

**В.К. Лебединский**

# **Элементарное учение об энергии**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 53  
ББК 22.3  
В11

В11      **В.К. Лебединский**  
Элементарное учение об энергии / В.К. Лебединский – М.: Книга по Требова-  
нию, 2014. – 126 с.

**ISBN 978-5-458-57840-0**

**ISBN 978-5-458-57840-0**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2014

© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2014

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

[www.samizday.ru/reprint](http://www.samizday.ru/reprint)



# ЭЛЕМЕНТАРНОЕ УЧЕНИЕ ОБЪ ЭНЕРГІИ.

## ГЛАВА I.

1. Ученіе объ энергіи отличается отъ другихъ физическихъ теорій по своему характеру; оно въ главныхъ своихъ чертахъ не представляетъ собою теоріи звука, или свѣта, или вообще какого нибудь опредѣленнаго явленія, но—теорію явленія, смѣны явленій—вообще; названныя теоріи являются слѣдствіемъ ученія объ энергіи.

Это ученіе рассматриваетъ тѣ тенденціи, принципы физическаго міра, которымъ подчиняются законы, позволяющіе непосредственно предсказывать частныя явленія. Такая отвлеченность, общность ученія объ энергіи достигается разсмотрѣніемъ элемента общаго для всѣхъ явленій—энергіи; установленіемъ двухъ его неизмѣнныхъ свойствъ опредѣляется физическій міръ во всемъ своемъ многообразіи. Согласно этого, ученіе объ энергіи, энергетика, распадается на три части: слѣдуетъ составить себѣ представленіе объ энергіи, какъ основномъ элементѣ всѣхъ явленій, и затѣмъ установить два ея свойства, называемыя первымъ и вторымъ закономъ энергетики.

2. Слово „энергія“—греческое: по своему составу оно обозначаетъ „дѣловитость“ и встрѣчается уже въ сочиненіяхъ Аристотеля. Въ началѣ XIX вѣка Томасъ Юнгъ (1807) впервые \*) опредѣленно обозначилъ этимъ словомъ одинъ изъ видовъ того, что мы называемъ энергіею. Но до сере-

---

\*) M. Plank. Das Princip der Erhaltung der Energie. 1887.

дины прошлаго вѣка, которая была весьма важнымъ моментомъ въ исторіи энергетики, энергію обыкновенно называли силою. Такое смѣшеніе словъ встрѣчается въ настоящее время лишь очень рѣдко и въ сочиненіяхъ, не относящихся прямо къ физикѣ.

3. По нашимъ механическимъ воззрѣніямъ (съ Галилея и Ньютона) ни какое тѣло не можетъ придти въ движеніе, или увеличить своей скорости, или остановиться, или уменьшить своей скорости \*) иначе, какъ по причинѣ дѣйствія какой нибудь силы. Эти явленія могутъ быть произведены силою мышцъ, силою тяжести, электрическою, магнитною, силою тренія, упругости (напр. при гармоническихъ колебаніяхъ), силою удара, какъ при столкновеніи упругихъ тѣлъ. Обыкновенно мы отыскиваемъ тѣло, со стороны котораго проявляется сила, дѣйствующая на какое либо другое тѣло: руку, которая сдвинула данный предметъ; землю, которая притягиваетъ; земной магнитъ, который поворачиваетъ магнитную стрѣлку; наэлектризованную стеклянную палочку, которая поднимаетъ со стола бумажку; поверхность, которая своею шероховатостью останавливаетъ катящійся по ней предметъ. Даже въ случаяхъ упругости, когда по видимости мы имѣемъ дѣло съ тѣломъ, дѣйствующимъ само на себя, какъ напр. заведенная часовая пружина расправляясь возвращается къ прежней формѣ подѣ дѣйствіемъ собственной силы упругости, теорія пытается найти тѣло-источникъ силы и тѣло—находящееся подѣ ея дѣйствіемъ: мы разлагаемъ пружину на элементы и силами ихъ взаимодѣйствія стараемся объяснить явленіе упругости.

