

Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана

А.С. Чуев

Компьютерный лабораторный практикум Т-13

**Изучение законов молекулярной физики и термодинамики  
в системном представлении**

*Учебное пособие по лабораторному практикуму  
для студентов первого курса*

Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана

2022

УДК 536

ББК

Ч

Рецензент:

Чуев А.С. Изучение законов молекулярной физики и термодинамики в системном представлении.

Компьютерный лабораторный практикум. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022.

– ... с.

Во данном учебном пособии рассматриваются законы механики применительно к молекулярной физике, а также тепловые физические величины и законы термодинамики, представленные в размерностях системы СИ. Все физические величины (ФВ) сгруппированы по своим размерностям в две базовые группы системы физических величин и закономерностей (ФВиЗ). Первичные основы и принцип строения системы ФВиЗ изложены в подобном лабораторном практикуме, предназначенном для изучения механических величин и их закономерностей. Ранее рассмотренные группы кинематических и динамических механических величин являются базовыми и для тепловых величин. Основной дополнительной величиной в области тепловых ФВ и термодинамических законов является *температура*. В системе СИ температура входит в состав основных величин этой системы и имеет свою оригинальную размерность. В отличие от системы СИ, в рассматриваемой системе ФВиЗ размерность температуры принята совпадающей с размерностью частоты ( $T^{-1}$ ) и для этого имеются вполне определённые основания.

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

Илл. 5      Библиогр. 6 назв.

*Методическое издание*

**Анатолий Степанович Чуев**

Изучение законов молекулярной физики и термодинамики 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

Для понимания и практического исполнения данного учебного пособия требуется предварительное выполнение или изучение, хотя бы теоретическое, лабораторного практикума по изучению законов механики в их системном представлении [1].

Система механических физических величин (ФВ) с наглядным изображением их системных взаимосвязей, выражающих природные закономерности, приведена на рис. 1.

Размерность и местоположение *температуры* в данной системе будет считаться совпадающей по размерности с частотой (размерность  $T^{-1}$ ). В этом случае все тепловые величины и их закономерные связи органично вписываются в системные уровни базовых кинематических и динамических величин, рассмотрение которых приведено в пособии [1]. На рис. 1 для напоминания приведена ранее изученная система механических величин.

