

Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана

А.С. Чуев

Компьютерный лабораторный практикум М-109

**Изучение законов механики в системном представлении**

*Учебное пособие по лабораторному практикуму  
для студентов первого курса*

Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана

2022

УДК 53.02; 530.1

ББК

Ч

Рецензент:

Чуев А.С. Изучение законов механики в системном представлении.  
Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – ... с.

Изложены основные сведения о размерностях физических величин в системе единиц СИ и системном представлении большинства величин на основе многоуровневого размещения их на базовой матрице с  $LT$ - размерностным выражением этих же величин. В размерностной системе физических величин, как и известной системе химических элементов, действует системное правило – местоположение системного элемента определяет его свойства. Более того, в физической системе обнаружилось еще одно замечательное свойство – оказалось, что определенным образом выделенные физические величины, образующие геометрически правильные фигуры (параллелограммы), своими системными связями одновременно выражают и физические закономерности. Учебное пособие знакомит студентов с системой физических величин и закономерностей, впервые разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Данное пособие предназначена для начального ознакомления с системой ФВиЗ и содержит только механические величины, подразделяемые на два кластера с кинематическими и динамическими величинами.

Для студентов первого курса МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Илл. 7 Библиогр. 4 назв.

*Методическое издание*

**Анатолий Степанович Чуев**

Изучение законов механики в системном представлении

Редактор  
Корректор  
Компьютерная верстка

## Вводная часть

*В физике... нет места для путаных мыслей...  
Действительно понимающие природу того или  
иного явления должны получать основные законы  
из соображений размерности.*

Энрико Ферми

Все физические величины (ФВ) определённым образом связаны друг с другом и составляют неизвестную нам в целом глобальную систему природных закономерностей. Это положение признается большинством ученых и исследователей природы.

Постижение всей совокупности природных взаимосвязей вряд ли доступно человечеству - даже в отдаленной исторической перспективе. Однако физическую сущность и определенную системность в закономерных взаимосвязях (соотношениях) известных нам на сегодня ФВ можно постичь уже сегодня, применяя системный размерностный анализ, то есть изучая используемые размерности ФВ и их соотношения, многие из которых выражают природные закономерности.

Обнаружение системности в расположении и взаимосвязях ФВ по аналогии с системой химических элементов Д.И. Менделеева позволяет многое. Во-первых, позволяет уточнить характер или принцип строения структуры и взаимосвязей системных элементов. Во-вторых, правильная расстановка элементов системы позволяет выявить «белые пятна» и целенаправленно искать недостающие элементы системы. В-третьих, исходя из общих свойств системы, имеется возможность априори выявлять некоторые характерные свойства и признаки этих, еще не обнаруженных элементов, поскольку их свойства, как правило, определяются местоположением в системе. И, самое примечательное, что подтверждено на практике, правильно найденная система ФВ содержит в себе и систему природных закономерностей.

Систему ФВ, подобную системе химических элементов пытались создать или открыть многие, но в определенной степени это удалось достичь Р.Л. Бартини - известному советскому авиаконструктору, который создал первую в истории *LT*-размерностную систему величин. Чтобы понять эти первые шаги, сделанные в системном представлении ФВ, вначале следует познакомиться с тем, что такое размерности физических величин и каковы бывают их разновидности.

## Цель лабораторного практикума

Целью данного лабораторного практикума является начальное изучение студентами единиц измерения и размерностей физических величин (ФВ), достижение понимания студентами системности, как самих величин, так и закономерных взаимосвязей между ними. Студенты изучают размерности механических ФВ в системах СИ и ЛТ. На основе сравнения отличий размерностей ФВ указанных двух систем, обнаруживают структурное деление механических величин на две системные группы или два системных кластера.

Исходя из топологии размещения размерностей ФВ обнаруживаются системные закономерности в природных закономерных взаимосвязях самих ФВ. При выполнении практикума приобретает умение работы со специализированной компьютерной программой и навыки пользования планарными (плоскими) изображениями системы физических величин и закономерностей (ФВиЗ). Лабораторный практикум призван способствовать закреплению теоретических знаний, приобретаемых на лекциях и при работе с литературными источниками.

## Основная часть

### *Физические величины и их размерности*

Под физической величиной понимают качественную характеристику того или иного физического объекта материального мира, существующую как бы сама по себе (например, *время* и *пространство*) или встречающуюся во множестве объектов и явлений, обладающую способностью к количественной определенности через принятую для нее единицу измерения.

Наряду с единицами измерения, используют понятие размерности величин. Размерность ФВ – одна из важнейших её характеристик, которая определяется как буквенное выражение, показывающее связь данной величины с величинами, принятыми за основные в рассматриваемой системе единиц.

*Основные величины* – это такие величины, единицы измерения которых, могут устанавливаться произвольными по численному значению. Например, в Международной системе единиц (СИ) единицей *длины* принят метр, а единицей *массы* килограмм. В другой, на сегодня устаревшей системе единиц СГС, единицей *длины* принят сантиметр, а единицей *массы* грамм. Единица *времени* для этих систем единиц принята одинаковой, это секунда.

Число основных величин в любой системе единиц строго определенное. Так, система СИ содержит семь основных системных величин, обозначаемых в уравнениях связи (физических формулах) буквами:  $l$ ,  $m$ ,  $t$ ,  $I$ ,  $T$ ,  $v$  и  $J$ , где  $l$  – длина,  $m$  – масса,  $t$  – время,  $I$  – сила

электрического тока,  $T$  – термодинамическая температура,  $\nu$  – количество вещества,  $J$  – сила света.

Для обозначения размерности основных величин системы СИ приняты большие буквы латинского алфавита: для *длины* –  $L$ , *массы* –  $M$ , *времени* –  $T$ , *силы электрического тока* –  $I$ , *термодинамической температуры* –  $\Theta$ , *количества вещества* –  $N$  и *силы света* –  $J$ . Размерности записывают прописными буквами и печатают прямым шрифтом. Кроме основных величин в системе СИ имеются две дополнительные величины: *плоский угол* и *телесный угол*. Единицами их измерения установлены радиан (рад) истерадиан (ср), они признаются безразмерными (табл.1).

Табл.1. Основные и дополнительные величины системы СИ.

№	Наименование ФВ	Обозн.	Ед. измерения	Обозн. ед. измер.	Размерность
1	Длина	$l$	метр	м	$L$
2	Масса	$m$	килограмм	кг	$M$
3	Время	$t$	секунда	с	$T$
4	Сила электрического тока	$I$	ампер	А	$I$
5	Термодинамическая температура	$T$	кельвин	К	$\Theta$
6	Количество вещества	$n, \nu$	моль	моль	$N$
7	Сила света	$J$	кандела	кд	$J$
8*	Плоский угол	$\alpha, \beta, \gamma, \theta, \nu, \varphi$	радиан	рад	1
9*	Телесный угол	$\omega, \Omega$	стерадиан	ср	1

Размерность любой величины  $x$  обозначается через  $\dim x$ . Например,  $\dim l = L$ ,  $\dim t = T$ ,  $\dim m = M$ . Над размерностями величин, как и над самими величинами, можно производить действия умножения, деления, возведения в степень и извлечения корня.