Силы, съ которыми взаимодѣйствуютъ тѣла, постоянно измѣняются, появляются и исчезаютъ; такъ вѣсь тѣла уменьшается съ поднятіемъ его надъ землею; сила электрическая безслѣдно исчезаетъ, какъ только тѣло разэлектризуется; сила упругости увеличивается съ увеличеніемъ деформаціи. Постоянны случаи, когда тѣло находится подѣ дѣйствіемъ нѣсколькихъ силъ въ различныхъ комбинаціяхъ; такія силы могутъ взаимно уравновѣшиваться, взаимно уничтожать свое

---

\*) Короче: получить положительное или отрицательное ускореніе.

дѣйствіе. Такъ напр. вагонъ поѣзда можетъ двигаться равномерно, по инерціи, хотя на него и дѣйствуетъ сила локомотива; тогда эта сила уравнивается силами тренія колесъ о рельсы и друг. Можно надавить рукою на предметъ, и онъ все таки подъ этимъ давленіемъ останется въ покоѣ по инерціи, если сила давленія не превосходитъ тѣхъ сопротивленій, которыя мѣшаютъ ему двигаться.

Понятно, что въ первые моменты, при нажатіи на упругое тѣло, оно нѣсколько деформируется, произойдетъ движеніе его элементовъ; мы говоримъ о томъ явленіи, которое начнется послѣ того, какъ сила упругости станетъ равною силѣ деформирующей, когда дальнѣйшее движеніе элементовъ уже не будетъ происходить.

Два послѣдніе примѣра имѣютъ то сходство, что въ обоихъ силы, дѣйствующія на тѣло, взаимно уравниваются, и тѣло предоставлено своей инерціи; но между ними есть и большая разница: въ первомъ случаѣ сила локомотива поддерживаетъ процессъ; вагонъ будетъ останавливаться, какъ только прекратится тяга локомотива. Въ случаѣ же второмъ ничто не измѣнится, если прекратится дѣйствіе руки. Опять, если не говорить о тѣхъ движеніяхъ, которыя произойдутъ вслѣдствіе возвращенія тѣла къ прежней формѣ.

4. Въ чемъ заключается это различіе, наиболѣе опредѣленно выступаетъ, если мы введемъ понятіе о *работѣ* силы, важное для всего послѣдующаго:

Работа совершается во всѣхъ случаяхъ, когда сила дѣйствуетъ на движущееся тѣло.

Локомотивъ, дѣйствующій на поѣздъ, равномерно движущійся, работаетъ на треніе; между тѣмъ какъ локомотивъ, не могущій сдвинуть поѣзда съ мѣста, не совершаетъ работы (если совершаетъ, то только на движеніе своихъ внутреннихъ частей). Если поѣздъ движется отъ станціи все съ увеличивающейся скоростью, то работа локомотива идетъ не только на треніе, но и на ускореніе поѣзда. Съ увеличеніемъ скорости работа на сопротивленіе (которое увеличивается со скоростью) движенію поѣзда увеличивается, и наконецъ локомотива хватаетъ только для работы на сопротивленія; съ этого момента поѣздъ движется равномерно.

Такимъ же образомъ рука не совершаетъ работы, надавливая на неподвижную стѣну; не совершаетъ работы надъ стѣною, но совершаетъ внутреннюю работу на поддержаніе напряженнаго состоянія мышцъ.

Подобный же случай раздѣленія работы силы на движеніе (ускореніе) тѣла и на обстоятельство отдѣльное отъ этого движенія происходитъ при каждомъ поднятіи тяжести: если какая либо машина поднимаетъ грузъ, то ея работа отчасти идетъ на ускореніе его движенія, отчасти на работу поднятія. Если мы достигнемъ равномерной скорости движенія тѣла вверхъ, то работа машины пойдетъ исключительно на подвѣтіе тѣла (треніе и сопротивленіе воздуха при небольшихъ скоростяхъ ничтожны); при этомъ тѣло движется по инерціи, и сила машины точно уравнивается силою тяжести. Если тѣло остановлено, то сила, поддерживающая его (опять равная его вѣсу), не совершаетъ уже никакой работы \*).

