. Возникает вопрос, как масштабировать. Задачу можно решить через базовые соотношения параметров (ВЕРСИЯ – ЭТО)[2].

$$1. \quad l_1 t_1 = l_0 t_0;$$

$$2. \quad m_1 l_1 = m_0 l_0;$$

$$3. \quad m_0 t_1 = m_1 t_0;$$

$$4. \quad \frac{m_1^2 l_1}{t_1} = \frac{m_0^2 l_0}{t_0};$$

$$5. m_1^2 v_1 = m_0^2 v_0 .$$

$$6. f_1 t_1 = f_0 t_0$$

Определим скорость света в параллельной ИСО через единицы основной ИСО. Из соотношений  $m_1^2 v_1 = m_0^2 v_0$  и  $c_0 = c \approx 30 \cdot 10^7 \text{ m/s}$  следует:

$$c_1 = c \left(1 + \frac{v_0^2}{c^2}\right)^{-1} \left\langle \frac{m_0}{s_0} \right\rangle$$

Удельная плотность материи в параллельной ИСО в единицах основной ИСО. Из соотношений  $l_1 t_1 = l_0 t_0$ ,  $m_1 l_1 = m_0 l_0$  следует:

$$\left(\frac{m_1}{l_1^3}\right) \frac{l_1}{t_1^3} = \left(\frac{m_0}{l_0^3}\right) \frac{l_0}{t_0^3} .$$

Выражения в скобках соответствуют удельной плотности материи  $(\rho_1, \rho_0)$  при постоянной температуре. Учитывая формулы связи основных параметров [2],  $l_1 = l_0 / \sqrt{1 + v_0^2/c^2}$ ,  $t_1 = t_0 \sqrt{1 + v_0^2/c^2}$  получаем:

$$\rho_1 = \rho_0 \left(1 + \frac{v_0^2}{c^2}\right)^2 \frac{kg_0}{m_0^3} .$$

Здесь автор допускает лукавство. Считает, что температура одиночной точки не является основным параметром. Для группы точек или материального тела это неправильно, надо определяться с соотношением температур. Однако основная задача статьи, показать метод передачи физических констант из основной ИСО в параллельную через базовые соотношения. В качестве более сложного примера определим постоянную Планка в параллельной системе отсчёта. Релятивистская компонента полной кинетической энергии точки равна [2]:

$$E_{r0} = m_0 c_0^2 - \frac{m_0 c_0^2}{\sqrt{1 + \frac{v_0^2}{c_0^2}}} = h_0 v_0 ; \quad \text{основная ИСО}$$

$$E_{r1} = m_1 c_1^2 - \frac{m_1 c_1^2}{\sqrt{1 + \frac{v_1^2}{c_1^2}}} = h_1 v_1 . \quad \text{параллельная ИСО}$$

Учтём, что основная ИСО является лабораторной системой отсчёта. Тогда,  $h_0 = h$ ,  $c_0 = c$ . Формулы связи скоростей и масс:  $v_0/c_0 = v_1/c_1$ ;  $m_0^2 v_0 = m_1^2 v_1$ . Соотношение релятивистских компонент равно:

$$E_{r1} = E_{r0} \left(1 + \frac{v_0^2}{c^2}\right)^{-\frac{3}{2}} .$$

Релятивистская компонента кинетической энергии (собственное вращение точки) равна кванту излучаемой энергии [3]. Частота собственного вращения точки прямо пропорциональна частоте излучения,  $f \propto \nu$ . Выражение для постоянной Планка в параллельной ИСО, с учётом базового соотношения  $f_1 t_1 = f_0 t_0$  и преобразований времени, запишется следующим образом:

$$h_1 \nu_1 = E_{r1};$$

$$h \nu_0 = E_{r0};$$

$$h_1 = h \left(1 + \frac{v_0^2}{c^2}\right)^{-1} J_0 s_0, \left\langle \frac{kg_0 m_0^2}{s_0} \right\rangle.$$

Постоянная тонкой структуры в атомной физике не имеет размерности, следовательно:

$$\alpha_1 = \alpha_0 = \alpha.$$

Тело отсчёта координат в основной ИСО имеет постоянную массу  $M_0 = const$ . Каждому значению скорости  $v_0$  в основной ИСО соответствует своя параллельная система отсчёта. Требуется найти массу собственного тела отсчёта координат в параллельной ИСО.