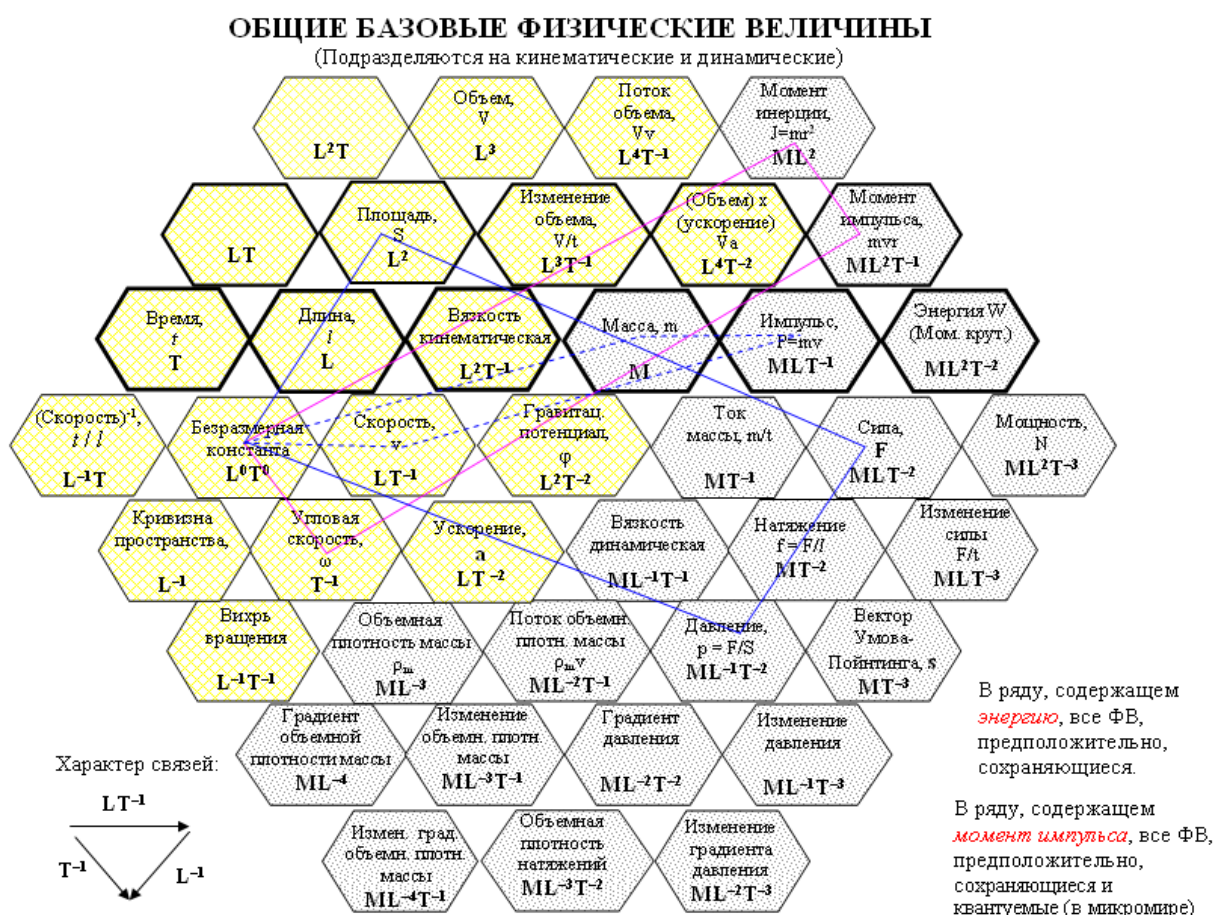


Рис. 1. Система механических величин с иллюстрацией системных закономерностей

## Цель компьютерного лабораторного практикума

Целью данного лабораторного практикума является изучение студентами единиц измерения, размерностей, а также системного представления законов молекулярной физики и термодинамики. При выполнении практикума приобретает умение пользоваться специализированной компьютерной программой, в которой система ФВиЗ представлена в виде планарного (плоского) изображения. Лабораторный практикум призван способствовать закреплению теоретических знаний, приобретаемых на лекциях и семинарских занятиях, а также при изучении литературных и других источников информации.

## Основная часть

### *Законы молекулярной физики и термодинамики в системном представлении*

Поскольку большинство законов молекулярной физики представляют собой те же законы механики [1], то основная часть материала данного пособия посвящена тепловым величинам и их закономерным взаимосвязям. Системное представление тепловых величин, обычно размещаемых на общем базовом уровне, не является единственно возможным. В учебном пособии рассмотрен наиболее подходящий вариант, как с точки зрения соответствия размерностей тепловых ФВ их физической сущности, так и с точки зрения наиболее компактного расположения ФВ всей системы. При этом уделено внимание наличию хорошей визуализации ФВ, наиболее часто используемых в учебном процессе.

По архитектуре строения система ФВиЗ представляет собой  $LT$  – размерностное основание (все системные ячейки выражены по размерности через *длину* и *время*), включающее в себя базовый системный уровень из кинематических ( $LT$ ) величин. Этот же базовый уровень неявно содержит и остальные величины в их  $LT$  – размерностном выражении, однако в системе ФВиЗ они представляются расположенными (строго над своими системными  $LT$  – элементами) на определенных системных уровнях. Системные уровни обозначены своими размерностными коэффициентами, содержащими составляющие  $G$  и  $k$  со своими степенными показателями. Коэффициент  $G$  представляет собой по размерности *гравитационную постоянную*, а коэффициент  $k$  – размерностное соотношение *массы и силы тока*  $k = M/I$  (для варианта системы ФВиЗ по рис. 3).

Четырёхугольники и линии, приводимые на рис. 3, обозначают возможные системные соотношения между ФВ, располагаемых на отдельных системных уровнях и выражающих своим геометрическим расположением, а также своими размерностными соотношениями определённые физические закономерности.