Все величины, не входящие в основные, называются *производными*. Единицы измерения производных физических величин устанавливаются строго определенным образом – по так называемым уравнениям связи. Например, *скорость* есть путь (*длина*), деленный на *время*. Уравнение связи для скорости:  $v = l/t$ . Поскольку *длина* и *время* входят в основные величины и их единицы измерения уже установлены, то единицей измерения *скорости* в системе СИ будет  $1\text{ м/с}$ , а в системе СГС  $1\text{ см/с}$  и никак не иначе. Размерности всех производных величин по форме представляют собой одночлен из обозначения размерности основных величин, имеющих определенные степени. Обозначение степени 1 в

размерностях не показывают. Например, размерность скорости имеет вид  $LT^{-1}$ , размерность силы -  $MLT^{-2}$ . Показатель степени, в которую возведена размерность основной величины, входящей в степенной одночлен, называют *показателем размерности*. Примеры обозначения в СИ размерностей других наиболее часто используемых величин приведены в табл. 2.

Табл. 2. Наиболее широко используемые механические физические величины

№	Наименование ФВ	Обозначение или уравнение связи	Ед. измерения	Размерность	
				СИ	LT
1	Длина	$l$	метр, (м)	L	L
2	Время	$t$	секунда, (с)	T	T
3	Скорость	$v$	метр в секунду	$LT^{-1}$	$LT^{-1}$
4	Ускорение	$a$	метр на секунду в квадрате ( $m/c^2$ )	$LT^{-2}$	$LT^{-2}$
5	Кривизна	$r^{-1}$	метр в минус 1 ( $m^{-1}$ )	$L^{-1}$	$L^{-1}$
6	Частота	$f$	герц, (Гц)	$T^{-1}$	$T^{-1}$
7	<b>Масса</b>	$m$	килограмм, (кг)	<b>M</b>	<b><math>L^3T^{-2}</math></b>
8	Сила	$F = m a$	ньютон, (Н)	$M L T^{-2}$	$L^4 T^{-4}$
9	Энергия	$W = F l$	джоуль, (Дж)	$M L^2 T^{-2}$	$L^5 T^{-4}$
10	Мощность	$N = W / t$	ватт, (Вт)	$M L^2 T^{-3}$	$L^5 T^{-5}$
11	Давление	$P = F / s = W / V$	паскаль, (Па)	$M L^{-1} T^{-2}$	$L^4 T^{-2}$

В табл. 2 имеется столбец, в котором приведены размерности тех же самых величин в  $LT$ - размерности. Это система единиц, в которой основными величинами принимают *длину* и *время*, все остальные величины оказываются выраженными через них. Примечательно, что размерность всех величин можно выразить даже через одну основную величину и такие системы есть. Данный факт иллюстрирует органическое устройство Природы по принципу «Всё во всём».

Далее показано некоторое частное продолжение табл. 2.

№	Наименование ФВ	Обозначение или уравнение связи	Ед. измерения	Размерность	
				СИ	LT
12	Площадь	$s$	метр <sup>2</sup> , (м <sup>2</sup> )	L <sup>2</sup>	L <sup>2</sup>
13	Объем	$V$	метр <sup>3</sup> , (м <sup>3</sup> )	L <sup>3</sup>	L <sup>3</sup>
14	Плотность	$\rho_m$	кг/м <sup>3</sup>	ML <sup>-3</sup>	T <sup>-2</sup>
15	Импульс (количество движения)	$P = mv$	кг·м/с	MLT <sup>-1</sup>	L <sup>4</sup> T <sup>-3</sup>
16	Момент импульса	$L = mvr$	кг·м <sup>2</sup> /с	ML <sup>2</sup> T <sup>-1</sup>	L <sup>5</sup> T <sup>-3</sup>
17	Натяжение (жесткость)	$f = F/l = W/S$	Н/м	MT <sup>-2</sup>	L <sup>3</sup> T <sup>-4</sup>
1*	Сила электр. тока	$I$	ампер, (А)	I	
2*	Электр. заряд	$q = I * t$	кулон, (Кл)	IT	
3*	Эл. напряжение	$U = I * R$	вольт, (В)	M L <sup>2</sup> T <sup>-2</sup> I <sup>-1</sup>	
4*	Эл. сопротивление	$R = U / I$	ом, (Ом)	M L <sup>2</sup> T <sup>-3</sup> I <sup>-2</sup>	

Перевод размерности физических величин, например, табл.2, из размерностей СИ в LT-размерностную систему осуществим путём замены размерности *массы* значением L<sup>3</sup>T<sup>-2</sup>. Такой выбор замены размерности для *массы* позволяет обнаружить третий закон Кеплера, что далее будет рассмотрено более подробно. Как осуществляется замена размерностей *массы* можно показать и на примере сравнении двух силовых законов: второго закона Ньютона и его же закона всемирного тяготения

$$ma = G \frac{mM}{r^2}.$$

Если принять значение *гравитационной постоянной*  $G$  безразмерной величиной и сократить в этом выражении слева и справа малую букву  $m$ , то размерность массы  $M$  центрального тела определится как  $\dim M = L^3T^{-2}$ .

Выражая размерность *массы* таким образом, мы получаем возможность выразить большинство других величин через *длину* и *время*, что показано в табл. 2. Бинарное выражение размерности физических величин позволяет разместить их на одной плоскости в соответствующих координатах. Так образом впервые была получена система ФВ, созданная известным советским авиаконструктором Р.Л. Бартини.

Система Р.Л. Бартини представлена на рис. 1. В системе Бартини все ФВ имели размерностное выражение через *длину* и *время*. Бинарное представление размерности всех ФВ позволило разместить их в одной плоскости и создать планарную систему ФВ. Из-за LT

– размерностного представления ФВ система размерностей получила название *кинематической*.