Используем основной принцип относительности ЭТО и формулу  $m_1 = m_0 \sqrt{1 + v_0^2/c^2}$ :

$$\frac{m_1}{M_1} = \frac{m_0}{M_0};$$

$$M_1 = M_0 \frac{m_1}{m_0} = M_0 \sqrt{1 + \frac{v_0^2}{c^2}} kg_0.$$

### П.2.3 Обобщённый импульс и кинетическая энергия

Кинетическая энергия материальной точки в основной ИСО определяется через обобщённый механический импульс в алгебраической форме:

$$p_i = m_i v_i + \frac{m_i v_i}{\sqrt{1 + \frac{v_i^2}{c^2}}}.$$

**Каждому значению скорости точки в основной ИСО соответствует своя параллельная система отсчёта.** Для группы точек суммировать обобщённые импульсы по разным системам отсчёта большая проблема. Точки надо рассматривать или попарно меняя каждый раз системы отсчёта, или найти приемлемый вариант анализа в основной ИСО. Приемлемым вариантом в основной ИСО считается закон **сохранения геометрической суммы механических импульсов в векторной форме**,  $\sum \vec{p}_i = const$ . На комплексной плоскости, для пучка **когерентных** частиц, двигающихся **в одном направлении**:

$$\sum_i \vec{p}_i = \sum_i m_i v_i + j \sum_i \frac{m_i v_i}{\sqrt{1 + \frac{v_i^2}{c^2}}};$$

$$\sum_i \vec{p}_i = \sum_i p_{si} + j \sum_i p_{ri}.$$

Когерентность понимается как одинаковые направления вращения частиц относительно вектора собственной линейной скорости. Полная энергия движения группы **когерентных** частиц в замкнутой механической системе остаётся неизменной величиной:

$$\sum E_{ki} = \sum_i \frac{m_i v_i^2}{2} + \sum_i \left( m_i c^2 - \frac{m_i c^2}{\sqrt{1 - \frac{v_i^2}{c^2}}} \right);$$

$$\sum_i E_{ki} = \sum_i E_{si} + \sum_i E_{ri}$$

Общий случай движения и столкновения различных по когерентности частиц в данной статье не рассматривается [2, 5].

#### П.2.4 Принцип относительности.

**Под относительным движением понимается движение в параллельной системе отсчёта.** Чтобы правильно использовать приведённые выше уравнения, необходимо озвучить главный принцип относительности ЭТО.

***В безразмерных (относительных) единицах, любые физические процессы протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчёта.***

Фактически это означает, что распределение текущих параметров между собой не меняется при переходе замкнутой механической системы из одной ИСО в другую. Система отсчёта, в которой измерена скорость света и установлены единицы измерений принимается за основную (лабораторную) ИСО.

#### П.2.5 Равноправие систем отсчёта

Две противоположные системы отсчёта равноправны до тех пор, пока одна из них не принимается за основную. Вторая система остаётся параллельной и заимствует свои масштабы измерений у основной СО через соответствующие преобразования. Это ещё не означает полной отмены равноправия систем отсчёта, но определённые различия появляются. По этой причине производная времени параллельной СО по времени основной СО существует полная. В обратном порядке существует только частная производная. Из общих преобразований координат по Лоренцу возникает возможность

конфликта систем отсчёта. Параллельная СО стремится заместить основную и изменить свой статус.

**Прямое преобразование времени без сдвига координат** ( $c_0 = c$ ):

$$t_1 = t_0 \left(1 + \frac{v_0^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

Полный дифференциал функции  $t_1$  по  $t_0$ :

$$dt_1 = \left(1 + \frac{v_0^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}} dt_0 + \frac{v_0 t_0 a_{\tau 0}}{c^2} \left(1 + \frac{v_0^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} dt_0;$$

$a_{\tau 0}$  — линейное ускорение.