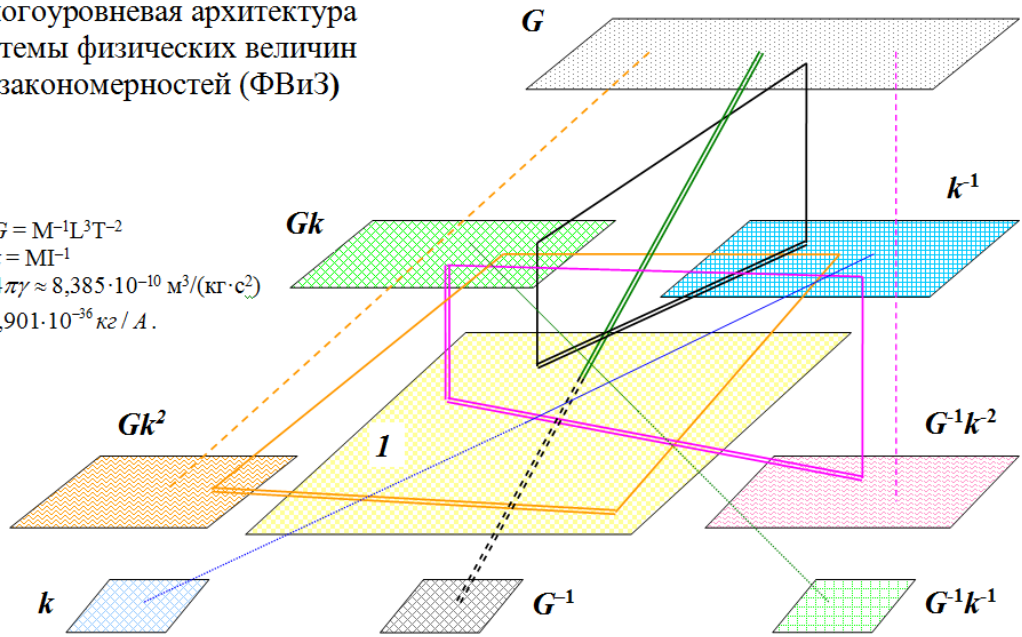
Многоуровневая архитектура системы физических величин и закономерностей (ФВиЗ)

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

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

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

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



Системные уровни и действующие межуровневые связи физических величин:

- |   |  |
|---|--|
| 1 - общие базовые кинематические величины   | $k^{-1}$ - полевые электромагнитные величины           |
| G - общие базовые динамические величины     | $Gk^2$ - структуро-средовые ЭМВ 1 подгруппы            |
| $G^{-1}$ - уровень гравитационной константы | $G^{-1}k^{-2}$ - структуро-средовые ЭМВ 2 подгруппы    |
| $Gk$ - базовые электромагнитные величины    | $k$ и $G^{-1}k^{-1}$ - дополнительные системные уровни |

Рис. 2. Архитектурное изображение системы ФВиЗ

Отметим, что в рассматриваемом здесь и других возможных вариантах системы ФВиЗ имеется неоднозначность с системным расположением ФВ *температура*. По этому поводу также отметим следующее: если *температуре* приписать свою особую размерность, например -  $\Theta$ , как это сделано в системе СИ, то не получается создание единой планарной системы ФВиЗ. Системное расположение температуры в системе ФВиЗ аналогично системному расположению в ней *электрического заряда* – оно многовариантное и не вполне определённое. Правда, при любой выбранной размерности *температуры* (как и при любом выборе размерности электрического заряда в электромагнетизме) в принципе возможно построение своей системы ФВиЗ с участием тепловых величин.

Применительно к рассматриваемой системе ФВиЗ, в табл. 1 приведено несколько возможных вариантов представления размерности *температуры* и показано - как при этом изменяются размерности других важнейших ФВ, связанных с температурой известными закономерностями. К таким ФВ относятся *постоянная Больцмана* –  $k$ , *постоянные Вина* –  $b_1$  и  $b_2$ , *энтропия* –  $S$  и *теплоемкость* –  $C$ . В таблице 1 приведены нескольких возможных вариантов системного расположения *размерности температуры*.

Таблица 1. Возможные варианты представления размерности *температуры*.

№ п/п	Температура		$b_1 = \lambda_m T$	$b_2$	k; C; S	Примечание
	(СИ)	(ЛТ)				
1	$ML^2T^{-2}$	$(L^5T^{-4})$	$ML^3T^{-2}$	$M^{-4}L^{-11}T^7$	–	Температура имеет размерность энергии
2	–	–	L	$ML^{-1}T^{-3}$	$ML^2T^{-2}$	Температура отнесена к кинематическим общим базовым величинам
3	$T^{-1}$	$T^{-1}$	$LT^{-1}$	$ML^{-1}T^2$	$ML^2T^{-1}$	
4	$LT^{-1}$	$LT^{-1}$	$L^2T^{-1}$	$ML^{-6}T^2$	$MLT^{-1}$	
5	$LT^{-2}$	$LT^{-2}$	$L^2T^{-2}$	$ML^{-6}T^7$	ML	

Из таблицы 1 видно, что самый первый вариант (хотя он зачастую представляется как наиболее верный) не очень убедителен из-за присутствия *массы* (M) в размерности *температуры*. Известно, что *температура*, хотя и выражает определенным образом внутреннюю *энергию* физических тел, но по сути не является ни *энергией*, ни *объемной плотностью энергии* (давлением), а от *массы* или *объемной плотности массы* температура и вовсе не зависит. На сегодня известны физические закономерности, в которых *температура* определенным образом характеризует источники электромагнитного излучения или само электромагнитное *излучение*, где главную роль играет *частота* протекающих процессов. Но в этих закономерностях *масса*, как таковая, не играет роли или вообще может отсутствовать (например, в излучении).