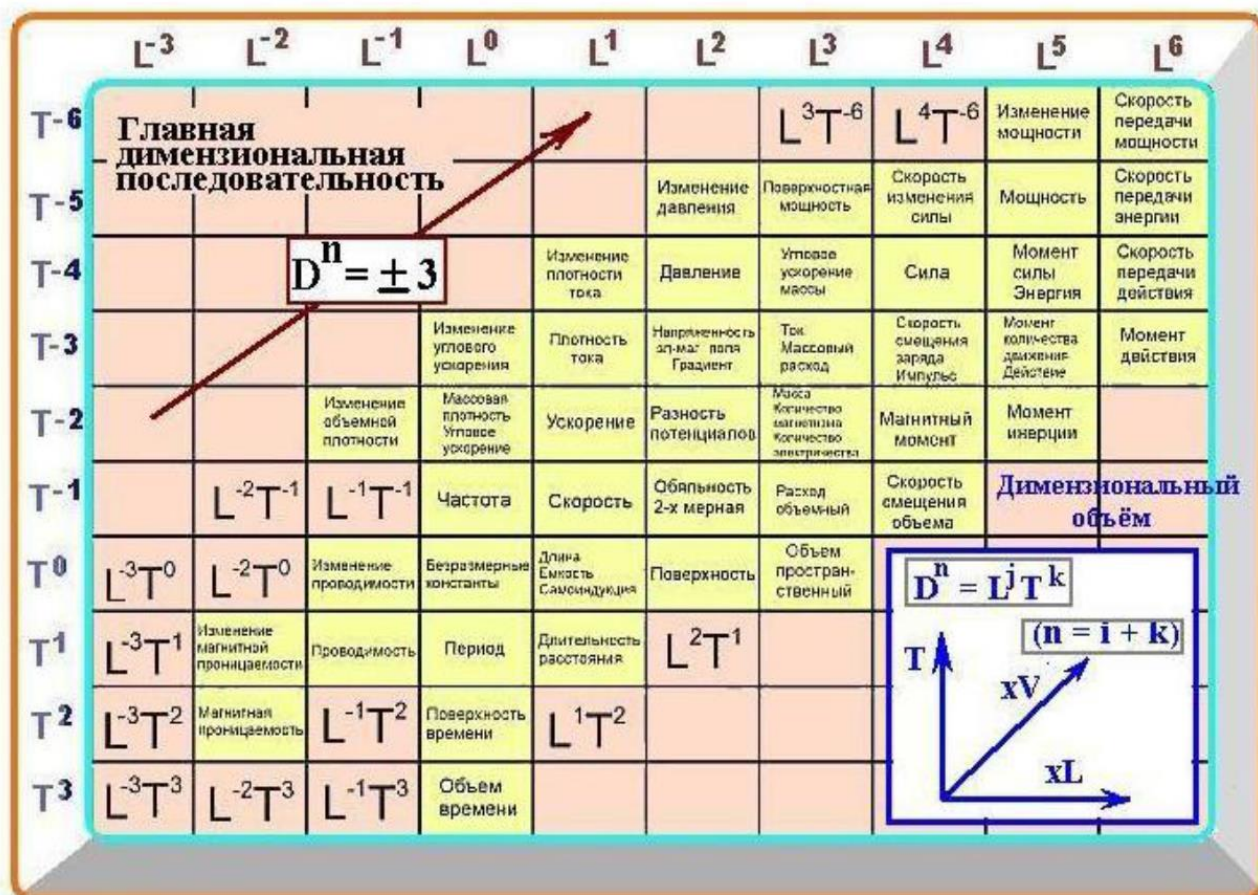


Рис. 1. Кинематическая система физических величин Р.Л. Бартини

В своей системе Бартини открыл «главную размерно-последовательность» в расположении ФВ и предсказал существование нескольких новых величин. Однако, из-за использования не очень практичной *LT*-размерности величин, данная система не нашла широкого практического применения.

### *Системное представление физических величин в размерностях СИ*

Исследования Р.Л. Бартини по созданию системы ФВ получили дальнейшее развитие применительно к системе СИ [1]. Базовое представление ФВ в *LT*-размерности в целом сохранилось, но система стала многоуровневой. В этой системе все ФВ получили привычные размерности системы СИ. Примечательным оказалось то, что в системе стало возможным обнаруживать закономерные связи между величинами и она получила наименование системы физических величин и закономерностей (ФВиЗ).

Архитектурное изображение системы ФВиЗ с конкретным соотношением размерностей гравитационной и инертной масс ( $G = M^{-1}L^3T^{-2}$ ), а также соотношением единиц измерения массы и силы тока ( $k = MI^{-1}$ ), приведено на рис. 2.



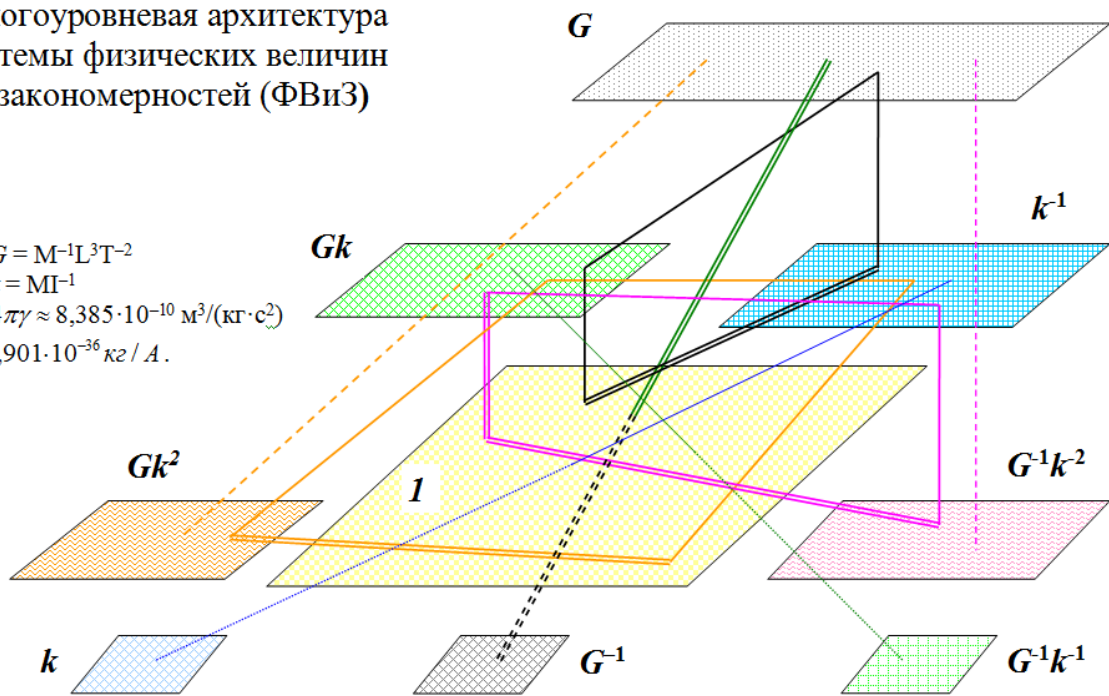
Многоуровневая архитектура системы физических величин и закономерностей (ФВиЗ)

$$\dim G = M^{-1}L^3T^{-2}$$

$$\dim k = MI^{-1}$$

$$G = 4\pi\gamma \approx 8,385 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$$

$$k \approx 4,901 \cdot 10^{-36} \text{ кг}^2 / \text{А}.$$



Системные уровни и действующие межуровневые связи физических величин:

**1** - общие базовые кинематические величины

**G** - общие базовые динамические величины

**G<sup>-1</sup>** - уровень гравитационной константы

**Gk** - базовые электромагнитные величины

**k<sup>-1</sup>** - полевые электромагнитные величины

**Gk<sup>2</sup>** - структуро-средовые ЭМВ 1 подгруппы

**G<sup>-1</sup>k<sup>-2</sup>** - структуро-средовые ЭМВ 2 подгруппы

**k** и **G<sup>-1</sup>k<sup>-1</sup>** - дополнительные системные уровни

Рис. 2. Архитектурное изображение системы ФВиЗ

Если сравнивать систему ФВиЗ с ее прототипом - системой Бартини, то можно заметить, что, если не принимать во внимание всех других изменений, то прототип оказался как бы повернутым на четверть оборота ( $45^\circ$ ) по часовой стрелке. Это хорошо видно на следующем рис. 3, на котором изображены ФВ системы СИ, в размерности которых присутствуют только *длина* L и *время* T с присущими им степенными показателями. Это так называемые кинематические величины.

Как можно заметить по рис. 2, все ФВ имеют упорядоченное расположение, но отличное от их расположения в системе Бартини. При ближайших переходах от элемента к элементу системы, слева направо, происходит увеличения их размерности на размерность скорости ( $LT^{-1}$ ). При ближайших переходах сверху вниз и справа налево, происходит деление на размерность *длины* L, а при переходах сверху вниз и слева направо, происходит деление размерности на размерность *времени* T.