Случай равномернаго поднятія тѣла послужилъ для выбора мѣры (единицы) работы. На всемъ пути поднятія на высоту напр., двухъ аршинъ мы должны въ этомъ явленіи прикладывать къ тѣлу усиліе, равное его вѣсу, напр., 5 фунтовъ. Обычное убѣжденіе учить насъ, что величина работы опредѣляется во-первыхъ высотой поднятія, и во-вторыхъ усиліемъ, которое прикладывается къ тѣлу; въ механикѣ это убѣжденіе выражается въ представленіи величины работы, какъ произведенія усилія на высоту поднятія; въ данномъ случаѣ работа равна  $= 2 \times 5 = 10$  аршино-фунтовъ. Если бы мы подняли 1 ф. на 1 арш., то совершили бы работу равную единицѣ работы  $= 1$  арш.-ф.

Это выраженіе работы распространено на всѣ случаи работы; она всегда равна произведенію пути  $H$  на то усиліе  $P$ , подъ дѣйствіемъ котораго на этомъ пути находится тѣло, т. е.

$$W = \text{работа} = P \cdot H \dots \dots \dots (1).$$

Международною единицею работы принята работа въ 1 килограммъ — метръ (ок. 3,4 арш.-фит.).

---

\*) Если тѣло поддерживается на вѣсу машиною, пущенною въ ходъ, то машина при этомъ совершаетъ работу на себя; если оно поддерживается какою либо подставкою, то работы вовсе не совершается.

Если грузъ въ 10 кило поднять на 3 мт., причемъ къ нему было прикладываемо усилие въ 12 кило, то совершена работа  $= 3 \times 12 = 36$  к.-м. Часть ея  $= 3 \times 10$  к.-м. пошла на поднятіе груза, остальное  $= 6$  к.-м. пошло на ускореніе движенія груза; сила, производившая ускореніе, равнялась 2 кило.

Если возъ одвинуть на 300 м. дѣйствіемъ силы въ 200 к., причемъ сопротивленіе тренія на всемъ пути было равно 10 к., то работа  $= 190 \times 300$  к.-м., потребовалась на движеніе воза (можетъ быть, отчасти на его поднятіе въ гору, отчасти на его ускореніе).

Если усилие не постоянно на всемъ пути, что обыкновенно и бываетъ, то для вычисленія работы рассматриваютъ отдѣльно участки пути, въ которыхъ дѣйствуетъ постоянная сила, и слѣдовательно сводятъ вопросъ къ примѣненію формулы (1). Если сила мѣняется непрерывно, въ каждой точкѣ пути, то берутъ ея среднюю величину, или дѣлятъ путь на безконечно малые участки (въ предѣлѣ: рассматриваютъ каждую точку пути отдѣльно), и примѣняютъ ту же самую формулу съ помощью высшей математики. Такимъ образомъ форм. (1) есть единственное и совершенно общее выраженіе величины работы.

5. Формула (1) показываетъ, что понятіе работы сложное; она разлагаетъ его на болѣе элементарныя понятія силы и длины (пути) и показываетъ, что въ выраженіе величины работы не входитъ время ея совершенія; одна и та же работа, исполненная быстро или медленно, измѣряется однимъ и тѣмъ же числомъ. Для опредѣленія скорости работы существуетъ особое выраженіе, показывающее, сколько клг.—мт. совершается въ единицу времени, напр. въ 1 секунду; оно называется мощностью и получается, если раздѣлить величину работы на время  $t$  ея исполненія.

$$\text{Мощность } M = \frac{W}{t}.$$

Выраженіе это совершенно отлично отъ работы, именно потому что въ него входитъ время ея исполненія; оно не будетъ имѣть существеннаго значенія въ послѣдующемъ.

