

621.1
P69

ОБЩЕ ЗАКОНЫ
ТЕРМОДИНАМИКИ

ВЪ ПРИМѢНЕНИИ КЪ ВОПРОСУ

О РАБОТѢ
ТЕПЛОВЫХЪ ДВИЖИТЕЛЕЙ.

ИЗЛОЖИЛЪ

А. Романовъ,

инженеръ путей сообщенія.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

Типографія Министерства Путей Сообщенія (А. Бенке), Фонтанка, 99.

1884.

1891

Академія наук
Технічна література
Дата 2004

621.1
P 69

ОБЩЕ ЗАКОНЫ
ТЕРМОДИНАМИКИ

ВЪ ПРИМѢНЕНІИ КЪ ВОПРОСУ

О РАБОТѢ

ТЕПЛОВЫХЪ ДВИЖИТЕЛЕЙ.

ИЗЛОЖИЛЪ

А. Романовъ,

инженеръ путей сообщенія.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

Типографія Министерства Путей Сообщенія (А. Бенке), Фонтанка, 99.

1884.

1975

БИБЛИОТЕКА
Белорускаго
института инженеров
железнодорожнаго

399986

ОБЩІЕ ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

ВЪ ПРИМѢНЕНІИ КЪ ВОПРОСУ

О РАБОТѢ ТЕПЛОВЫХЪ ДВИЖИТЕЛЕЙ.

Содержаніе: Работа и энергія.—Принципъ работы—вѣчное движеніе невозможно.—Неуничтожаемость энергіи.—Первый законъ термодинамики.—Механическій эквивалентъ теплоты.—Парообразованіе.—Работа пара внѣшняя и внутренняя.—Паръ сухой и влажный.—Работа паровой машины съ сухимъ паромъ и при различныхъ степеняхъ расширенія.—Воздушная обратимая машина и цѣль операций.—Второй законъ термодинамики.—Принципъ *Carnot*.—Параллель между тепловыми машинами и вододѣйствующими.—Работа совершенныхъ тепловыхъ машинъ разнаго рода.—Потери полезнаго дѣйствія въ паровыхъ машинахъ.—Недостатки воздушныхъ машинъ.—Газовые движители.—Заключеніе.

Когда сила преодолеваетъ на извѣстномъ протяженіи сопротивленіе, мы говоримъ, что она совершаетъ работу, и эта работа равна произведенію изъ сопротивленія на пройденный путь, причемъ направленія ихъ должны совпадать, т. е. упомянутое произведеніе слѣдуетъ еще умножить на \cos угла между направленіями пути и сопротивленія *).

Способность совершать работу называется энергіей, и тѣло или система тѣлъ, имѣющихъ эту способность, какъ говорятъ, обладаетъ энергіей **). Энергія не существуетъ отдѣльно отъ вещества, но проявляется посредствомъ него совершенно независимо отъ его свойствъ. Подобно веществу, энергія можетъ измѣряться количественно и такъ-же, какъ и вещество, не уничтожается.

*) *Coriolis* и *Poncelet*.

***) *Young* (1807).

Въ механикѣ различаютъ два вида энергіи: энергію положенія и энергію движенія—иначе называемыя потенциальной энергіей и кинетической энергіей *). Простейшіе примѣры ихъ представляютъ поднятый грузъ и вращающійся маховикъ: оба они обладаютъ способностью совершать работу,—первый въ силу своего положенія на известной высотѣ надъ поверхностью земли, а второй въ силу своего движенія.

Если сила только-что достаточна для побѣжденія сопротивленія, затрата энергіи точно равна производимой работѣ, и это справедливо не только для одной силы, приложенной непосредственно, но и для какаго угодно числа силъ, приложенныхъ при посредствѣ какой угодно сложной машины. Такъ что во всѣхъ случаяхъ, когда силы только-что уравниваютъ сопротивленіе, можно сказать, что затрата энергіи = работѣ.

Это принципъ работы въ примѣненіи къ силамъ въ равновѣсіи. Въ этомъ случаѣ онъ тождественъ съ болѣе раннимъ принципомъ возможныхъ скоростей.

Однако, рѣдко бываетъ, чтобы приложенныя силы въ точности уравнивали побѣждаемое сопротивленіе. Предположимъ, что приложенныя силы больше, тогда неуравновѣшенная часть этихъ силъ заставляетъ части машины двигаться все быстрее и быстрее, и такимъ образомъ увеличиваетъ энергію движенія ихъ; слѣдовательно, энергія, затрачиваемая приложенными силами, не вся употребляется на работу, а частью еще на увеличеніе кинетической энергіи частей машины. Въ этомъ случаѣ принципъ работы принимаетъ видъ:

затрата энергіи = работѣ + кинетическая энергія, накопленная въ движущихся частяхъ машины.

Если допустить отрицательное накопленіе энергіи, то выраженіе это будетъ обнимать и тотъ случай, когда приложенныя силы сами по себѣ недостаточны для побѣжденія сопротивленія, такъ что часть работы производится на счетъ кинетической энергіи движущихся частей.

Выраженіе „накопленная энергія“ подразумѣваетъ, что энергія, употребленная на измѣненіе скорости частицы или машины, не потеряна, но просто передана частицѣ или машинѣ, и существуетъ

*) *Rankine* — potential energy (force vive latente — *Carnot-отель*) и actual energy (kinetic energy по *W. Thomson*'у).

здѣсь въ видѣ кинетической энергіи, или энергіи движенія. Затѣмъ, если работа состоитъ въ подъемѣ грузовъ или въ другихъ подобныхъ операціяхъ, затраченная энергія также, очевидно, не теряется, но существуетъ въ поднятыхъ грузахъ, которые при паденіи могутъ совершать работу, или обладаютъ потенциальной энергіей, совершенно равной работѣ, затраченной на подъемъ ихъ. Ограничиваясь подобными операціями, можно сказать, что энергія при затратѣ не уничтожается, но переносится просто отъ одного тѣла къ другому.

На дѣлѣ, однако, всегда извѣстная часть работы, а во многихъ случаяхъ и вся работа состоитъ изъ механическихъ операцій, при которыхъ энергія, повидимому, теряется. Какъ на главный примѣръ, можно указать на треніе. Если тереть одну поверхность о другую, то работа будетъ состоять въ побѣжденіи тренія. При этомъ, конечно, будетъ имѣть мѣсто извѣстный износъ, и можно было-бы представить себѣ, что извѣстную часть энергіи можно получить обратно, если привести соскобленные частицы въ ихъ первоначальное положеніе, но можно съ увѣренностью сказать, что эта часть энергіи сравнительно невелика. А потому, если ограничимся областью чисто механическихъ операцій, то, не выходя за предѣлы ея, мы можемъ сказать только, что энергія не можетъ создаваться изъ ничего, а должна получаться изъ нѣкотораго запаса существующей уже энергіи, но мы еще не вправѣ утверждать, что энергія не уничтожается. Въ такомъ объемѣ *принципъ работы* одинаковъ съ положеніемъ, что *вѣчное движеніе невозможно (perpetuum mobile)*. Этотъ принципъ, принимаемый теперь за аксіому, былъ формулированъ *Poncelet* *).

Въ настоящее время, однако, мы идемъ гораздо далѣе, такъ какъ мы знаемъ, что механическая энергія только одинъ изъ многихъ видовъ, въ которыхъ можетъ существовать энергія. Мы знаемъ, что въ тѣхъ процессахъ, гдѣ механическая энергія, повидимому, теряется, она въ дѣйствительности преобразовывается въ тотъ или другой изъ этихъ видовъ, и если принять въ расчетъ всѣ результаты разсматриваемыхъ процессовъ, то оказывается, что исчезнувшая энергія вовсе не потеряна, а только перенесена отъ одного тѣла къ другому и измѣнилась по виду, но не по существу.

Однимъ изъ главныхъ видовъ, въ которые способна преобразовываться механическая энергія, является теплота. Мы не станемъ слѣдить шагъ за шагомъ, какъ развилась идея о томъ, что теплота

*) *Mécanique industrielle*, 1839.

и механическая энергія—количества однородныя, способныя превращаться другъ въ друга. Отношенія между работою и теплою составляютъ предметъ термодинамики, и первый законъ ея *) состоитъ въ томъ, что

теплота и механическая энергія могутъ превращаться другъ въ друга, причемъ единица теплоты соотвѣтствуетъ извѣстное определенное количество работы, называемое механическимъ эквивалентомъ теплоты.