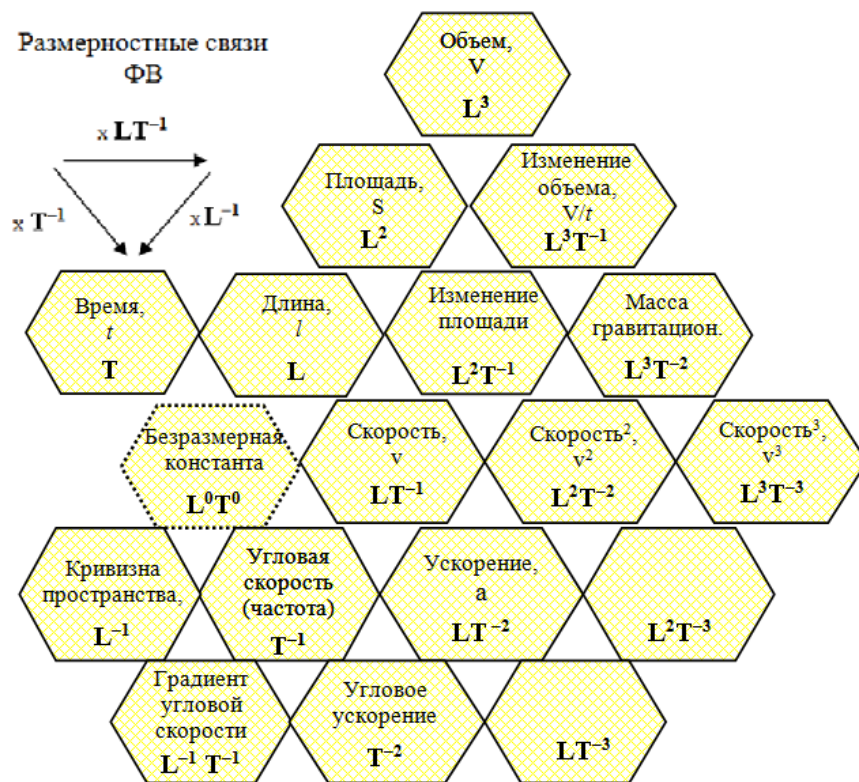


Рис. 3. Системное расположение кинематических ФВ в размерностях СИ

Аналогичным образом размещаются на своем системном уровне механические ФВ (рис. 4), которые получили наименование общих базовых динамических величин.

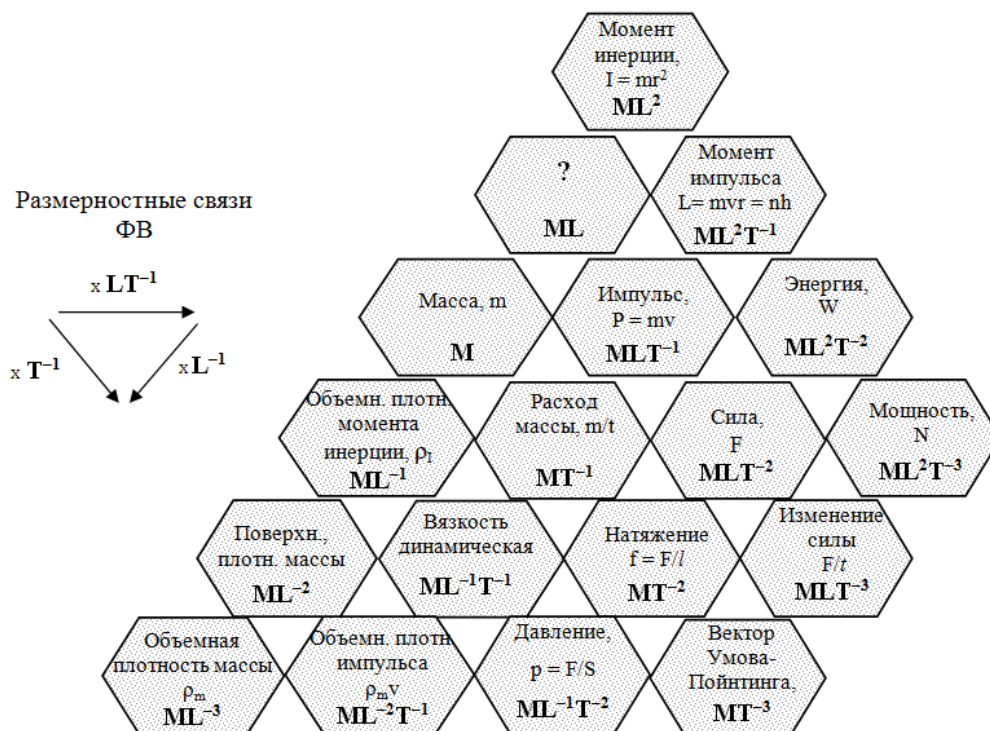


Рис. 4. Расположение ФВ на системном уровне общих базовых динамических ФВ

Теперь рассмотрим, как осуществляется «сшивка» двух показанных на рис. 3 и рис. 4 блоков ФВ. Можно заметить, что кинематические ФВ в отличие от динамических не содержат в своей размерности *массу*. Однако на рис. 3 мы уже обозначили присутствие *гравитационной массы* с размерностью  $L^3T^{-2}$ . Данная размерность *массы* обусловлена физически наблюдаемой закономерностью - третьим законом Кеплера, по которому *инертная масса* Солнца в килограммах выражается через отношение *пространственных* и *временных* характеристик планет. Закон формулируется так: «Отношение куба большой полуоси планетной орбиты к квадрату периода обращения планеты вокруг Солнца - есть величина, одинаковая для всех планет». Оказывается, если это отношение поделить на *массу* Солнца в килограммах (с поправкой  $16\pi^3$ ), то в результате мы получаем значение *гравитационной постоянной*  $\gamma = 6,67259(85) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{с}^2 \cdot \text{кг})$ . Поясним это подробнее.

Если соотнести параметры планетных орбит по третьему закону Кеплера ( $R^3/T^2$ ) и массу Солнца  $M_s = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ кг}$ , то усредненный результат вычисления такого соотношения для трёх планет с наиболее правильной круговой орбитой их движения вокруг Солнца (Венера, Земля и Нептун) показывает соотношение:  $1 \text{ кг} = 169,58 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}^2$ .

При внимательном рассмотрении можно заметить, что этот результат есть отношение  $\gamma/4\pi^2$ , где  $\gamma$  – известная *гравитационная постоянная* (постоянная тяготения) в системе СИ. Отсюда следует вывод, что *гравитационная постоянная* системы СИ содержит в себе переводной коэффициент (соотношение) двух различных выражений *массы* – в килограммах и в  $\text{м}^3/\text{с}^2$ .

Чтобы разобраться с дополнительным числовым коэффициентом  $4\pi^2$  рассмотрим соотношение двух разновидностей *массы* более детально. Центробежное ускорение, воздействующее на планеты Солнечной системы, определяется выражением

$$a = \frac{v^2}{R} = \frac{(2\pi R)^2}{T^2} \frac{1}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2},$$

где:  $v$ ,  $R$  и  $T$  – орбитальная *скорость*, *радиус* и *период обращения* любой из планет (Приложение 2).

Гравитационная масса Солнца служит источником сферически распространяющегося потока ускорений  $a$ . Поэтому, с учётом предыдущего выражения, указанная масса определится выражением

$$M_{\text{ГР}} = 4\pi R^2 a = \frac{16\pi^3 R^3}{T^2}.$$

Если вычислить согласно этому выражению гравитационную массу Солнца в  $\text{м}^3/\text{с}^2$  (исходя из средних значений пространственно-временных параметров планет) и отнести ее к известной массе Солнца в килограммах, то получается следующее соотношение

$$\frac{M_{\text{ГР}}}{M_{\text{ИН}}} = 4\pi\gamma,$$

где  $\gamma$  – постоянная тяготения, значение которой в СИ:  $\gamma = 6,67259 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{с}^2 \cdot \text{кг})$ .