6. Многіе находятъ понятіе о силѣ нефилософскимъ, не-

реальнымъ, придуманнымъ и ведущимъ къ недоразумѣнiямъ. Для насъ важно то недоразумѣнiе, которое возникаетъ относительно силъ, взаимноуравновѣшивающихся при дѣйствiи на тѣло, остающееся въ покоѣ. Онѣ взаимно уничтожаются, слѣдовательно не существуютъ; что же даетъ намъ право разсматривать ихъ? Вопросъ этотъ важенъ, потому что онъ распространяется и на всѣ случаи движенiя: если тѣло движется равномерно подъ дѣйствiемъ приложенной къ нему силы, то существуетъ равновѣсiе между этою послѣднею и силами сопротивленiя; но если оно движется и ускоренно, равновѣсiе не перестаетъ существовать—между приложенною къ нему силою съ одной стороны и силами сопротивленiя и инерцiею съ другой; дѣйствiе инерцiи разсматривается также, какъ сила, равная произведенiю массы тѣла на ускоренiе \*). Всякое, слѣдовательно, движенiе есть частный случай равновѣсiя силъ также, какъ и покой (и дѣйствительно законы движенiя выводятся изъ того же принципа Даламбера, что и законы покоя), но еще менѣе ясный, такъ какъ здѣсь равновѣсiе силъ сопровождается не отсутствiемъ явленiя, но движенiемъ, происходящимъ въ опредѣленномъ направленiи, слѣдовательно опредѣленнымъ процессомъ.

Замѣчательно однако, что принятiе такого универсальнаго значенiя силы, при которомъ отыскивается даже сила инерцiи, приводитъ къ разложенiю силы на болѣе элементарныя понятiя: всякая сила, какъ сила инерцiи, выражается произведенiемъ массы того тѣла, на которое она дѣйствуетъ, на ускоренiе, которое она производитъ въ его движенiи. Чтобы найти величину силы по этому опредѣленiю, необходимо устранить всѣ причины, мѣшающiя движенiю тѣла; иначе мы будемъ измѣрять величину разности между дѣйствующею силою и силами сопротивленiй. На практикѣ за единицу силы принимается вѣсъ—килограммъ, сообщающiй массѣ воды, заключенной въ 1 кб. децим., ускоренiе въ 9,81 метра; съ такимъ ускоренiемъ движется къ землѣ эта масса при свободномъ паденiи; 1 кило и есть ея вѣсъ. Это есть

---

\*) Это, конечно, совершенно логично; инерцiя есть стремленiе тѣла сохранить свою скорость; оно тѣмъ интенсивнѣе выступаетъ, чѣмъ скорость быстрѣе мѣняется, т. е. чѣмъ больше ускоренiе.

вполнѣ опредѣленная сила, такъ какъ вполнѣ опредѣленно, какое ускореніе какой массѣ она сообщаетъ. Должно помнить (§ 3), что ускореніе силы тяжести зависитъ отъ широты мѣста. Мы дали ускореніе прибол. для Парижа (ок.  $50^{\circ}$  ш.) и для высоты на уровнѣ океана.

Авторитетомъ Ньютона понятіе о силѣ было заложено такъ глубоко въ основаніе механики и всей теоретической физики, что до средины XIX в. довольствовались этимъ неразвертываемымъ кругомъ положеній: 1) сила есть причина ускореннаго движенія и 2) всякое движеніе, принимая во вниманіе и ускоренное, есть частный случай равновѣсія силъ, т. е. отсутствія силы.

Второе положеніе, которое приводитъ къ точному расчлененію понятія силы, основано на томъ, что сила инерціи подводится подъ опредѣленіе „силы“, хотя она не причиняетъ ускоренія, но всегда направлена именно противъ ускоренія (положительнаго или отрицательнаго).

Хотя въ послѣдующемъ мы не разъ будемъ имѣть дѣло съ представленіемъ о процессѣ, объ явленіи, какъ случаѣ равновѣсія (II, 4), т. е. покоя, но мы не должны оставить силу во главѣ нашихъ представленій; мы переходимъ къ тому взгляду, который въ прошломъ вѣкѣ, втеченіе приблизительно 17 лѣтъ (1843 и 1860 г.) быстро легъ въ основаніе физическихъ теорій.