Наиболее приемлемым представляется третий вариант таблицы 1. Здесь *теплоемкость* получает очень понятную размерность *действия*, равную произведению *энергии* на *время*. Действительно, *тепло* это *энергия*, а *теплоемкость* определяется еще и величиной своеобразной «ёмкости» для энергии – *времени* выдачи или приема *энергии*.

*Температура* в этом варианте получает размерность *частоты*, что объяснимо повышением *частоты* динамических процессов внутри материальных образований при повышении их *температуры* и известным повышением частоты *излучения* при повышении *температуры*. Кроме того, известное ступенчатое изменение *теплоёмкости* от *температуры* можно объяснить целочисленным изменением степеней свободы во вращательном и колебательном движениях атомов и молекул.

Таким образом, исходя из физического смысла параметров *теплоёмкости* и *температуры*, для системы ФВиЗ, используемой в области молекулярной физики, а также тепловых и излучательных величин, наиболее подходящим является вариант с размерностью *температуры*  $T^{-1}$ .

Система ФВиЗ, содержащая температуру и другие тепловые величины (сюда же входят и излучательные ФВ, изучаемые в других разделах физики) приведена на рис. 3.



### СИСТЕМА ТЕПЛОВЫХ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН

(Размерности температуры и частоты приняты совпадающими)

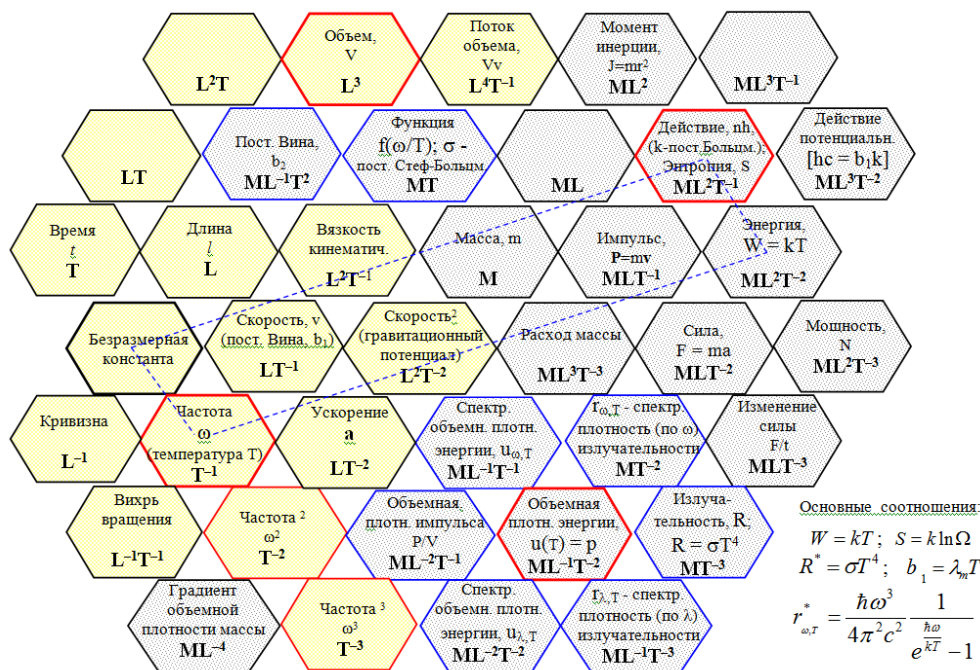


Рис. 3. Система механических величин с наличием тепловых и излучательных ФВ

Вариант системы ФВиЗ, наиболее подходящий к изучению данного раздела физики, приведён на рис. 4.