Полученное таким образом соотношение между гравитационной массой (измеряемой в  $\text{м}^3/\text{с}^2$ ) и инертной массой (измеряемой в килограммах) по сути есть гравитационная постоянная в ее традиционном понимании.

$$G = 4\pi\gamma = 8,3850238 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/(\text{с}^2 \cdot \text{кг})$$

При этом закон всемирного тяготения наиболее правильно следовало бы записывать в виде

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{4\pi R^2}.$$

Для самого закона тяготения ничего не меняется (выражение для *силы* умножили и разделили на  $4\pi$ ). Но существенно то, что новое значение *гравитационной постоянной* теперь будет напрямую определять соотношение между *гравитационной массой*, измеряемой в  $\text{м}^3/\text{с}^2$  и *инертной массой*, измеряемой в килограммах. Определяющее соотношение для силы тяготения в *LT*- системе размерностей (где  $G = 1$ ), по сути, тоже не меняется:

$$F = \frac{m_1 \cdot m_2}{R^2}.$$

Таким образом, в многоуровневой системе ФВиЗ вполне однозначно определилось взаимное расположение двух базовых уровней ФВ, названных *кинематическими* и *динамическими* величинами. Эти ФВ именуются также общими базовыми, поскольку они принимают участие в закономерных связях почти всех других ФВ. Планарное (плоское) изображение этих двух системных уровней с размещением в одной системной ячейке *инертной* и *гравитационной* масс, показано на рис. 5.

# СИСТЕМА МЕХАНИЧЕСКИХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

(Механические ФВ образуют два системных уровня общих базовых величин)

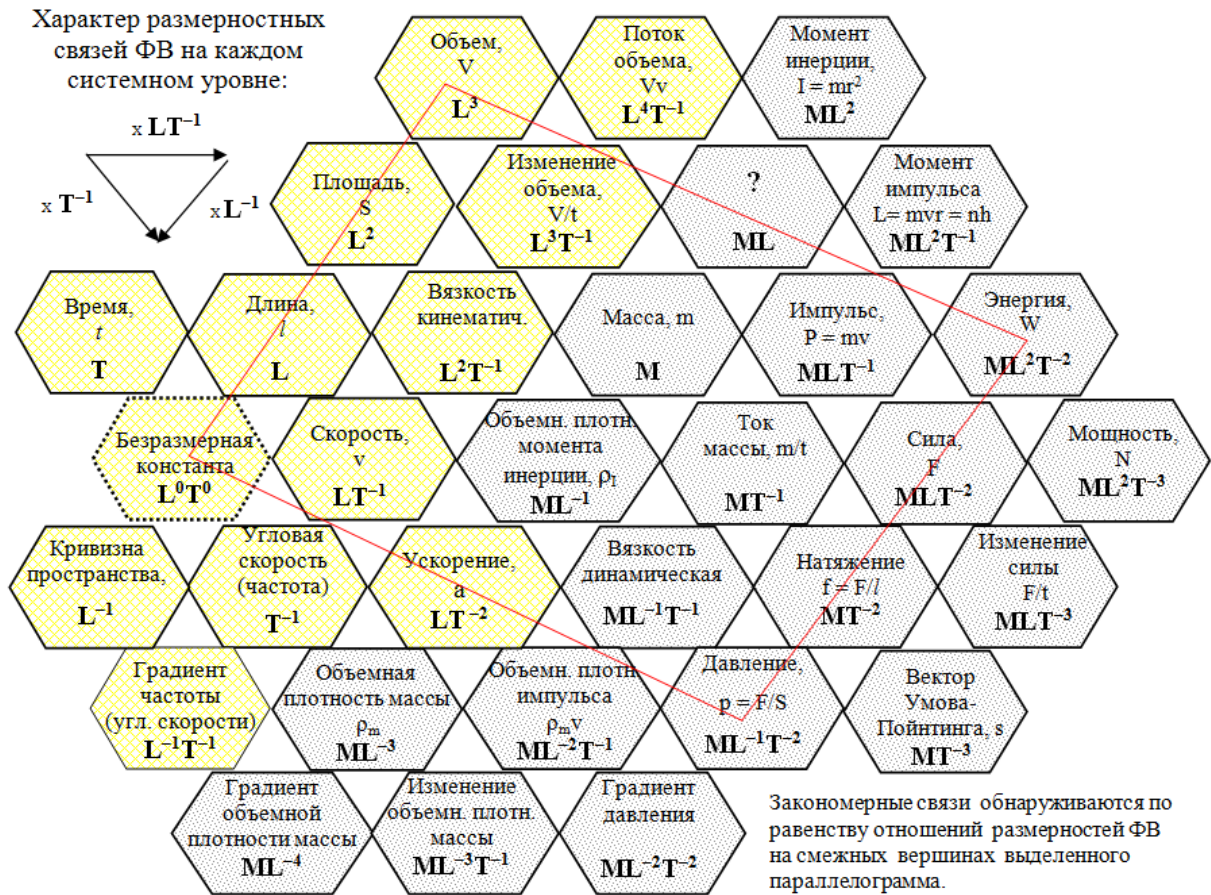


Рис. 5. Системное изображение двух уровней общих базовых величин: кинематических и динамических ФВ.

По изображению рис. 5 можно заметить, что если в размерностном выражении динамических ФВ размерность *массы* выразить через размерности *длины* и *времени*, то эти величины получают своё размерностное выражение в кинематической  $LT$ -размерностной системе Бартини. Отличие их размерностей от размерностей в системе СИ одинаковое для всех динамических величин, они отличаются на размерность *гравитационной постоянной* в системе СИ, т.е. на  $L^3T^{-2}M^{-1}$ . Сопоставление динамических ФВ в системах размерностей СИ и  $LT$ - приведено в Приложении 1.

Несмотря на указанное отличие в размерностях ФВ двух системных групп, между ними обнаруживаются системные связи, которые подчиняются определенной логике и топологии, причем эти связи выражают природные закономерности. Обозначенные логика и топология состоят в следующем: произведения (*отношения*) размерностей ФВ, расположенных на противоположных (*смежных*) вершинах выделенного параллелограмма, равны. Данное свойство автоматически выполнялось и в системе Бартини, но оно

выполнялось для любых системных связей типа выделенного параллелограмма. Поэтому отделить закономерные связи от любых геометрических связей, не было никакой возможности и закономерные связи просто не замечались. В системе ФВиЗ, выполненной на размерностях СИ, индикатором закономерных связей стало обозначенное выше свойство соотношения размерностей ФВ, располагаемых в вершинах выделяемого параллелограмма.

В частных случаях, когда «выделенный параллелограмм» видится как бы сбоку и превращается в «выделенную линию», то в закономерных взаимосвязях произведение размерностей ФВ, расположенных на краях выделенной линии, равно второй степени размерности ФВ, расположенной в ее середине или равно произведению внутренних ФВ. На рис. 6 таким свойством обладает горизонтальная линия, на краях которой расположены *безразмерная константа* и *мощность*. По ней легко определить, что *мощность* есть произведение *силы* на *скорость*.

### СИСТЕМА МЕХАНИЧЕСКИХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

(Механические ФВ образуют два системных уровня общих базовых величин)