Для равномерного движения ( $a_{\tau 0} = 0$ ):

$$\frac{dt_1}{dt_0} = \left(1 + \frac{v_0^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}};$$

**Обратное преобразование времени без сдвига координат:**

$$t_0 = t_1 \left(1 + \frac{v_0^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

При любом виде движения,  $t_0$  не зависит от  $v_0$ :

$$\frac{\partial t_0}{\partial t_1} = \left(1 + \frac{v_0^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}.$$

**Равноускоренное движение без сдвига координат,  $a_{\tau 0} \neq 0$ :**

$$\frac{dt_1}{dt_0} * \frac{\partial t_0}{\partial t_1} \neq 1.$$

**Равномерное движение без сдвига координат,  $a_{\tau 0} = 0$ :**

$$\frac{dt_1}{dt_0} * \frac{\partial t_0}{\partial t_1} = 1.$$

Последнее соотношение означает равноправие инерциальных систем отсчёта. Чтобы системы стали равноправными надо остановить ускорение в основной ИСО. Измерить скорость света в параллельной ИСО и ввести новую метрику. Должна произойти смена статусов систем отсчёта. Из главного принципа относительности следует:

$$\frac{v_0}{c_0} = \frac{v_1}{c_1} \Rightarrow \left(1 + \frac{v_0^2}{c_0^2}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(1 + \frac{v_1^2}{c_1^2}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

Координаты не альтернативных событий, *разобцённых в пространстве и времени*, связывают с преобразованиями Лоренца (основная статья). В СТО и ЭТО эти преобразования имеют разную интерпретацию. Однако, при любой интерпретации равномерного движения, делить координату пространства на координату времени и называть результат собственной линейной скоростью, в данных преобразованиях сомнительно. Существует возможность, что одно физическое событие подменяется другим, а все недоразумения списываются на системы отсчёта. Скорость точки в любой ИСО должна определяться на основании полного понимания причинно-следственных связей между событиями. По мнению автора, преобразования Лоренца отражают информационную связь между событиями, а не сам физический процесс перехода из системы в систему. Подробный вывод преобразований Лоренца и их интерпретацию смотреть на сайте: Элементарная теория относительности (ЭТО) – Михаил Халецкий ( <https://halmich.ru> ).

## Заключение

Инерциальные системы отсчёта, это удобные и полезные математические модели реального движения **массовых тел** в пространстве и времени. Они позволяют выявить особенности движения частиц на скоростях близких к скорости света. В моделях обязаны выполняться все три закона Ньютона. Игнорировать в СТО третий закон Ньютона (*сила действия равна силе противодействия*) недопустимо.

От автора: заранее благодарен всем, кто прочитал данную статью и оставил свои комментарии к ней на главной странице сайта.

## Источники

1. Халецкий М. Б., Преобразования Лоренца (ВЕРСИЯ - ЭТО), <https://halmich.ru> , 2022г.
2. Халецкий М. Б., ВЕРСИЯ Элементарной теории относительности (ВЕРСИЯ – ЭТО), <https://halmich.ru> ., 2022г.
3. Халецкий М. Б., Размер свободного электрона, 24 окт. 2021г., Публикации., ( <https://halmich.ru> ).
4. Журнал «ДНА», №56, под редакцией С.И Хмельник., 2022г., ВЕРСИЯ Элементарной теории относительности. ( [publisherdna@gmail.com](mailto:publisherdna@gmail.com) ).
5. Халецкий М. Б., Тормозное излучение и квантовая механика электрона, 2020г., <https://halmich.ru/wp-content/uploads/2020/10/%D0%A2%D0%9E%D0%A0%D0%9C%D0%9E%D0%97%D0%9D%D0%9E%D0%95-%D0%98%D0%97%D0%9B%D0%A3%D0%A7%D0%95%D0%9D%D0%98%D0%95.pdf>

Б. А. Эйнштейн. К ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ ДВИЖУЩИХСЯ ТЕЛ. interstellar – flight.  
ru/03/kedt.pdf 15 февраля 2010. ( <http://path-2.narod.ru/02/03/kedt.pdf> ).