### Система ФВиЗ применительно к молекулярной физике и термодинамике

(Размерности температуры и частоты приняты совпадающими)

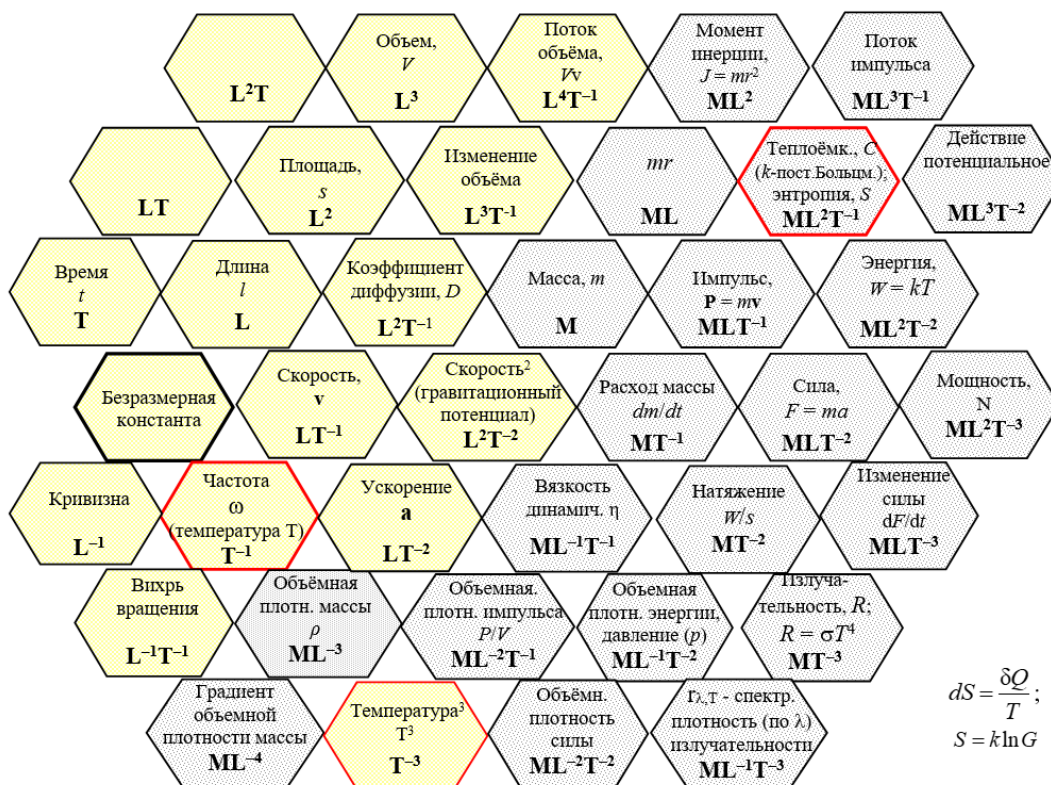


Рис. 4. Система ФВиЗ с участием ФВ молекулярной физики и термодинамики

Далее в табл.2 приведены размерности тепловых и механических величин, используемых в данном и других разделах компьютерной лабораторной работы.

Таблица 2. Размерности тепловых и механических величин применительно к разделу молекулярной физики и термодинамики

№ п/п	Наименование физической величины (ФВ)	Обозначение ФВ	Размерность ФВ в СИ	Размерность системного $LT$ -элемента	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	Изменение натяжения	$df/dt$	$MT^{-3}$	$L^3T^{-5}$	
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	$grad p$	$ML^{-2}T^{-2}$	$LT^{-4}$	
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 $I = \sum m_i r_i^2$	$I_m$	$ML^2$	$L^5T^{-2}$	
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 $D$ )	$\nu$	$L^2T^{-1}$	$L^2T^{-1}$	
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	$\xi$	$L^{-1}T^{-1}$	$L^{-1}T^{-1}$	
14	Кривизна пространства	$l^{-1}$	$L^{-1}$	$L^{-1}$	
<b>Отдельные тепловые и термодинамические величины</b>					
1	Температура	$T$	$\Theta$	$T^{-1}$	$\Theta/T^{-1}$
2	Градиент температуры	$\text{grad } T$	$\Theta L^{-1}$	$T^{-1}L^{-1}$	
3	Теплоёмкость и энтропия	$C$ и $S$	$ML^2T^{-2} \Theta^{-1}$	$L^5T^{-3}$	

В табл. 3 приведены уравнения связи для молекулярной физики и термодинамики.

Таблица 3.