Мы знаемъ изъ обыденнаго опыта, что когда механическая энергія тратится на побѣжденіе тренія, то происходитъ нагрѣваніе, и только-что высказанный законъ говоритъ намъ, что теплота эта ничто иное, какъ израсходованная энергія въ иномъ видѣ. Если сдѣлать допущеніе, во многихъ случаяхъ очень близкое къ дѣйствительности, а именно, что поверхности остаются въ прежнемъ состояніи, то затрачиваемая энергія будетъ въ постоянномъ отношеніи къ производимой теплотѣ. Это постоянное отношеніе будетъ механическимъ эквивалентомъ теплоты и его можно опредѣлить, сравнивая произведенную теплоту съ затраченной на треніе энергіей.

Первая попытка установить связь между работою и теплою была сдѣлана, въ концѣ прошлаго столѣтія, *Rumford*'омъ въ его знаменитыхъ опытахъ надъ теплою, развиваемою при сверленіи пушки, но первымъ точнымъ опредѣленіемъ механическаго эквивалента теплоты мы обязаны *Joule*'ю. Исслѣдованія свои, начатыя въ 40-хъ годахъ, *Joule* продолжалъ и до послѣдняго времени. Изъ опытовъ надъ треніемъ жидкостей имъ получено, какъ самое вѣроятное, число

$$J = 424,5 \text{ килогр.-метр.}$$

если за единицу теплоты (калорію) принять количество ея, необходимое для того, чтобы нагрѣть на $1^{\circ}C$ килограммъ воды, взятой при температурѣ между 0° и $4^{\circ}C$.

Недавніе и весьма тщательные опыты *H. F. Weber*'а и *Rowland*'а показываютъ однако, что число это должно быть нѣсколько больше, и для выкладокъ можно принимать

$$J = 430 \frac{\text{килогр.-метр.}}{\text{килогр.-калор.}}$$

или, точнѣе, въ абсолютной системѣ *C. G. S.* (сантиметръ-граммъ-секунда)

*) *Mayer, Colding, Joule.*

$$J = 42 \cdot 10^6 \frac{\text{эрг.}}{\text{гр.-калор.}} *).$$

Разъ теплота и механическая работа только различные виды одного и того-же, отсюда слѣдуетъ, что количества теплоты можно выражать въ килограмметрахъ или эргахъ, и обратно, количества работы можно выражать въ единицахъ теплоты (калоріяхъ). Такъ, напримѣръ, паровая лошадь даетъ въ часъ

$$75.60.60 = 270,000 \text{ килогр.-метр.}$$

или иначе около:

$$\frac{270,000 \times 100000 \times 981}{42 \times 10^6 \times 1000} = 630 \text{ ед. тепл. (больш. калор.).}$$

Теперь, имѣя въ рукахъ механическій эквивалентъ теплоты, обратимся къ паровымъ машинамъ. Какъ и при всякой трудной и сложной задачѣ, мы должны будемъ начать съ самыхъ простыхъ случаевъ, и затѣмъ уже перейдемъ къ болѣе сложнымъ, чтобы имѣть дѣло не со всѣми трудностями заразъ. Эти простые случаи создаются нами иногда только въ воображеніи, посредствомъ выдѣленія извѣстнаго числа причинъ, осложняющихъ задачу въ дѣйствительности.

Возьмемъ случай, когда машина работаетъ безъ отсѣчки, т. е. паровпускное окно открыто въ теченіе всего хода поршня. При этомъ мы предположимъ, что паръ притекаетъ равномерно, и давленіе его постоянно равно давленію въ котлѣ. Для простоты предположимъ даже, что масса воды, расходуемая за одинъ ходъ поршня, помещена въ самый цилиндръ и уже здѣсь посредствомъ нагрѣванія обращается въ паръ. Наконецъ, предположимъ еще, что масса воды какъ разъ равна единицѣ (одному килограмму), а температура ея $0^{\circ}C$.

Если станемъ нагрѣвать эту воду, температура ея повышается. Расширеніе воды при этомъ ничтожно, и можно сказать, что поршень остается неподвижнымъ до тѣхъ поръ, пока мы не достигнемъ нѣкотораго предѣльнаго значенія температуры, различнаго для разныхъ давленій на поршень. При этомъ предѣльномъ значеніи температура, не смотря на продолжающееся нагрѣваніе, остается постоянной, и начинается образованіе пара. вмѣстѣ съ этимъ, по мѣ-

*) Эргъ—единица работы и энергіи—не зависитъ отъ мѣста, т. е. отъ ренія силы тяжести g между тѣмъ какъ килограмметръ для разныхъ g на поверхности земли можетъ быть неодинаковъ. 1 граммо-сантим. = 1 килогр.-метръ = $100,000 g$ эрг., и g въ среднемъ можно принять сантиметру.

испарения воды, по мере ее поднимается все выше и выше. Наконец, когда вся вода обратится в пар, мы удаляем источник теплоты.

Если бы мы хотели продолжать нагревание, то температура пара стала бы повышаться, а пар расширялся еще, и плотность его уменьшалась. Этот пар называется *сверхнагретым*, в отличие от *насыщенного*, обладающего наибольшей плотностью при данном давлении и температурѣ.

Такъ какъ въ котлѣ паровой машины вода никогда всѣмъ не обращается въ паръ, то часть, состоящая изъ достаточнаго паръ не перерукай, а насыщеннаго.

Относительно насыщеннаго пара имѣются такія слѣдствія: образное вѣе опыта *Regault*, предпринятое въ 49-хъ годахъ, по порученію французскаго правительства, имѣло съ собою опредѣлить численную даннаго, необходимая для расчетовъ по паровымъ и другимъ тепловымъ машинамъ.

Regault опредѣлилъ опытами зависимость между температурою и давлениемъ насыщеннаго пара, а также количества теплоты, необходимая для нагреванія и испаренія воды *)).

Если принять за единицу теплоты (калорію) количество теплоты, необходимое для того, чтобы нагрѣть на 1°C единицу массы воды, взятой при температурѣ между 0° и 4° (наибольшей плотности воды), то для повышенія температуры этой массы воды отъ 0° до $t^{\circ}\text{C}$ нужно количество теплоты, выражающееся въ предѣлахъ опыта *Regault* (т. е. немного давленіе 210^в) формулою:

$$q = t + 0,0002 t^2 + 0,000002 t^3.$$

Если нагреваніе продолжается до тѣхъ поръ, пока температура не достигнетъ предѣльнаго значенія, когда начинается образованіе пара, то, чтобы при этой температурѣ t обратить всю воду въ паръ, будетъ истрачено количество теплоты, называемое *скрытою теплою испаренія* и равное

$$r = \lambda - q$$

причемъ

$$\lambda = 606,5 + 0,325t \text{ едн. тепл.}$$

и называется *полною теплою испаренія*.

Для опредѣленія работы, совершаемой паромъ при своемъ образованіи, необходимо знать его объемъ при данномъ давленіи и температурѣ, или, иначе, плотность насыщеннаго пара.

Опытъ *Regault* не даетъ этой величины, но для опредѣленія

*) *Mémoires de l'Académie des Sciences de Paris*, т. XXI, 1847.

ея были произведены опыты *Tate*'омъ и *Unwin*'омъ, подъ руководствомъ *Fairbairn*'а. Результаты этихъ опытовъ довольно хорошо согласуются съ величинами, полученными вычисленіемъ на основаніи теоретическихъ соображеній термодинамики и помѣщенными въ таблицахъ *Zeuner*'а *).

Если означимъ объемъ воды σ (0,001 куб. м.), а s объемъ насыщеннаго пара, получающагося изъ этой воды при давленіи p килограммовъ на кв. метръ поверхности поршня, равной ω кв. метровъ, тогда

$$\text{объемъ пара} = \omega h$$

$$\text{объемъ воды} = \omega h_0$$

и поршень поднимается на высоту $h - h_0$, побѣждая давленіе $p\omega$, поэтому паръ совершаетъ работу:

$$\text{работа пара} = p\omega (h - h_0) = p (s - \sigma) = pu,$$

гдѣ $u = s - \sigma$ и можетъ приниматься $= s$, такъ какъ σ обыкновенно очень мало сравнительно съ s .