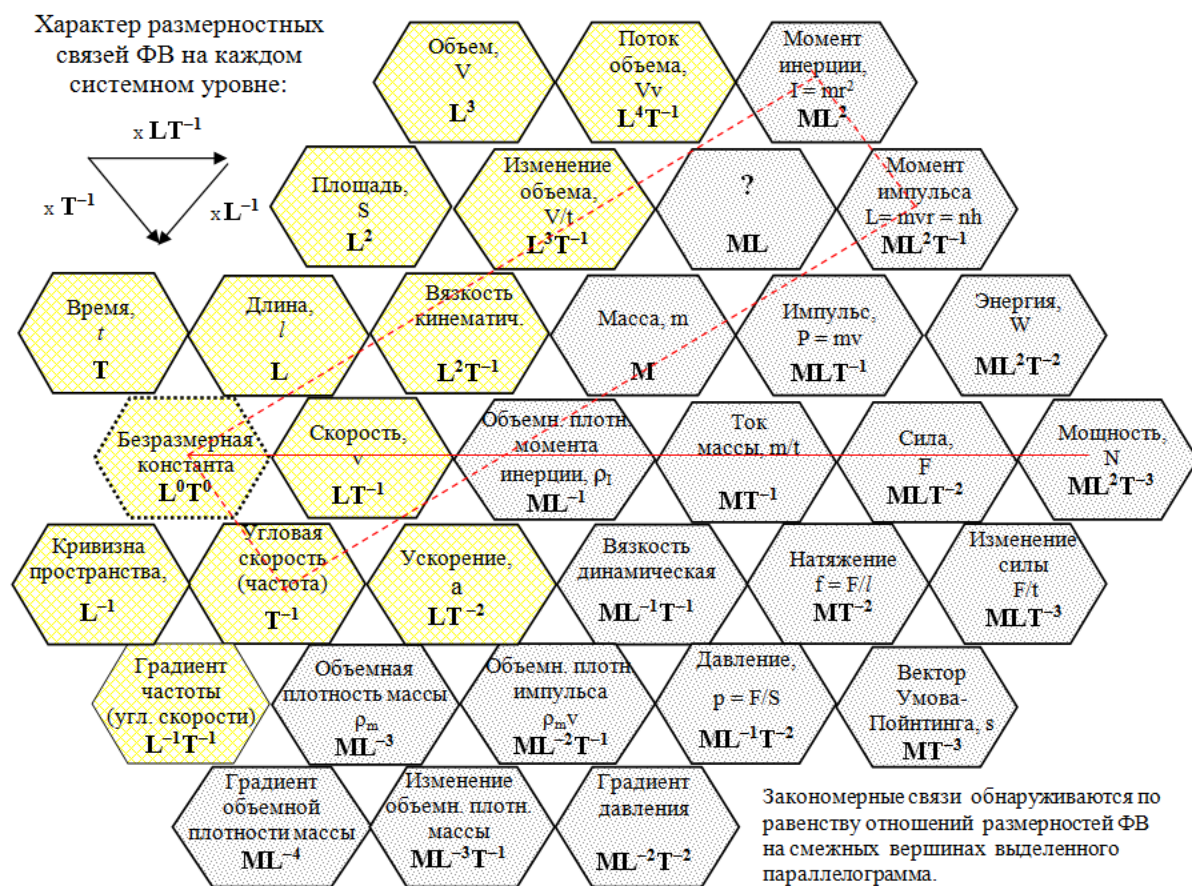


Рис. 6. Система механических величин с иллюстрацией системных закономерностей

Пользуясь изображением рис. 5 или рис.6 легко обнаруживается возможность построения подобной горизонтальной линии, связывающей *массу*, *импульс* и *энергию*. Указанная линия будет выражать следующие закономерные связи динамических ФВ

$$p = \sqrt{2mW}; \quad W = \frac{p^2}{2m}.$$

Рассмотрим ещё один пример поиска закономерностей в системе, изображённой на приводимых рисунках. Например, нам надо отыскать закономерную взаимосвязь между *силой* и *давлением*. Пользуясь системой рис. 5 или рис. 6, мысленно проводим линию (диагональ выделенного параллелограмма) от элемента с *безразмерной константой* до элемента, содержащего *силу*. Потом находим элемент системы с ФВ *давление* и на противоположном конце второй диагонали выделяемого параллелограмма обнаруживаем системный элемент с ФВ *площадь*.

По этим выражениям видно, что природные закономерности в системе ФВиЗ выражаются не в виде соотношения наименований или буквенных обозначений ФВ, а в виде соотношения их размерностей. Поэтому надо иметь в виду, что реальные природные закономерности в отличие от размерностных соотношений ФВ могут иметь числовые коэффициенты типа двойки или числа *пи*.

Далее проверяем равенство произведений размерностей ФВ, располагаемых на противоположных вершинах выделенного параллелограмма. Наличие такого равенства подтверждает правильность нахождения природной закономерности. В нашем примере будет иллюстрироваться хорошо известное соотношение: *сила* есть *давление*, умноженное на *площадь*. Или, по-иному, *давление* есть отношение *силы* к *площади*.

Приведём и поясним ещё один подобный пример. Выделенная горизонтальная линия, проведённая в системе от *безразмерной константы* до *силы*, будет иллюстрировать определяющее уравнение связи для *реактивной силы*, выражаемой как произведение *расхода массы* (топлива) на *скорость* истечения газов реактивного двигателя.

Иллюстрация в системе многоэлементных уравнений связи, в которых присутствуют ФВ в степени более двух или трех (имеется в виду *объем*), вызывает наибольшие сложности (к счастью, таких закономерностей в механике не так много, к тому же они членимы на более простые уравнения связи). Для примера рассмотрим формулу Пуазейля (см. Приложение 2).

Для построения выделенного параллелограмма следует знать, что формула Пуазейля связывает объем вытекающей из трубы жидкости *Q* (*изменение объема*) с *динамической вязкостью*  $\eta$  и *градиентом давления* по длине трубы ( $\Delta p/l$ ). Пользуясь системой по рис. 5 и опираясь на элемент системы с *безразмерной константой*, находим, что произведение *изменения объема* на *динамическую вязкость* есть *энергия*.

Поскольку поиск физических закономерностей в системе ФВиЗ имеет свою логику и достаточно формализован, оказалось возможной разработка соответствующей электронной компьютерной программы. Первую такую программу разработал в 2010 г. студент ГУУ

Александр Легейда. Вторую, более совершенную программу разработали в 2019 г. студенты кафедры ИУ6 МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством Игоря Устинова.

Данные программы положены в основу практической части настоящего учебного пособия. Практическая часть представляет собой компьютерный лабораторный практикум, который позволяет студентам обрести умение быстро находить системное размещение той или иной ФВ и определять их системные связи, выражающие природные закономерности.

**При подготовке к выполнению компьютерного лабораторного практикума студенты знакомятся с материалами настоящего учебного пособия и руководством пользователя к компьютерной программе.**

## ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Задание 1. Используя учебный файл «МЕХАНИКА-показ.lts» компьютерной программы ознакомиться с порядком размещения и визуального выделения физических величин в системных элементах, а также с примерами визуализации (выделенным параллелограммом или выделенной линией) природных закономерностей.

По результатам выполнения задания сделать вывод о возможной классификации природных закономерностей, иллюстрируемых с помощью программы.

Задание 2. Используя учебный файл компьютерной программы «МЕХАНИКА-учебный.lts» найти, отобразить и запомнить в виде файлов (посредством клавиши Print Scrn и программы Paint) системную визуализацию на экране компьютера следующих закономерностей (вариант дается преподавателем при выполнении работы):

### Вариант А:

- 1) Определяющее уравнение связи для *натяжения*.
- 2) Определяющее уравнение связи для *вращательного момента силы*.
- 3) Системное выражение кинетической энергии (через *импульс* и *массу*).
- 4) Системное выражение *момента импульса* (через *момент инерции*).
- 5) Системное выражение *мощности* вращательного движения (через *момент инерции*).

### Вариант Б:

- 1) Определяющее уравнение связи для *реактивной силы*.
- 2) Определяющее уравнение связи для *угловой скорости*.
- 3) Системное выражение кинетической энергии (через *массу* и *скорость*).
- 4) Системное выражение *момента импульса* (через *импульс*).
- 5) Системное выражение Закона всемирного тяготения И. Ньютона.



Вариант В:

- 1) Определяющее уравнение связи для *энергии*.
- 2) Определяющее уравнение связи для *углового ускорения*.
- 3) Системное выражение *мощности* (через *энергию*).
- 4) Системное выражение *энергии* (с участием *момента инерции*).
- 5) Системное выражение *объемной плотности массы*.