№п/п	Наименование определяющих и иных уравнений связи ФВ	Уравнение связи	Примечание
<b>Преимущественно тепловые величины и уравнения связи с их участием</b>			
1	Энергия, (работа $A$ )	$W = Fl = kT$	
2	Теплота, $Q$ ; внутренняя энергия, $U$	$U = CT = kT$	$C$ - теплоемкость
3	Мощность, $N$	$N = W/t = Fv$	
4	Сила, $F$	$F = ma$	$m$ - масса
5	Натяжение, $f$	$f = F/l = W/S$	$S$ - площадь
6	Давление, $p$ ; объемная плотность тепловой энергии, $u$	$p = F/S$ ; $u = U/V$	$V$ – объем;
7	Температура, $T$	$T = U/C = W/k$	
8	Универсальная газовая постоянная, $R$	$R = pV/T$	для объема моля $V = 22,4$ л
9	Постоянная Больцмана, $k$	$k = R/ N_A$	$N_A$ - число Авогадро = $6,022 \cdot 10^{23}$ 1/моль
10	Теплоемкость, $C$ : молярная изохорная - $C_V$ ; молярная изобарная - $C_p$	$C = \Delta U/\Delta T$ ; $C_V = iR/2 = R/(\gamma-1)$ ; $C_p = R(i+2)/2 = R\gamma/(\gamma-1)$	$i$ – число степеней свободы, $i = 2/(\gamma-1)$ ; $\gamma$ - показатель адиабаты

11	Соотношение Майера	$C_p = C_v + R$	
12	Удельная теплоемкость	$c = C/\mu$	$\mu$ – молярная масса
13	Закон постоянства молярной теплоемкости (Закон Дюлонга и Пти)	$c_v \mu = \text{const}$	24,9 Дж/(моль·К)
14	Показатель адиабаты, $\gamma$	$\gamma = C_p/C_v$	$\gamma = (i+2)/i$
15	Энтропия, $S$	$S = k \cdot \ln G;$ $dS = dQ/T$	
16	Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы	$\langle \epsilon \rangle = \frac{3}{2} kT$	$k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
17	Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов	$p = \frac{3}{2} n \langle \epsilon \rangle$	$n = N/V$
18	Зависимость давления газа от концентрации и температуры	$p = nkT$	$k = \frac{m}{\mu} R$
19	<u>Скорости молекул:</u> наиболее вероятная – $v_B$  средняя арифметическая – $\langle v \rangle$  средняя квадратичная – $\langle v_{KB} \rangle$	$v_B = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}$  $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}$  $\langle v_{KB} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$	$m_0$ – масса одной молекулы;  $v_B = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$
20	Средняя длина свободного пробега молекулы ( $d$ – эфф. диаметр молекулы)	$\langle \lambda \rangle = (\sqrt{2} \pi d^2 n)^{-1}$	$\langle \lambda \rangle = (\sqrt{2} \sigma n)^{-1}$
21	Средняя частота соударений молекулы газа с другими в единицу времени	$\langle f \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle v \rangle$	$\langle f \rangle = \sqrt{2} \sigma n \langle v \rangle$
22	Эффективное сечение взаимодействия	$\sigma = \pi d^2$	
23	Кинематическая вязкость (коэффициент диффузии $D$ )	$D = \langle v \rangle \langle \lambda \rangle$	
24	Динамическая вязкость (коэффициент внутреннего трения)	$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle \lambda \rangle$	
25	Коэффициент теплопроводности	$\chi = \eta \frac{i}{2} \frac{R}{\mu}$	
26	Барометрическая формула	$p = p_0 \exp\left(-\frac{mgh}{RT}\right)$	$p_0$ – давление на высоте $h = 0$
27	Уравнение Клайперона	$pV = RT$	
28	Уравнение Клайперона - Менделеева	$pV = \frac{m}{\mu} RT$	
29	Закон Бойля - Мариотта	$pV = \text{const}$	
30	Закон Гей-Люссака	$V/T = \text{const}$	$V = V_0(1 - T/273,15)$
31	Закон Шарля	$p/V = \text{const}$	
32	Показатель адиабаты, $\gamma$	$\gamma = C_p/C_v$	$\gamma = (i+2)/i$ $\gamma = 1 + R/C_v$
33	Показатель политропы, $n$	$n = (C - C_v)/(C - C_p)$	