Возьмемъ, для примѣра, паръ упругости въ 4 атм. или при давленіи $4 \times 10,334 = 41,336 \frac{\text{кил.}}{\text{кв. м.}}$, чему соотвѣтствуетъ температура кипѣнія 144°C . Полная теплота испаренія будетъ

$$\lambda = 606,5 + 0,305 \cdot 144 = \text{около } 650 \text{ ед. тепл.},$$

а скрытая

$$r = \lambda - q = \text{около } 506 \text{ ед. тепл.}$$

и такъ какъ плотность или вѣсъ куб. метра такого пара $= 2,23$ кил., слѣдовательно, объемъ одного килограмма пара $= 0,448$ куб. м., то

$$\text{работа} = 41336 \cdot 0,447 \cdot \frac{1}{430} \text{ ед. тепл.}$$

$$= \text{около } 43 \text{ ед. тепл.}$$

Насъ невольно поражаетъ огромная разница между израсходованной теплотой и полученной работой, такъ какъ тепловой эквивалентъ работы составляетъ только небольшую долю теплоты, затраченной на обращеніе воды въ паръ. То-же самое найдемъ и для другихъ давленій и температуръ.

Принципъ работы говоритъ намъ, что работа не можетъ получаться изъ ничего, но должна совершаться на счетъ эквивалентнаго

*) Grundzüge der mechanischen Wärmetheorie. 2-te Aufl. 1866.

количества теплоты, которая исчезает, а вышеприведенныя числа показываютъ, что теплота, исчезающая такимъ путемъ, сравнительно мала, и что большая часть теплоты уходитъ на производство измененийъ *внутри* самой воды.

Такимъ образомъ, мы дошли до чрезвычайно важнаго заключенія, а именно, что работа можетъ состоять не только въ подъемѣ грузовъ или другихъ подобныхъ операціяхъ, гдѣ преодолеваемыя сопротивленія ясно уловимы для нашихъ чувствъ, но также въ побѣжденіи сопротивленій, обусловливаемыхъ частичными силами, — сопротивленій, такъ сказать, незримыхъ и незамѣтныхъ для нашихъ чувствъ, а заявляющихъ о себѣ только своими результатами. Такъ, въ нашемъ примѣрѣ разность между 506 и 43, равная 463, представляетъ въ тепловыхъ единицахъ работу, затраченную на преодоленіе частичнаго сдѣвленія, препятствующаго обращенію воды въ паръ. Работа, совершаемая такимъ путемъ, называется *внутренней работой*, потому что измѣненія совершаются внутри самаго тѣла, — въ противоположность чему работа, состоящая въ подъемѣ поршня, называется *внѣшней работой*.

Если предположимъ, что не вся вода обращена въ паръ, а только доля ея x (по вѣсу), тогда удѣльный объемъ (т. е. единицы вѣса) такой смѣси будетъ

$$\begin{aligned} v &= xs + (1 - x) \sigma \\ &= x(s - \sigma) + \sigma = xv + \sigma \end{aligned}$$

Эта величина x , показывающая содержаніе сухаго пара, можетъ быть названа *степенью сухости* пара.

Паръ, доставляемый котломъ, всегда болѣе или менѣе влаженъ, и если предположимъ, напр., что онъ содержитъ 10% воды въ облачномъ (пузырчатомъ) состояніи, тогда $x = 0,9$, и удѣльный объемъ такого пара

$$v = 0,9v + \sigma.$$

Внѣшняя работа въ этомъ случаѣ будетъ

$$\text{внѣшняя работа} = p(v - \sigma) = x \cdot pv$$

т. е. внѣшняя работа будетъ составлять только долю x той работы, которая получилась-бы при совершенно сухомъ парѣ. Расходъ теплоты во время испаренія будетъ теперь, очевидно, xq , и потому отношеніе его къ внѣшней работѣ не измѣнится. Но для нагрѣванія воды отъ 0° потребуетъ, какъ и прежде, q единицъ теплоты, а потому этотъ случай будетъ еще менѣе экономиченъ.

Теперь мы рассмотримъ случай, который подходилъ-бы ближе къ дѣйствительности, и былъ-бы даже болѣе благоприятнымъ отно-

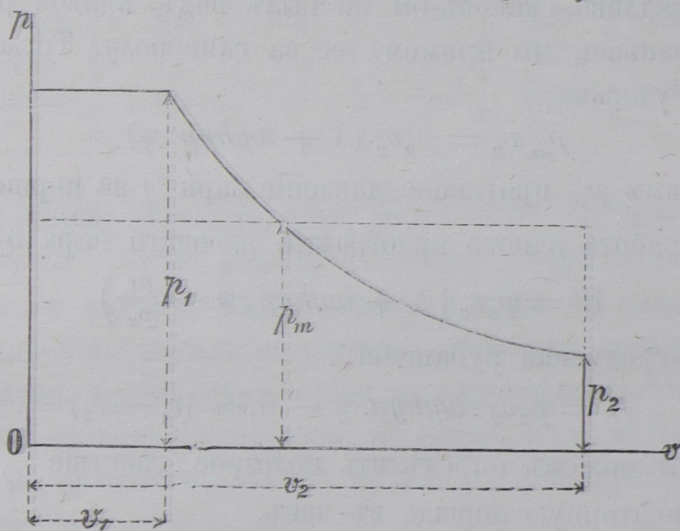
сительно пользованія теплою. Для этого мы возьмемъ машину съ расширеніемъ, холодильникомъ и паровою рубашкою.

Теплота, расходуемая машиной, и здѣсь прежде всего, конечно, затрачивается на испареніе воды въ котлѣ; но она, однако, расходуется затѣмъ не вся одинаково. При паровой рубашкѣ часть пара осаждается въ рубашкѣ, расходуя теплоту, но ни малѣйшая доля этого пара не проходитъ черезъ машину. Рубашка употребляется, чтобы ослабить потери отъ охлажденія стѣнокъ цилиндра, во время выпуска пара.

Расходъ теплоты рубашкой можно опредѣлить, если мы знаемъ состояніе пара въ концѣ хода поршня. Мы примемъ, что теплоты доставляется рубашкой какъ разъ столько, что паръ, приходящій сухимъ изъ котла, остается сухимъ и въ концѣ хода.

Въ этомъ случаѣ, какъ показываетъ опытъ, можно принимать, что произведеніе давленія и объема пара остается постояннымъ во время расширенія, т. е. послѣ отсѣчки измѣненія давленія и объема происходятъ по гиперболѣ.

Тогда, замѣняя индикаторную площадь прямоугольникомъ,



найдемъ

$$p_m v_2 = p_1 v_1 + p_1 v_1 \log_{\text{hyp}} \frac{v_2}{v_1} *)$$

откуда

$$p_m = p_1 \frac{1 + \log_{\text{hyp}} \varphi}{\varphi}$$

гдѣ p_1 начальное давленіе пара, p_m среднее за весь ходъ поршня, а φ степень расширенія $= \frac{v_2}{v_1} = \frac{p_1}{p_2}$.

*) Такъ какъ $pv = \text{const} = p_1 v_1$, то площадь, ограниченная гиперолой, будетъ равна

$$\int_{v_1}^{v_2} p dv = p_1 v_1 \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = p_1 v_1 \log_{\text{hyp}} \frac{v_2}{v_1}$$

Если бы паръ доставлялся изъ котла такимъ, какимъ онъ является въ концѣ хода поршня, тогда работа его была бы $p_2 v_2$, гдѣ v_2 объемъ цилиндра. Полная теплота испаренія такого пара отъ t_0 , температуры питающей воды, до t_2 была бы $\lambda_2 - q_0$. Дѣйствительный расходъ теплоты будетъ теперь больше на тепловой эквивалентъ разности между $p_m v_2$ и $p_2 v_2$, слѣдовательно полный расходъ теплоты будетъ:

$$Q = \lambda_2 - q_0 + \left(\frac{p_m}{p_2} - 1 \right) p_2 v_2$$

Если мы отсюда вычтемъ $\lambda_1 - q_0$, теплоту, затрачиваемую въ котлѣ на каждый килограммъ рабочаго пара, то добавочный расходъ на него рубашкою будетъ:

$$\begin{aligned} H &= \lambda_2 - \lambda_1 + \left(\frac{p_m}{p_2} - 1 \right) p_2 v_2 \\ &= \left(\frac{p_m}{p_2} - 1 \right) p_2 v_2 - 0,305 (t_1 - t_2) \end{aligned}$$

а если раздѣлимъ эту величину на $\lambda_1 - q_0$, то опредѣлимъ, сколько килограммовъ пара расходуетъ въ паровой рубашкѣ на каждый килограммъ рабочаго пара.