Вариант Г:

- 1) Определяющее уравнение связи для *мощности*.
- 2) Определяющее уравнение связи для *динамической вязкости*.
- 3) Системное выражение *мощности* (с участием *силы*).
- 4) Системное выражение *вращательного момента силы* (через *момент инерции*).
- 5) Системное выражение *объемной плотности момента импульса*.

Вариант Д:

- 1) Определяющее уравнение связи для *давления*.
- 2) Определяющее уравнение связи для *кинематической вязкости*.
- 3) Системное выражение *энергии* (через *давление*).
- 4) Системное выражение *мощности* при вращательном движении (через *момент силы*).
- 5) Системное выражение *взаимосвязи динамической вязкости и кинематической вязкости*.

Результаты выполнения своего варианта задания 2 проиллюстрировать преподавателю и внести в отчёт по лабораторной работе.

Задание 3. Научиться пользоваться одно-рисуночным изображением системы механических величин без использования компьютерной программы

Найденные соотношения поместить в отчёт по работе, представив их в упрощённой форме, приводимой в конце раздела. Каждое изображение должно содержать: полное наименование закономерности, её формульное выражение и изображение системных связей ФВ с указанием их условного обозначения и размерности в СИ.

Задание 4. С помощью компьютерной программы постараться найти системные взаимосвязи с участием механических величин, которые соответствуют системным закономерностям, но о них нет информации в приложении к известному учебнику И.В. Савельева. (список формул выдаётся преподавателем).

Найденным взаимосвязям (не менее двух) дать подходящее название, возможное физическое объяснение и соответствующее математическое выражение. Данные соотношения также изобразить по прилагаемой форме.

Форма представления системных закономерностей приведена на рис. 7.

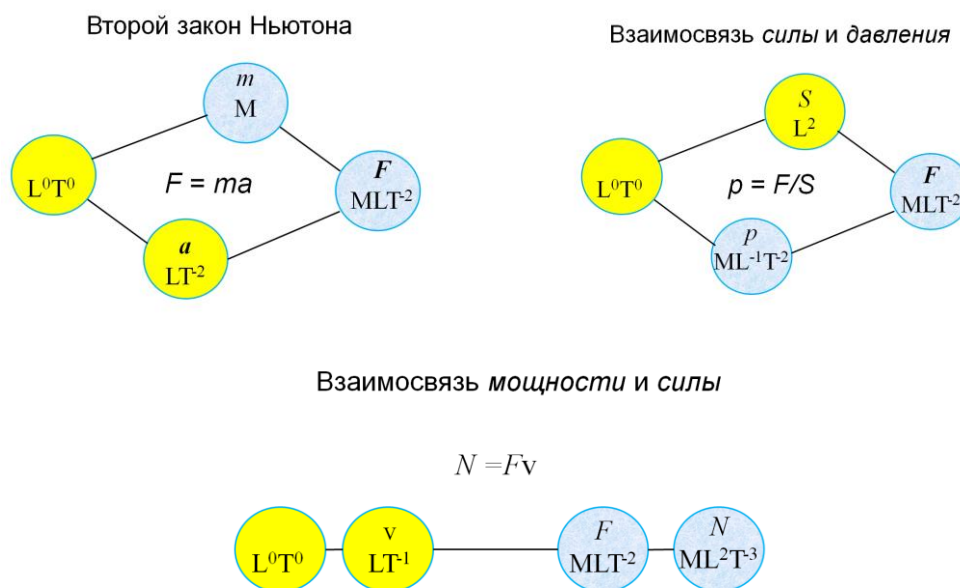


Рис.7. Варианты иллюстрации физических законов

### Форма отчёта по лабораторному практикуму

Форма отчёта по лабораторному практикуму должна соответствовать общепринятым на кафедре «Физика» требованиям. Предварительный отчёт, подготавливаемый студентом до выполнения лабораторного практикума, должен включать: наименование и номер работы, краткое изложение цели работы, основные теоретические сведения по теме практикума, письменный ответ на пять контрольных вопросов методички, один вариант планарного изображения системы ФВиЗ применительно к блоку электромагнитных величин, заготовки таблиц, требуемых по заданию. Окончательный отчёт должен включать выполнение всех пунктов задания, заключение или выводы по работе. Выводы должны отражать достижение поставленных целей.

### Способы и средства контроля знаний студента

Для допуска к лабораторному практикуму студент предъявляет преподавателю предварительно оформленный отчёт и демонстрирует знание теории по теме практикума и методике его выполнения. В качестве средства контроля знаний студентов по данному практикуму проверяется умение пользоваться плоским рисуночным изображением системы ФВиЗ (по типу рис. 5 без изображения связей), а также отвечать на следующие контрольные вопросы.

## Контрольные вопросы

1. Дайте определение следующих понятий: физическая величина, единица измерения физической величины, размерность физической величины.
2. Сформулируйте определения для: системы физических величин и системы единиц физических величин. Приведите примеры. В чем отличия этих понятий?
3. Назовите семь основных и две дополнительные физические величины международной системы единиц СИ. Назовите единицы измерения этих величин, их обозначения. Как обозначаются размерности этих величин?
4. В чем принципиальное отличие основных и производных физических величин любой системы единиц? Что такое определяющее уравнение связи?
5. Назовите две основные группы, которые образуют механические физические величины.
6. Как отличаются по размерности механические величины системы СИ от содержащих их  $LT$ -размерностных системных элементов?
7. Как осуществляется поиск закономерностей в системе размерностных взаимосвязей физических величин в бумажном и электронном вариантах исполнения? Приведите примеры из области механики.
8. В каких случаях системная закономерность имеет вид прямой линии?
9. Определите на планарном изображении системы ФВиЗ местоположение трёх физических величин, заданных преподавателем. Каковы размерности этих величин в системах единиц СИ и  $LT$ ? К каким системным группам относятся эти величины?
10. По заданным размерностям двух физических величин определите их системную (и закономерную) взаимосвязь с третьей величиной, при участии безразмерной постоянной.
11. По заданным размерностям трёх физических величин определите их системную (и закономерную) взаимосвязь с четвертой физической величиной.
12. По заданным преподавателем уравнениям связи найдите в системе ФВиЗ соответствующие им системные изображения.
13. Найдите две возможные системные взаимосвязи ФВ, соответствующие механическим законам, но не входящие в таблицу Приложения 2.
14. Вычислите абсолютную и относительную погрешности определения гравитационной постоянной (с учётом введения дополнительного коэффициента  $4\pi$  в силовой закон Ньютона) как соотношения гравитационной и инертной масс Солнца. (Масса Солнца  $\approx 1,99 \cdot 10^{30}$  кг). Для вычисления использовать параметры трёх планет солнечной системы с наименьшим эксцентриситетом их орбит (см. Приложение 3).

## Оценка выполнения лабораторного практикума

В соответствии с балльной рейтинговой системой, действующей на кафедре «Физика», выполнение лабораторного практикума оценивается в **3 рейтинговых балла**. Итоговая оценка учитывает уровень подготовки студента к выполнению данной работы, качество её выполнения, а также качество и своевременность её защиты.

**За допуск к лабораторному практикуму его выполнение – 1 балл.** При отсутствии заготовленной формы отчёта или незнании ответов на контрольные вопросы – студент к выполнению лабораторного практикума не допускается.

**За безошибочное выполнение, качественное оформление и понимание существа лабораторного практикума – 1 балл.** Если отчёт имеет ошибки, неправильно (включая, небрежно) оформлен или студент не понимает существа выполненной работы и не способен объяснить полученные результаты, ставится – **0 баллов**. Студенту, не выполнившему лабораторный практикум, предоставляется возможность повторного его выполнения и исправления отчёта.