Параграфъ 4 показываетъ, какую ясность вводитъ понятіе работы въ описаніе движенія; можно считать работу болѣе реальною, чѣмъ сила, и опредѣлять эту послѣднюю, какъ производное понятіе, обративъ уравненіе (1) въ формулу  $P = \frac{W}{H}$ . Но въ чемъ же видѣть причину работы, если мы откажемся опредѣлять силу раньше ея? Когда тѣло можетъ пронавести работу или производить ее? Причиною работы мы считаемъ энергію.

7. Тѣло, совершающее работу, совершаетъ ее насчетъ своей энергіи; по мѣрѣ исполненія работы его энергія уменьшается. Только по совершаемой работѣ мы и можемъ судить объ энергіи тѣла, только работою, слѣдовательно, и можно измѣрять энергію.

Тѣло, совершающее работу, измѣняетъ свое состояніе, т. е. различныя его качества измѣняются; на примѣръ, при совершеніи работы иногда оно само движется или движутся его части; такъ часовая гиря опускается, работая надъ часовымъ механизмомъ; часовая пружина разворачивается, когда приводитъ въ движеніе колеса, стрѣлки и друг. части часовъ, останавливаемая треніемъ; въ этихъ случаяхъ перемѣщеніе уже и представляетъ собою явное измѣненіе въ состояніи работающаго тѣла. Болѣе сложные примѣры изложены ниже.

Мы не можемъ себѣ представить такого состоянія физическаго тѣла, хотя бы и работавшаго при насъ, изъ котораго оно не могло бы перейти въ другое, съ дальнѣйшимъ совершеніемъ работы; слѣдовательно, всегда при работѣ тѣла энергія его уменьшается, но она никогда не изсякаетъ вся. Говоря объ энергіи тѣла, мы имѣемъ въ виду лишь ту ея величину, которая выражается въ работѣ, соответствующей переходу тѣла изъ одно состоянія  $A$  въ другое  $A_1$ .

Понятіе о физическомъ тѣлѣ далеко не такъ опредѣленно, какъ понятіе о біологической особи; нерѣдко оно представляетъ собою смѣсь несвязанныхъ частей, какъ воздухъ, какъ многіе минералы; часто и однородное тѣло разсматривается, какъ совокупность равнозначныхъ частицъ; поэтому вѣрнѣе говорить о работѣ, энергіи и состояніи системы тѣлъ; этимъ терминомъ мы часто и будемъ пользоваться.

Отдѣльно отъ вышерассмотрѣнныхъ случаевъ стоятъ тотъ случай, при которомъ въ работающемъ тѣлѣ возмѣщается затрачиваемая имъ энергія; если питаніе энергіей происходитъ какъ разъ съ такою же скоростью, съ какою энергія уходитъ на работу, то энергія тѣла съ работою не уменьшается. Машина, (т. е. работающая система, энергія которой восполняется), работающая въ такихъ условіяхъ, работаетъ съ полною своею мощностью, и эта работа можетъ продолжаться неопредѣленно долго. Расходуя энергію, болѣешую получаемой, машина близится къ остановкѣ; въ обратномъ случаѣ въ ней происходитъ накопленіе энергіи.

**8.** Обращаясь къ отысканію энергіи, какъ основного элемента различныхъ явленій (§ 1), и измѣренію ея величины,

начнемъ со случая тѣла, движущагося по инерціи. Оно способно совершить работу, напр. двигаясь противъ сопротивленій (§ 4), причемъ его скорость уменьшается; слѣдовательно оно обладаетъ энергіею, которая и называется *живою силою* или *кинетическою энергіею* \*). Юнгъ опредѣлялъ работу, совершаемую на счетъ живой силы, измѣряя, до какой глубины, входитъ тѣло въ мягкую глину или сало, вступающее въ нихъ съ извѣстною скоростью. Если на всемъ пути углубленія треніе одинаково и не зависитъ отъ скорости, то эта работа пропорціональна длинѣ углубленія (форм. 1). Юнгъ нашелъ, что тѣло, попадающее въ глину со скоростью вдвое большею, производитъ вчетверо большее углубленіе; кромѣ того оно пропорціонально массѣ тѣла. Слѣдовательно живая сила измѣряется произведеніемъ массы тѣла ( $m$ ) на квадратъ скорости ( $v$ ):

$$\text{живая сила} = \frac{mv^2}{2}.$$

Значеніе дѣлителя 2 выяснится ниже (II, 3).