Это справедливо, каковъ бы ни былъ видъ кривой расширенія, но, какъ и раньше, мы примемъ ее за гиперболу. Тогда затраченная энергiя будетъ:

$$p_m v_2 = p_2 v_2 (1 + \log_{hyp} \varphi)$$

и если означимъ p_r противное давленіе пара *) на поршень, то дѣйствительная работа одного килограмма рабочаго пара будетъ:

$$W = p_2 v_2 \left(1 + \log_{hyp} \varphi - \frac{p_r}{p_2} \right)$$

а теплота, расходующая рубашкою:

$$H = p_2 v_2 \cdot \log_{hyp} \varphi - 0,305 (t_1 - t_2)$$

Теперь мы можемъ опредѣлить полезное дѣйствіе $\frac{W}{Q}$ и расходъ пара на индикаторную лошадь въ часъ.

Предположимъ для примѣра, что начальное давленіе (т. е. въ котлѣ) = 6,5 атм. (абсолютн.), а температура питающей (конденсационной) воды 40° С.; давленіе въ холодильникѣ будетъ нѣсколько выше того, которое соотвѣтствуетъ этой температурѣ, вслѣдствіе присутствія извѣстнаго количества воздуха, а средняя величина противнаго давленія будетъ еще увеличиваться вслѣдствіе обстоятельствъ, мѣшающихъ выпуску пара. Поэтому мы примемъ $p_r = 0,2$ атм. **).

*) Подобно тому, какъ называютъ противнымъ вѣтеръ, дующій на встрѣчу.

**) Обыкновенно 0,15 — 0,3 атм.

Тогда получимъ

$$\begin{aligned} \text{полн. тепл. испар.} &= \lambda_1 - q_0 = \text{около } 656 - 40 \\ &= \text{около } 616 \text{ ед. тепл.,} \end{aligned}$$

а затѣмъ по вышеприведеннымъ формуламъ и по таблицамъ *Zeuner*'а найдемъ дѣйствительную работу одного килограмма пара (W), расходъ на индикаторную лош. въ часъ: рабочаго пара ($\frac{630}{W}$ килогр.) и рубашки ($\frac{H}{\lambda_1 - q_0} \cdot \frac{630}{W}$), — и полезное дѣйствіе ($\frac{W}{Q}$).

Работа паровой машины съ сухимъ паромъ и при различныхъ степеняхъ расширенія.

Степень расширенія	Дѣйств. раб. на кил. рабоч. пара въ едип. теплоты	Расходъ пара въ килогр. на инд. лош. въ часъ			Полезное дѣйствіе	Примѣчанія
		рабоч. пара	рубашки	ИТОГО		
нѣтъ	43,49	14,49	0,00	14,49	0,070	Машина съ холодильникомъ и съ паровою рубашкой. Начальное давленіе пара (абсол.) 6,5 атм.; противное 0,2 атм. Потери выпуска не приняты въ расчетъ.
1,3	54,00	11,67	0,16	11,83	0,087	
2	70,26	8,97	0,32	9,29	0,110	
3	84,42	7,46	0,41	7,87	0,130	
5	100,20	6,28	0,50	6,78	0,151	
10	117,45	5,37	0,60	5,97	0,172	
полное	127,98	4,92	0,77	5,69	0,180	

Подъ полнымъ расширеніемъ разумѣется здѣсь то, когда паръ въ концѣ хода поршня имѣетъ давленіе, равное противному.

Отсюда мы видимъ, что полезное дѣйствіе съ увеличеніемъ степени расширенія сначала возрастаетъ довольно сильно, напримѣръ при пятерномъ болѣе, чѣмъ вдвое сравнительно съ тѣмъ, когда машина работаетъ безъ расширенія; но затѣмъ все слабѣе. Въ дѣйствительности же, при значительныхъ степеняхъ расширенія, будетъ даже не выигрышъ, а положительная потеря, главнымъ образомъ отъ вреднаго вліянія стѣнокъ цилиндровъ.

Итакъ, мы видимъ, что, даже при самыхъ благопріятныхъ условіяхъ, въ механическую работу паровая машина превращаетъ *меньше* $\frac{1}{5}$ всей израсходованной теплоты.

Естественно является вопросъ, отъ какихъ-же причинъ зависитъ подобный неблагопріятный результатъ, и если нельзя устранить этихъ причинъ въ случаѣ паровой машины, то для производства работы помощію теплоты не прибѣгнуть-ли къ машинѣ какого-нибудь другого рода.

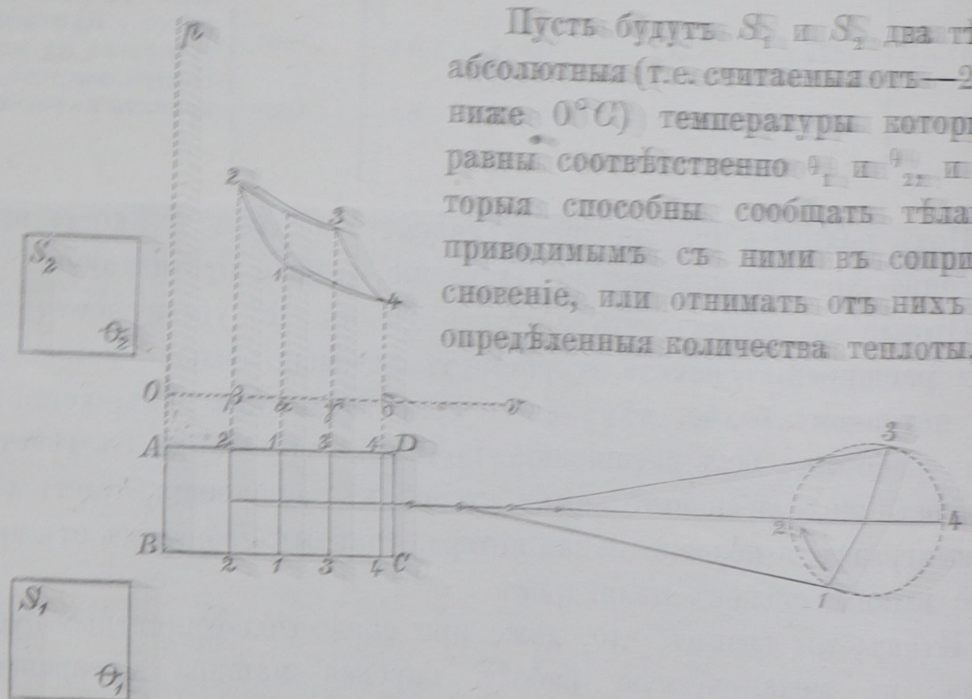
Прежде, чем приступить къ изслѣдованію вопроса въ общемъ видѣ, рассмотримъ еще простѣйшій случай тепловой машины, работающей при посредствѣ совершеннаго газа.

Совершенный газъ, въ которомъ довольно близко подходитъ обыкновенный атмосферный воздухъ, характеризуется тѣмъ, что неизмѣнен его составъ, т. е. давленія (p), объема (v) и температура ($t^{\circ}C$ или $\theta = t + 273$), поско удельнаго веса закону *Mariotte* и *Gay-Lussac* за:

$$pv = a(t + 273) = a\theta$$

и его теплоемкости, т. е. количества теплоты для нагреванія единицы массы на $1^{\circ}C$, какъ при постоянномъ давленіи (c_p), такъ и при постоянномъ объемѣ (c_v), остаются неизмѣнными, какова-бы ни была величина объема въ первомъ случаѣ и давленія во второмъ, или иначе, какова-бы ни была температура газа.

Пусть будетъ AC рабочий цилиндръ, и въ немъ, между крышкой AB и поршнемъ, находится навсегда заключеннымъ данное количество газа, напр. 1 килограммъ. Правая-же сторона цилиндра, между поршнемъ и крышкой, пуста.