**Защита** лабораторного практикума проводится в форме устных вопросов и ответов по данной теме или тестирования (в течение 10 минут 3 вопроса; мин. оценка – **0 баллов**, макс. оценка – **3 балла** (при этом студенту предоставляется возможность пройти процедуру защиты повторно). Защита лабораторного практикума спустя два месяца с момента его выполнения не принимается.

Лабораторный практикум считается полностью выполненным, если студент защитил его и получил в сумме **не менее 2-х баллов**.

Студенты, допущенные к защите, но не набравшие установленного минимума баллов, могут быть допущены к повторной защите в сроки, установленные кафедрой.

### Литературные и методические материалы:

1. Чуев А.С. Системный подход в физическом образовании инженеров. // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. - № 2. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnyy-podhod-v-fizicheskom-obrazovanii-inzhenerov>
2. Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерности. – М.: Наука. 1988. 432 с.
3. Чуев А.С. Видеоролик: Системные соотношения физических величин в механике. <https://www.youtube.com/watch?v=nf6KPEijD2E&t=106s>

4. Инструкция пользователя к компьютерному лабораторному практикуму «Изучение системных размерностных взаимосвязей физических величин». МГТУ им. Н.Э. Баумана. В электронном формате прилагается к компьютерной программе. 2014 г.

Приложение 1.

### Системные группы механических физических величин и их расположение в системных LT – элементах

№ п/п	Наименование физической величины (ФВ)	Обозначение ФВ	Размерность ФВ в СИ	Размерность системного LT – элемента, в который входит ФВ	Соотношение размерностей LT- элемента и ФВ в СИ
<b>Динамические общие базовые величины</b>					
1	Энергия	$W$	$ML^2T^{-2}$	$L^5T^{-4}$	$M^{-1}L^3T^{-2} = G$
2	Объемная плотность энергии (давление)	$w$	$ML^{-1}T^{-2}$	$L^2T^{-4}$	
3	Мощность	$N$	$ML^2T^{-3}$	$L^5T^{-5}$	
4	Импульс (количество движения)	$P$	$MLT^{-1}$	$L^4T^{-3}$	
5	Объемная плотность импульса	$\rho_P$	$ML^{-2}T^{-1}$	$LT^{-3}$	
6	Сила механическая	$F$	$MLT^{-2}$	$L^4T^{-4}$	
7	Изменение силы	$dF/dt$	$MLT^{-3}$	$L^4T^{-5}$	
8	Вращательный момент силы	$M$	$ML^2T^{-2}$	$L^5T^{-4}$	
9	Объемная плотность силы	$\rho_F$	$ML^{-2}T^{-2}$	$LT^{-4}$	
10	Натяжение (поверхностная плотность энергии)	$f$	$MT^{-2}$	$L^3T^{-4}$	
11	Вектор Умова-Пойнтинга (изменение натяжения)	$s$	$MT^{-3}$	$L^3T^{-5}$	
12	Объемная плотность натяжений	$\rho_f$	$ML^{-3}T^{-2}$	$T^{-4}$	
13	Давление	$p$	$ML^{-1}T^{-2}$	$L^2T^{-4}$	
14	Градиент давления	$gradp$	$ML^{-2}T^{-2}$	$LT^{-4}$	
15	Изменение давления	$dp/dt$	$ML^{-1}T^{-3}$	$L^2T^{-5}$	
16	Вязкость динамическая	$\eta$	$ML^{-1}T^{-1}$	$L^2T^{-3}$	
17	Масса (инертная)	$m$	$M$	$L^3T^{-2}$	
18	Расход (ток) массы	$m/t$	$MT^{-1}$	$L^3T^{-3}$	
19	Объемная плотность массы	$\rho_m$	$ML^{-3}$	$T^{-2}$	
20	Поток объемной плотности массы	$j_m$	$ML^{-2}T^{-1}$	$LT^{-3}$	
21	Механич. момент инерции $I = \Sigma(m_i r_i)^2$	$I_m$	$ML^2$	$L^5T^{-2}$	
22	Момент импульса (действие актуальное)	$L = mvr$	$ML^2T^{-1}$	$L^5T^{-3}$	

23	Потенциальное действие $\Pi = FS = f \cdot V$	$\Pi$	$ML^3T^{-2}$	$L^6T^{-4}$	
<b>Кинематические общие базовые величины</b>					
1	Безразмерная константа		$L^0T^0$	$L^0T^0$	1
2	Пространственная протяженность (длина)	$l$	$L$	$L$	
3	Площадь	$S$	$L^2$	$L^2$	
4	Объем пространства	$V$	$L^3$	$L^3$	
5	Время	$t$	$T$	$T$	
6	Изменение объема	$dV/dt$	$L^3T^{-1}$	$L^3T^{-1}$	
7	Поток объема	$Vv$	$L^4T^{-1}$	$L^4T^{-1}$	
8	Вязкость кинематическая (коэффициент диффузии)	$\nu$	$L^2T^{-1}$	$L^2T^{-1}$	
9	Скорость	$v$	$LT^{-1}$	$LT^{-1}$	
10	Ускорение	$a$	$LT^{-2}$	$LT^{-2}$	
11	Угловая скорость (угловая частота)	$\omega$	$T^{-1}$	$T^{-1}$	
12	Угловое ускорение	$\varepsilon$	$T^{-2}$	$T^{-2}$	
13	Вихрь вращения	$\zeta$	$L^{-1}T^{-1}$	$L^{-1}T^{-1}$	
14	Кривизна пространства	$l^{-1}$	$L^{-1}$	$L^{-1}$	

## Приложение 2.

Основные уравнения механики с участием кинематических и динамических величин

№ п/п	Наименование определяющих и иных уравнений связи ФВ	Уравнение связи	Примечание
<b>Механические величины и уравнения связи с их участием</b>			
1	Скорость, $v$		
2	Ускорение, $a$		
3	Угловая скорость,		
4	Угловое ускорение,		
5	Сила, $F$	$F = ma$	$m$ - масса
	Натяжение, $f$	$f = F/l = W/S$	$S$ - площадь
	Давление, $p$	$p = F/S$	$V$ - объем
6	Момент силы,		
7	Импульс,		
8	Момент импульса		
9	Энергия, (работа $A$ )	$W = Fl$	
10	Мощность, $N$	$N = W/t = Fv$	

## Приложение 3.

### **ОРБИТАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛАНЕТ**

<b>Название</b>	<b>Большая полуось (а.е.)</b>	<b>Эксцентриситет</b>	<b>Наклон к эклиптике (град)</b>	<b>Период обращения (сут)</b>	<b>Наклон оси (град)</b>	<b>Орбит. скорость (км/с)</b>
<b>Меркурий</b>	0.38709830982	0.205631752	7.0049863889	87.96843362	0.00	47.87
<b>Венера</b>	0.72332981996	0.006771882	3.3946619444	224.6954354	177.36	35.02
<b>Земля</b>	1.00000101778	0.016708617	0.0	365.24218985	23.45	29.79
<b>Марс</b>	1.52367934191	0.093400620	1.8497263889	686.92970957	25.19	24.13
<b>Юпитер</b>	5.20260319132	0.048494851	1.3032697222	4330.5957654	3.13	13.06
<b>Сатурн</b>	9.55490959574	0.055508622	2.4888780556	10746.940442	25.33	9.66
<b>Уран</b>	19.21844606178	0.046295899	0.77319611	30588.740354	97.86	6.80
<b>Нептун</b>	30.11038686942	0.008988095	1.7699522	59799.900456	28.31	5.44