34	Теплоемкость политропного процесса	$C = \frac{nC_v + C_p}{n-1}$	
35	Уравнение изотермы	$pV = \text{const}$	
36	Уравнение адиабаты (уравнение Пуассона)	$pV^\gamma = \text{const}$	$TV^{\gamma-1} = \text{const}$ $T^\gamma p^{1-\gamma} = \text{const}$
37	Уравнение политропы	$pV^n = \text{const}$	$TV^{n-1} = \text{const}$ $T^n p^{1-n} = \text{const}$
38	Внутренняя энергия идеальных газов	$U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT$	$i = 3$ для 1-х атом. $i = 5$ для 2-х атом. $i = 6$ для 3-х атом.
39	Первое начало термодинамики	$Q = \Delta U + A$	
40	Второе начало термодинамики	$dS \geq 0$	
41	Третье начало термодинамики (теорема Нернста)	$\lim S = 0$	(при $T \rightarrow 0$ )
42	Основное уравнение термодинамики равновесных (обратимых) процессов	$TdS = dU + pdV$	
43	Основное неравенство термодинамики	$TdS \geq dU + pdV$	
44	Изменение энтропии при переходе из состояния 1 в состояние 2:	$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$	$\Delta S = \frac{m}{\mu} (C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1})$
45	Изменение энтропии в изопроцессах: изотермическом - $\Delta S_T$ ; изохорном - $\Delta S_V$	$\Delta S_T = \frac{m}{\mu} R \ln \frac{V_2}{V_1}$ $\Delta S_V = \frac{m}{\mu} C_v \ln \frac{T_2}{T_1}$	
46	Изменение внутренней энергии в изопроцессах: изобарном - $\Delta U_p$ ; изохорном - $\Delta U_V$ ; изотермическом - $\Delta U_T$ ; адиабатном - $\Delta U_S$	$\Delta U_p = \frac{m}{\mu} C_v \Delta T$ ; $\Delta U_V = \Delta Q = \frac{m}{\mu} C_v \Delta T$ ; $\Delta U_T = 0$ ; $\Delta U_S = -\delta A$	$\Delta U_p = \Delta Q = \frac{m}{\mu} R \frac{T_2 - T_1}{\gamma - 1} = \frac{V(p_2 - p_1)}{\gamma - 1}$
47	РАБОТА РАСШИРЕНИЯ ГАЗА В ИЗОПРОЦЕССАХ: изобарном - $A_p$ ; изотермическом - $A_T$ ; адиабатном - $A_S$ ; политропном - $A_C$	$A_p = p(V_2 - V_1)$ ; $A_T = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ ; $A_S = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right]$ ; $A_C = \frac{p_1 V_1}{n - 1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{n - 1} \right]$	$A_p = \frac{m}{\mu} R (T_2 - T_1)$ ; $A_T = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{p_2}{p_1}$ ; $A_S = \frac{m}{\mu} C_v (T_2 - T_1)$ ; $A_C = \frac{mR}{\mu(n-1)} (T_2 - T_1)$
48	Уравнение Пуассона для скорости распространения звука в газах	$v = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}$	$p$ и $\rho$ - давление и плотность газа соответственно

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

## ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В основу практической части настоящего учебного пособия положена компьютерная программа, используемая при изучении механических ФВ. 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.

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) известных законов механики.

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

### Вариант А:

- 1) Определяющее уравнение связи для *поверхностного натяжения*.
- 2) Определяющее уравнение связи для *закона Бойля-Мариотта*.
- 3) Системное выражение для *энергии* (через *температуру* и *энтропию*).
- 4) Системное выражение *момента импульса* (через *момент инерции*).
- 5) Системное выражение для *энергии* (с участием *постоянной Больцмана - k*).

### Вариант Б:

- 1) Определяющее уравнение связи для *давления* (с участием *энергии*).
- 2) Определяющее уравнение связи для *кинематической вязкости*.
- 3) Системное выражение *объёмной плотности энергии* (с участием *температуры*).
- 4) Системное выражение для *универсальной газовой постоянной R* с участием *давления*.
- 5) Системное размерностное выражение для уравнения Клайперона - Менделеева.

### Вариант В:

- 1) Определяющее уравнение связи для *теплоёмкости*.
- 2) Определяющее уравнение связи для *динамической вязкости*.
- 3) Системное выражение для *энергии* (через *температуру*).

- 4) Системное выражение для *энергии* (с участием с участием постоянной Больцмана -  $k$ ).
- 5) Системное выражение взаимосвязи *энтропии* и *температуры*.