Пусть будутъ S_1 и S_2 два тѣла, абсолютныя (т. е. считаемыя отъ -273° ниже $0^{\circ}C$) температуры, которыхъ равны соответственно θ_1 и θ_2 , и которыя способны сообщать тѣламъ, приводимымъ съ ними въ соприкосновеніе, или отнимать отъ нихъ неопредѣленные количества теплоты, не

испытывая никакого замѣтнаго измѣненія температуры. Предположимъ, что мотыль движется по часовой стрѣлкѣ, а поршень изъ положенія 1,1 налѣво, и пусть p_1, v_1, θ_1 будутъ давленіе, объемъ и температура газа, соответствующіе этому положенію. При передвиженіи поршня газъ будетъ тогда сжиматься, не получая извнѣ и не отда-

вая наружу теплоты, пока поршень не придетъ, положимъ, въ 2,2, приче́мъ объе́мъ и давлéнiе сдѣлаются v_2 , p_2 , а температура возрастетъ до θ_2 . Зависимость между объе́момъ и давлéниемъ, при этомъ передвиженiи поршня, выражаться будетъ нѣкоторою кривою 1,2, называемою адиабатой (т. е. нулевой передачи тепла).

Затѣмъ, по мѣрѣ передвиженiя поршня направо, объе́мъ газа возрастаетъ, и если-бы ему не сообщать теплоты, температура его стала-бы падать, но это предупреждается тѣмъ, что приводятъ тѣло S_2 въ соприкосновенiе съ цилиндромъ. Цилиндръ предполагается совершеннымъ проводникомъ, такъ что малѣйшее пониженiе температуры газа за θ_2 заставляетъ теплоту притекать изъ S_2 къ газу, и такимъ образомъ температура газа поддерживается постоянно при θ_2 . Во время этой второй операцiи газъ, слѣдовательно, расширяется при постоянной температурѣ, и кривая расширенiя (изотерма) будетъ, согласно закону *Mariotte'a*, обыкновенная гипербола 2,3.

Когда поршень достигнетъ нѣкотораго пункта 3, тѣло S_2 удаляемъ, и пусть газъ не получаетъ болѣе теплоты извнѣ; съ дальнѣйшимъ расширенiемъ, температура будетъ падать, а не оставаться постоянной, и кривая расширенiя (адиабата) будетъ идти отъ точки 3 до точки 4, когда температура понизится до начальнаго значенiя θ_1 . Это опредѣляетъ на чертежѣ длину хода поршня, а слѣдовательно и длину мотыля.

При движенiи поршня назадъ, газъ будетъ сжиматься, и температура его стала-бы повышаться, но мы предупреждаемъ это, приводя цилиндръ въ соприкосновенiе съ тѣломъ S_1 , температура котораго θ_1 одинакова съ температурой газа въ концѣ хода поршня. Тѣло S_1 отнимаетъ теплоту отъ газа, лишь только температура переходитъ за θ_1 . Такимъ образомъ газъ сжимается при постоянной температурѣ θ_1 , и кривая сжатiя (изотерма) на индикаторной диаграммѣ будетъ обыкновенная гипербола. Сжатiе продолжается до тѣхъ поръ, пока поршень не достигнетъ точки 1. Газъ при этомъ возвращается въ первоначальное свое состоянiе, и процессъ можетъ повторяться сколько угодно разъ.

Такого рода рядъ измѣненiй называется *цикломъ операцiй*, или *круговымъ процессомъ*, потому что жидкость проходитъ циклъ измѣненiй и возвращается опять къ первоначальному своему состоянiю. Понятiе о циклѣ операцiй введено въ науку *Sadi Carnot* и имѣетъ важное значенiе для правильнаго изученiя тепловыхъ машинъ. Благодаря циклу операцiй, намъ нѣтъ надобности заботиться объ опре-

дѣленіи внутренней работы, потому что при каждомъ полномъ циклѣ вся работа будетъ внѣшняя.

Чтобы опредѣлить полезное дѣйствіе рассматриваемой машины, возьмемъ энергію общій случай, когда совершенный газъ, получая тепло, переходитъ изъ состоянія I, въ которомъ давленіе, объемъ и температура его

$$I) p' \quad v' \quad \theta'$$

въ состояніе II, гдѣ эти величины будутъ

$$II) p'' \quad v'' \quad \theta''.$$

Чтобы опредѣлить внутреннюю и внѣшнюю работы, совершаемыя при этомъ, возьмемъ состояніе газа

$$a) p'' \quad v_a \quad \theta$$

и переведемъ энергію газъ изъ состоянія II) въ a), и затѣмъ уже изъ a) въ II).

Переходъ изъ II) въ a) можно осуществить, заставляя газъ расширяться безъ производства внѣшней работы; тогда, какъ то дѣйствительно показываетъ опытъ *Doyle*'а *), температура останется постоянной, а величина v_a опредѣлится отношеніемъ $v_a = \frac{p''}{p'} v''$, теплоты, при этомъ переходѣ мы не затрачиваемъ, а такъ какъ и внѣшней работы не производится, то внутренняя энергія газа остается безъ измѣненія. Отсюда можно заключить также, что внутренняя энергія измѣняется, или иначе, производится внутренняя работа, только при измѣненіи температуры газа.

III) въ самомъ дѣлѣ, если затѣмъ при помощи нагрѣванія, т. е. затраты теплоты, произведемъ переходъ изъ состоянія a) въ II), то получимъ

$$\begin{aligned} \text{внѣшнюю работу} &= p'' (v'' - v_a) \\ &= c_p (v'' - v_a) \end{aligned}$$

а такъ какъ переходъ совершается при постоянномъ давленіи, то затрата теплоты будетъ $c_{p'} (v'' - v_a)$ и слѣд.

$$\text{внутренняя работа} = (c_p - c_v) (v'' - v_a)$$

т. е. пропорціональна измѣненію температуры.

*) Представимъ себѣ два сосуда, соединенныхъ между собой трубкою съ краномъ. Кранъ закрытъ, и одинъ изъ сосудовъ наполняется газомъ, а другой, посредствомъ выкачивания воздуха, сдѣлать, насколько возможно, пустымъ. Если открыть кранъ, воздухъ изъ первого сосуда перейдетъ во второй, расширится, не производя работы, и когда въ обоихъ сосудахъ давленіе воздуха сдѣлается одинаковымъ, температура этого воздуха окажется такою же, какъ и до сообщенія сосудовъ между собою.

въ машинѣ, потому что газъ вполнѣ возвращается въ первоначальное свое состояніе. Слѣдовательно

$$\begin{aligned} \text{работа} &= Q - R \\ &= c \left[\theta_2 \log h_{\text{ур}} \cdot \frac{v_3}{v_2} - \theta_1 \log h_{\text{ур}} \cdot \frac{v_4}{v_1} \right] \end{aligned}$$

и полезное дѣйствіе будетъ:

$$\text{полезное дѣйствіе} = \frac{\text{работ.}}{\text{затр. тепл.}} = \frac{Q-R}{Q}$$

Чтобы найти окончательно значеніе этого выраженія, обратимъ вниманіе на адиабатическія части процесса. Здѣсь теплоты не получается и не отдается, слѣдовательно уравненіе (*) даетъ

$$c_{\theta} \frac{dv}{v} + c_v d\theta = 0$$

или, обозначая для краткости $\frac{c}{c_v} = \gamma$,

$$\gamma \frac{dv}{v} + \frac{d\theta}{\theta} = 0.$$

Интегрируя это уравненіе въ предѣлахъ: для v отъ v_3 до v_4 , а для θ отъ θ_2 до θ_1 , находимъ:

$$\begin{aligned} \left(\frac{v_4}{v_3} \right)^{\gamma} &= \frac{\theta_2}{\theta_1} \\ &= \frac{v_3 p_3}{v_4 p_4} \end{aligned}$$

т. е.

$$\frac{p_3}{p_4} = \left(\frac{v_4}{v_3} \right)^{\gamma+1}$$

и точно также

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{\gamma+1}$$

Кромѣ того для частей 2,3 и 4,1 мы имѣемъ:

$$\frac{p_2}{p_3} = \frac{v_3}{v_2}$$

и

$$\frac{p_4}{p_1} = \frac{v_1}{v_4}.$$

Перемножая эти четыре равенства, получаемъ:

$$1 = \left(\frac{v_4}{v_3} \cdot \frac{v_2}{v_1} \right)^{\gamma}$$

откуда:

$$\frac{v_4}{v_1} = \frac{v_3}{v_2} = \varphi$$

и слѣд. полезное дѣйствіе $\left(\frac{Q-R}{Q} \right)$ будетъ:

$$\text{полезное дѣйствіе} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_2},$$

т. е. равно разности температуръ, между которыми газъ работаетъ, дѣленной на абсолютную температуру источника высшей температуры.