Если бы мы предоставили тѣлу пройти чрезъ столь тонкій слой, чтобы оно не остановилось въ немъ, но, пройдя его насквозь, обладало бы еще живою силой (напр. выстрѣлъ ядромъ въ броню на вылетѣ), то работа пробиванія была бы равна

$$\frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2},$$

гдѣ  $v_1$  и  $v_2$  означаютъ скорости тѣла при вступленіи и выходѣ изъ пробиваемаго слоя и характеризуютъ два разныхъ состоянія его: до и послѣ совершенія работы.

9. Тѣло, которому есть куда упасть, поднятое надъ поверхностью земли, обладаетъ энергіею; дѣйствительно, падая оно производитъ работу. Если напимѣръ, подвѣсить его на веревкѣ, перекинутой черезъ блокъ, оно при паденіи можетъ поднять другое тѣло, вѣсящее хотя бы немного меньше его, въ предѣлѣ—равное ему по вѣсу. Явленіе это произойдетъ

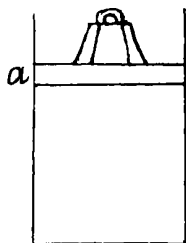
---

\*) Названіе: живая сила, *vis viva* принадлежитъ Лейбницу (1695 г.); ньютоновскую силу онъ называлъ *vis mortua*, мертвая сила. Общность слова сила въ обоихъ терминахъ послужила, говоритъ Планкъ, неизсякаемымъ источникомъ заблужденій и споровъ до половины XIX в.

въ такомъ предѣльномъ видѣ, если обоимъ тѣламъ придать заранѣе равныя скорости, и если блокъ и веревка не представляютъ никакого сопротивленія движенію; тогда уменьшеніе энергіи падающаго тѣла будетъ въ точности равно работѣ поднятія груза. Такъ какъ этотъ грузъ вѣситъ столько же, сколько падающее тѣло, и поднимется на такую же высоту, на какую это послѣднее упадетъ, то мы можемъ сказать, высчитавъ работу поднятія, что уменьшеніе энергіи при паденіи тѣла вѣсомъ  $P$  кило съ высоты  $H$  мт., равно  $P \times H$  к.-мт.

Энергія поднятаго тѣла называется энергіею *положенія* или *потенціальною*. Мы видимъ, что величина ея очень легко вычисляется, если указано, на какую высоту тѣло можетъ упасть, т. е. указана та разница состояній, какая произойдетъ при работѣ тѣла.

Энергіей обладаетъ газъ, сжатый какимъ нибудь грузомъ (черт. 1) подъ поршнемъ  $ab$  цилиндра. Если мы будемъ мало



Черт. 1.

по малу уменьшать \*) грузъ, газъ каждый разъ будетъ выталкивать поршень все дальше на величину, соответствующую оставшемуся давленію. Двигая поршень, онъ будетъ совершать работу, и его энергія будетъ уменьшаться. Чтобы измѣрить наиболѣе просто это измѣненіе энергіи между двумя какими-нибудь положеніями поршня  $h_1$  и  $h_2$ , слѣдуетъ предположить, что не тратится работы на треніе поршня о стѣнки цилиндра, и что уменьшеніе груза производится безконечно постепенно; тогда поршень будетъ двигаться безконечно медленно (подъ дѣйствіемъ безконечно малой разницы упругости газа и уменьшеннаго груза), и не будетъ тратиться работы на его ускореніе. Вся работа газа пойдетъ на поднятіе груза, давящаго на поршень.

Чтобы ее высчитать, мы разобьемъ все явленіе на безконечно малыя части (§ 4) и вычислимъ работу для каждой

---

\*) Уменьшать, п. ч. съ увеличеніемъ объема газа, его давленіе все уменьшается.