Вариант Г:

- 1) Определяющее уравнение связи для *коэффициента диффузии*.
- 2) Определяющее уравнение связи для *динамической вязкости*.
- 3) Системное выражение *энергии* (с участием *теплоёмкости*).
- 4) Системное выражение для *энтропии* (с участием *температуры*).
- 5) Системное выражение для *универсальной газовой постоянной*.

Вариант Д:

- 1) Определяющее уравнение для *давления* (с участием *силы*).
- 2) Определяющее уравнение связи для *кинематической вязкости*.
- 3) Системное выражение взаимосвязи *давления* и *температуры*.
- 4) Системное выражение взаимосвязи *силы* и *давления*.
- 5) Системная взаимосвязь *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 тепловых 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 тепловых и термодинамических величин, которые соответствуют системным закономерностям, но о них нет информации в табл. 3.

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

Примерные формы представления системных закономерностей приведены на рис. 4. Расположение ФВ относительно друг друга и их цвета должны соответствовать их системному исполнению.

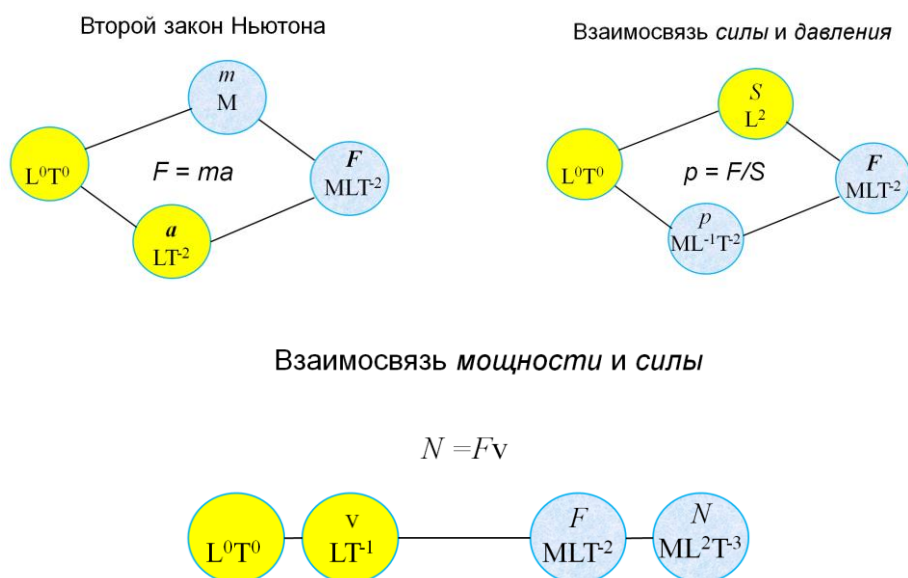


Рис. 5. Примеры изображения системных закономерностей

### 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 тепловых величин и законов термодинамики, 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. 4) при отсутствии изображения связей, а также отвечать на следующие контрольные вопросы.



## Контрольные вопросы

1. Сформулируйте определения для: системы физических величин и системы единиц физических величин. Приведите примеры. В чем отличия этих понятий?
2. Назовите семь основных и две дополнительные физические величины международной системы единиц СИ. Назовите единицы измерения этих величин, их обозначения. Как обозначаются размерности этих величин?
3. В чем принципиальное отличие основных и производных физических величин любой системы единиц? Что такое определяющее уравнение связи?
4. Назовите две основные группы, которые образуют механические и тепловые физические величины.
5. Как отличаются по размерности механические и тепловые величины системы СИ от содержащих их ЛТ-размерностных системных элементов?
6. Приведите примеры тепловых и термодинамических законов с участием динамических величин.
7. Как осуществляется поиск закономерностей в системе размерностных взаимосвязей физических величин в бумажном и электронном вариантах исполнения? Приведите примеры из области термодинамики.
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 ЛТ? 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 (в Таблице 3) уравнениям связи найдите в системе ФВиЗ соответствующие им системные изображения.
13. Найдите пример системного изображения закономерности, информации о которой нет в Таблице 3.

## Литературные и другие источники

1. Чуев А.С. Изучение законов механики в системном представлении. Сайт ФН-4 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Учебная работа. Физика, 2-й семестр. Лабораторная работа М-109.

2. Чуев А.С. Системные соотношения физических величин в механике. Видеоролик:  
<https://www.youtube.com/watch?v=nf6KPEijD2E&t=110s>
3. Глаголев К.В. Морозов А.Н. Физическая термодинамика. М. МГТУ. 2004.
4. 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>
5. Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерности. – М.: Наука. 1988. 432 с.
6. 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.