Этотъ результатъ очень важенъ; какъ вскорѣ увидимъ, онъ имѣетъ мѣсто для какой угодно машины, если только она получаетъ и отдаетъ теплоту подобно разобраннымъ нами простому устройству, которое мы и разсматривали именно ради его простоты, хотя оно и неосуществимо на практикѣ.

Это простое устройство обладаетъ еще однимъ чрезвычайно важнымъ свойствомъ.

Предположимъ, что поршень находится въ положеніи 2,2, и пусть валъ вращается теперь обратно часовой стрѣлкѣ. Цилиндръ не соприкасается ни съ S_1 , ни съ S_2 ; тогда воздухъ будетъ расширяться безъ полученія и отдачи теплоты, и на діаграммѣ получена будетъ адиабатная кривая 2,1. Какъ только достигнута будетъ точка 1, приблизимъ тѣло S_1 , чтобы помѣшать температурѣ падать ниже θ_1 ; при дальнѣйшемъ передвиженіи поршня теплота непрерывно будетъ отниматься отъ S_1 , и на діаграммѣ получится гипербола 1,4. Теперь удалимъ тѣло S_1 ,—поршень возвращается назадъ, и получается адиабата 4,3; наконецъ, когда температура поднимется до θ_2 , приближаемъ тѣло S_2 , чтобы помѣшать температурѣ подниматься выше θ_2 , и получаемъ гиперболу 3,2, причемъ теплота непрерывно переходитъ изъ газа въ S_2 .

Весь процессъ и каждый шагъ его представляютъ теперь совершенно обратное тому, что было прежде. Теплота R отнимается отъ S_1 , и теплота Q переходитъ въ S_2 ; въ то-же время не машина производитъ работу надъ внѣшними тѣлами, а напротивъ, къ мотылю необходимо приложить внѣшнюю силу, которая при каждомъ оборотѣ вала совершаетъ работу $Q-R$. Итакъ, вмѣсто перехода теплоты отъ S_2 къ S_1 и обращенія части ея въ механическую работу при этомъ переходѣ, мы теперь, наоборотъ, посредствомъ затраты механической энергіи получаемъ переходъ теплоты отъ S_1 къ S_2 и обращеніе механической энергіи въ теплоту во время этого перехода. Короче сказать, процессъ является *обратимымъ* *), и не только въ своемъ конечномъ результатѣ, но и въ каждой изъ своихъ послѣдовательныхъ фазъ.

Свойство полной обратимости, которымъ обладаютъ нѣкоторые роды тепловыхъ машинъ, имѣетъ громадную важность, какъ увидимъ вскорѣ. Чтобы оно имѣло мѣсто, необходимы и, вѣроятно, достаточны два условія:

во-первыхъ, полученіе теплоты изъ источника и отдача теплоты

*) Фран. *réversible*, нѣм. *umkehrbar*, англ. *reversible*.

охладителю должны происходить при температурахъ, разнящихся незамѣтно отъ температуръ самихъ этихъ тѣлъ;

во-вторыхъ, необходимо, чтобы давленіе упругой жидкости совершенно уравнивалось сопротивленіемъ, которое побѣждается.

Будетъ-ли машина обратима или нѣтъ, можно все-таки представить себѣ, что она работаетъ въ обратномъ направленіи. При этомъ первоначальный источникъ теплоты играетъ роль пріемника теплоты, а первоначальный охладитель становится источникомъ, откуда добывается теплота. А потому при помощи механической энергіи можно теплоту отнять отъ тѣла низкой температуры и перевести ее въ тѣло высокой температуры.

Но вѣдь это, въ сущности, искусственный, не естественный результатъ; когда мы говоримъ о какомъ-нибудь тѣлѣ, какъ о тепломъ, а о другомъ, какъ о холодномъ, то словамъ этимъ нельзя приписывать другаго значенія, кромѣ того, что теплота стремится течь отъ теплаго тѣла въ холодному, и это ей навѣрное удастся, если только не помѣшаетъ какое-нибудь внѣшнее препятствіе. А потому мы совершенно вправѣ сказать, что при естественномъ порядкѣ вещей теплота не переходитъ отъ холоднаго тѣла къ теплomu, если только не заставить ее какая-нибудь внѣшняя причина. Въ этомъ именно и состоитъ второй законъ термодинамики *), а именно:

теплота не можетъ переходить отъ холоднаго тѣла въ теплomu сама собою, безъ соотвѣствующаго возмѣщенія, такъ сказать даровымъ, чисто самодѣйствующимъ процессомъ.

Легко видѣть, какія несообразности повлекло-бы за собою отрицаніе этого принципа, напр., въ теоріи паровыхъ машинъ. Въ самомъ дѣлѣ, вся теплота, затраченная въ котлѣ и не преобразованная въ механическую энергію—т. е. по крайней мѣрѣ $\frac{5}{6}$ всего количества—является въ холодильникѣ и производитъ здѣсь нагрѣваніе конденсаціонной воды, и еслибы возможно было какимъ-нибудь самодѣйствующимъ приспособленіемъ заставить теплоту течь изъ холодильника въ котель, очевидно, что упомянутыя $\frac{5}{6}$ расхода теплоты не пропали-бы. Однако, нельзя сомнѣваться, что это невозможно, и для того, чтобы заставить течь теплоту изъ холодильника въ котель, мы должны прибѣгнуть къ какому-нибудь искусственному процессу,

*) Clausius (въ иномъ видѣ W. Thomson, Rankine).

который, подобно обратной машинѣ, обусловливаетъ расходъ энергіи въ такомъ-же или даже большемъ размѣрѣ, сравнительно съ тѣмъ, сколько можно получить, пользуясь этою теплотою въ котлѣ,— и второй законъ термодинамики просто выражаетъ эту невозможность.

Съ помощью этого закона мы въ состояніи доказать чрезвычайно важную теорему, извѣстную подъ именемъ *принципа Carnot*, и которую можно выразить такъ:

полезное дѣйствіе всѣхъ обратимыхъ машинъ, работающихъ между данными предѣлами температуры, одинаково.

Въ самомъ дѣлѣ, представимъ себѣ двѣ машины I и II, изъ которыхъ сперва мы предположимъ только II обратимою въ вышеуказанномъ смыслѣ, и пусть сила этихъ машинъ будетъ одинакова. Тогда машину I можно употребить на то, чтобы приводить II въ обратное движеніе, и сочетаніе этихъ двухъ машинъ будетъ самодѣйствующимъ, не требуя никакой энергіи извнѣ для своего движенія, но продолжая, разъ пущено въ ходъ, двигаться безостановочно (если пренебречь треніемъ).

Пусть будутъ Q' и R' соотвѣтственно затрата и отбросъ теплоты въ машинѣ I, а Q'' , R'' соотвѣтствующія количества для машины II, такъ что теплота Q' получается машиной I изъ теплаго тѣла, а теплота R' отдается холодному тѣлу, между тѣмъ какъ машина II сообщаетъ теплоту Q'' теплему тѣлу, и отнимаетъ теплоту R'' отъ холоднаго.

Тогда окончательный результатъ работы системы будетъ тотъ, что количество теплоты $Q' - Q''$ отнято отъ теплаго тѣла, и $R' - R''$ передано холодному тѣлу. Но такъ какъ сила машинъ одинакова, то:

$$Q' - R' = Q'' - R''$$

и слѣд.

$$Q' - Q'' = R' - R''$$

такъ что работа системы будетъ имѣть тотъ конечный результатъ, что отъ теплаго тѣла къ холодному перешло количество теплоты $Q' - Q''$.

А такъ какъ система наша самодѣйствующая, то, согласно второму закону термодинамики, Q' не можетъ быть никоимъ образомъ меньше, чѣмъ Q'' , но должно быть или равно, или больше, потому что еслибы Q'' было больше, то теплота $Q'' - Q'$ перешла-

бы отъ холоднаго тѣла къ теплomu, при посредствѣ самодѣйствующаго приспособленія, такъ сказать даровымъ способомъ.

Что-же касается полезнаго дѣйствія машинъ, то у выраженной $\frac{Q'-R'}{Q'}$, $\frac{Q''-R''}{Q''}$ числители равны; откуда мы заключаемъ, что полезное дѣйствіе машины II не можетъ быть меньше, хотя и можетъ быть больше полезнаго дѣйствія машины I:

$$\frac{Q''-R''}{Q''} \geq \frac{Q'-R'}{Q'}$$

Теперь представимъ себѣ, что не только машина II, но и машина I обратима, и пусть сочетаніе ихъ дѣйствуетъ въ направленіи противоположномъ, такъ что II работаетъ въ прямомъ, а I въ обратномъ направленіи. Тогда, очевидно, путемъ такого же разсужденія мы придемъ къ заключенію, что полезное дѣйствіе машины I не можетъ быть меньше, но должно быть равно полезному дѣйствію машины II: слѣдовательно, когда обѣ машины обратимы, ихъ полезное дѣйствіе одинаково.

Сверхъ того мы видимъ, что полезное дѣйствіе необратимой машины не можетъ быть больше, такъ что машина, которая *обратима*, будетъ также давать и *наибольшее полезное дѣйствіе*.

Мы уже имѣли дѣло съ одной изъ обратимыхъ машинъ и нашли, что ея полезное дѣйствіе выражается формулой

$$\frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_2};$$

таково же будетъ, слѣдовательно, полезное дѣйствіе и всевозможныхъ обратимыхъ машинъ, а что касается машинъ необратимыхъ, то ни для одной изъ нихъ полезное дѣйствіе не можетъ быть выше этой величины.

Полученный нами результатъ можно выразить еще нѣсколько иначе, а именно, такъ какъ

$$Q - R = W = Q \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_2},$$

то

$$\frac{R}{\theta_1} = \frac{Q}{\theta_2} \text{ или } \frac{R}{Q} = \frac{\theta_1}{\theta_2},$$

т. е. когда теплота затрачивается на работу обратимой машины, часть ея $\frac{\theta_1}{\theta_2}$ просто переходитъ черезъ машину изъ источника къ охладителю, не превращаясь въ механическую работу; а если машина необратима, то эта доля можетъ быть еще больше, но ни въ какомъ случаѣ не меньше.

Теперь мы можем сдѣлать нѣкоторыя общія заключенія относительно тепловыхъ машинъ съ наибольшимъ полезнымъ дѣйствіемъ, или, если можно такъ выразиться, *совершенныхъ* тепловыхъ машинъ.

Каждое повтореніе ряда измѣненій, претерпѣваемыхъ жидкостью, представляетъ, по крайней мѣрѣ, четыре періода:

1) расширение при постоянной температурѣ, сопровождаемое получениемъ теплоты отъ источника;

2) расширение при пониженіи температуры, безъ получения или отдачи теплоты;

3) сжатіе при постоянной температурѣ, сопровождаемое отнятіемъ теплоты;

4) сжатіе при повышеніи температуры, безъ получения и безъ отдачи теплоты.

Въ паровой машинѣ 1-й періодъ, это — испареніе воды въ котлѣ, 2-й — расширение пара въ цилиндрѣ, 3-й — осажденіе въ холодильникѣ, а 4-й — нагнетаніе воды въ котель. Но обыкновенная паровая машина не представляетъ собою совершенной машины, а потому ни одинъ изъ этихъ періодовъ, кромѣ перваго, не удовлетворяетъ условіямъ, необходимымъ для наибольшаго полезнаго дѣйствія, и даже первый бываетъ обыкновенно несовершеннымъ на практикѣ.

Чтобы сдѣлать вышеприведенныя разсужденія болѣе наглядными, проведемъ параллель между тепловыми машинами и вододѣйствующими *).

Для того чтобы добыть помощью теплоты механическую энергію, прежде всего мы должны имѣть тѣла разныхъ температуръ, такъ какъ всѣ измѣненія, производимыя теплотою, обуславливаются переходомъ теплоты отъ одного тѣла къ другому, а для этого перехода разниа температуръ непремѣнное условіе.

Затѣмъ, вдобавокъ къ теплomu тѣлу, или источнику теплоты, и холодному тѣлу, или приѣмнику теплоты, у насъ должно быть еще третье тѣло — посредникъ, при помощи котораго теплота переносится отъ теплаго тѣла къ холодному, а измѣненія объема его производятъ механическую энергію. Если такого третьяго тѣла нѣтъ, то теплота просто переходитъ отъ теплаго тѣла къ холодному, не производя никакой работы, и разъ это совершилось, второй законъ термодинамики говоритъ намъ, что случай произвести

*) *Sadi Carnot.*

работу, которыми можно было бы воспользоваться, потеряны безвозвратно.

Теперь, если работа совершается посредством падающей воды, необходимо, во-первых, иметь падение, т. е. переходъ воды отъ болѣе высокаго къ низкому уровню, и во-вторыхъ, нужна надлежащая машина для приема падающей воды и механическаго ея переноса съ высокаго уровня на низкій; если такого промежуточного приспособленія нѣтъ, вода хотя и спускается подобно тому, какъ теплота течетъ отъ теплаго тѣла къ холодному, но ни малѣйшей доли энергіи падающей воды не обращается въ полезную работу.

А потому можно сказать, что теплота спускается съ высокой температуры къ низкой и совершаетъ работу при посредствѣ пара или воздуха, во время своего схода. Если надлежащимъ образомъ не воспользоваться такимъ сходомъ, то возможность произвести механическую работу теряется въ тепловой машинѣ такъ же, какъ и въ вододействующей. Поэтому и условия совершеннаго полезнаго дѣйствія этихъ машинъ можно выразить въ очень схожей формѣ. Въ самомъ дѣлѣ, чтобы можно было употребить на полезную работу всю энергію падающей воды, переносъ воды съ высокаго уровня на низкій долженъ вполнѣ и исключительно совершаться при посредствѣ водянаго колеса; если вода будетъ падать съ известной высоты на колесо или выливаться съ него на болѣе низкій уровень, то такая разность уровня теряется цѣликомъ или частію. Такъ и въ тепловой машинѣ, если теплота спускается отъ источника въ паръ или воздуху, или же отъ пара или воздуха къ холодному тѣлу, черезъ замѣтный промежутокъ температуры, тогда эта разность температуры, которою можно было бы воспользоваться, теряется, или, другими словами, для наибольшаго дѣйствія паръ или воздухъ должны получать теплоту при постоянной температурѣ источника теплоты и отдавать ее при постоянной температурѣ холоднаго тѣла, или приемника теплоты. Кроме того, для наибольшаго полезнаго дѣйствія вододействующей машины можно указать еще на необходимость *обратимости*. Это условіе состоитъ въ томъ, что вода должна приходить, на колесо безъ удара и оставлять его безъ скорости, и еслибы этому условію возможно было удовлетворить въ точности, то мы были бы въ состояніи обернуть движеніе водянаго колеса, а именно воду, прошедшую черезъ колесо, поднимать безъ потери энергіи съ низкаго уровня на высокой посредствомъ работы, получаемой изъ внѣшнихъ источниковъ. Несовершенное водяное колесо можно слѣдовательно назвать необратимымъ.

Для тепловой машины, теоретически совершенной, каково бы ни было посредствующее тѣло, служащее для переноса теплоты, — парь, газъ, жидкое или твердое тѣло, — полезное дѣйствіе равно

$$\frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_2}$$

или въ градусахъ Cels.:

$$\frac{t_2 - t_1}{t_2 + 273}$$

гдѣ t_2 и t_1 температуры, между которыми машина работает. Если бы W была работа за известное время, то расходъ теплоты за тоже время былъ-бы

$$W \frac{t_2 + 273}{t_2 - t_1}$$

а на индикаторную лошадь въ часъ:

$$Q = 630 \frac{t_2 + 273}{t_2 - t_1} \text{ един. тепл.}$$

Эта формула даетъ наименьшій расходъ теплоты, когда мы вынуждены работать между данными предѣлами температуры.

Разсмотримъ теперь, каковы эти предѣлы въ случаѣ паровой машины.

Низшій предѣлъ t_1 ни въ какомъ разѣ не можетъ быть меньше температуры атмосферы, и въ случаѣ машины съ холодильникомъ его можно принимать равнымъ 40°C , что представляетъ среднюю температуру холодильника. *Du Tremblay*, однако, понизилъ эту температуру до температуры около 15°C , присоединивъ машину съ эфиромъ, которая работаетъ между температурою мятаго пара и температурою осажденія эфира. Кромѣ эфира, пробовали также употреблять хлороформъ, какъ вторую жидкость; но двойныя машины не имѣли успѣха до сихъ поръ на практикѣ, потому что обращеніе съ эфиромъ и хлороформомъ сопряжено съ опасностями; первый производитъ часто взрывы, а второй выдѣляетъ удушливые пары. Въ паровыхъ машинахъ безъ холодильника t_1 будетъ температура кипѣнія, соотвѣтствующая атмосферному давленію, т. е. равная 100°C при 760 мм. ртутнаго барометра.

Верхній предѣлъ въ простой паровой машинѣ равенъ температурѣ котла. Въ самомъ дѣлѣ, хотя продукты горѣнія имѣютъ гораздо болѣе высокую температуру, положимъ T , однако въ обыкновенной паровой машинѣ нельзя воспользоваться вполне для работы разностью температуръ $T - t_2$. Для этого было бы необходимо имѣть жидкость, которая обращается въ паръ при температурѣ T (поло-

даже 600°C) и оказывается при температурах, не много выше той, которую имеет обыкновенный паровой котелъ. Въ действительности такихъ температурахъ показаться нельзя, и потому за вышнй пределъ слѣдуетъ принимать температуру котла.

Когда употребляется перегрѣватель, то вышняя температура, конечно, будетъ температура перегрѣвателя, и она тогда не будетъ соответствовать давлению пара въ котлѣ.

Прилагаемая въ концѣ таблица показываетъ работу различныхъ рода совершенныхъ тепловыхъ машинъ при равныхъ условияхъ.

Послѣдній столбецъ показываетъ полезное дѣйствіе, и отсюда видно, что въ самой лучшей паровой машинѣ, какаѣ только можетъ быть, и если паръ не перегрѣвается значительно, по крайней мѣрѣ для трети всей затрачиваемой теплоты теряется, и потеря происходитъ вовсе не отъ ошибки въ устройствѣ или отъ свойствъ машины, но только отъ тѣсныхъ предѣловъ температуры, въ которыхъ она вынуждена работать. Для достиженія лучшаго результата необходимо будетъ побѣдить тѣмъ или другимъ путемъ практическія затрудненія, связаннаго съ употребленіемъ необычныхъ температуръ.

Расходъ топлива, конечно, будетъ зависеть отъ качества его и отъ полезнаго дѣйствія котла. Чтобы получить теоретическій предѣлъ для работы, которую можно извлечь изъ 1 килограмма каменнаго угля, мы примемъ за норму чистый углеродъ, тогда расходъ угля опредѣлится формулой

$$C = \frac{Q}{8080}.$$

Полная теплота, выдѣляемая при сожиганіи дѣйствительнаго угля, иногда около 10% больше, чѣмъ углерода, но чаще меньше.

Въ таблицѣ указанъ расходъ топлива въ совершенной машинѣ, не принимая во вниманіе полезнаго дѣйствія котла. На потери, связаннаго съ котломъ, къ приведеннымъ числамъ слѣдуетъ прибавить отъ 30 до 50 процентовъ.

Для паровыхъ машинъ былъ вычисленъ и наименьшій расходъ пара на индикаторную лошадь въ часъ по формулѣ:

$$S = \frac{Q}{\lambda_2 - q_0}$$

гдѣ $\lambda_2 - q_0$ полная теплота испаренія отъ температуры питающей воды *) до температуры испаренія.

Расходъ пара въ совершенной паровой машинѣ, какъ видно изъ

*) Для машинъ безъ холодильника температура эта принималась = 100°C .

таблицы, гораздо меньше, чѣмъ въ дѣйствительныхъ машинахъ при тѣхъ-же обстоятельствахъ (8,4—17 и болѣе кил. пара на инд. лош. въ часъ). Это показываетъ, что въ устройствѣ машинъ или въ обращеніи съ паромъ должны быть ошибки, которыя, по крайней мѣрѣ теоретически, исправимы.

Изъ таблицы далѣе видно, что выгода отъ употребленія пара очень высокаго давленія не слишкомъ-то велика, потому что температура пара при высокихъ давленіяхъ возрастаетъ только медленно съ увеличеніемъ давленія. Съ другой стороны, теоретическая выгода отъ прибавленія холодильника очень значительна, но на дѣлѣ машина съ холодильникомъ еще болѣе несовершенная машина, чѣмъ безъ холодильника, и большая часть этой выгоды остается на практикѣ недостигнутою. И въ самомъ дѣлѣ, вообще чѣмъ шире предѣлы температуры, тѣмъ труднѣе на практикѣ приблизиться къ теоретическому полезному дѣйствию.

Это полезное дѣйствіе на практикѣ ослабляется разнаго рода потерями, каковы: лучеиспусканіе къ внѣшнимъ тѣламъ, ненадлежащее сообщеніе теплоты питающей водѣ, ненадлежащая трата теплоты во время расширенія, неполное расширеніе, излишнее противное давленіе, вредное пространство, стѣсненный проходъ пара, и наконецъ потери выпуска, т. е. теплота, уносимая мятымъ паромъ (вліяніе стѣнокъ цилиндровъ).

Послѣднія обстоятельства имѣютъ такое сильное вліяніе, что машины съ холодильникомъ рѣдко утилизируютъ болѣе 40 или 50% пригодной теплоты, а часто гораздо меньше. Машины безъ холодильника имѣютъ вообще большее *относительное* полезное дѣйствіе, такъ какъ здѣсь всѣ почти причины потерь имѣютъ меньшее вліяніе, и дѣйствительно, машины безъ холодильника утилизируютъ иногда до 75% всего количества теплоты, которое могло-бы быть обращено въ механическую энергію въ совершенной машинѣ, работающей между тѣми-же предѣлами температуры.

Замѣтимъ, что если для сравниваемыхъ машинъ предѣлы температуры различны, то необходимо принимать въ соображеніе *абсолютное* полезное дѣйствіе, точно такъ-же, какъ и полезное дѣйствіе относительно совершенной машины, такъ какъ *истинную мѣру практической экономичности* машины представляетъ, разумѣется, *абсолютное полезное дѣйствіе*.

Изъ всѣхъ совершенныхъ машинъ воздушныя представляютъ наибольшее полезное дѣйствіе, но, не смотря на многочисленныя и уже давнія попытки, воздушныя машины не успѣли распространиться

и занять свое мѣсто въ практикѣ. Когда дѣло доходить до осуществленія, чтобы извлечь выгоду, общаемою употребленіемъ высокихъ температуръ, встрѣчаются затрудненія двоякаго рода.

Во-первыхъ, части машинъ не выдерживаютъ соприкосновенія съ газами, которыхъ температура выше 300°C , — онѣ окисляются, смазочныя вещества разлагаются, треніе увеличивается и сопровождается вскорѣ заѣданіемъ.

Во-вторыхъ, массу воздуха, функционирующую по изотермамъ, можно поддерживать при высокихъ температурахъ только подѣтъмъ условіемъ, чтобы наружные газовые продукты горѣнія топлива оставались въ дымоходахъ только до тѣхъ поръ, пока еще температура ихъ выше температуры рабочаго воздуха.

Такое пользованіе горючими веществами оказывается очень неэкономичнымъ, потому что много теплоты уносится въ дымовую трубу и пропадаетъ безъ пользы.

Чтобы помочь этому, въ топкахъ, изобрѣтенныхъ *Belou* и *Pascal'* емъ, пробовали, при помощи усиленнаго тока воздуха, произвести сожиганіе въ замкнутомъ сосудѣ, и газовые продукты горѣнія смѣшивать съ водянымъ паромъ, прежде чѣмъ впускать ихъ въ цилиндръ для работы.

Эти топки представляютъ важный недостатокъ, устранить который не удалось пока, а именно—вмѣстѣ съ газами увлекаются и твердыя частицы, плавающія въ дыму. Онѣ загрязняютъ машину и служатъ причиною быстрого износа трущихся поверхностей.

Отсюда естественно придти къ мысли превращать предварительно топливо въ газъ, прежде чѣмъ сожигать его въ топкахъ, да и самое сожиганіе производить прямо въ рабочемъ цилиндрѣ и въ тотъ именно моментъ, когда требуется работа. Это пользованіе горючимъ матеріаломъ представляется наиболѣе рациональнымъ.

Правда, что свѣтильный газъ, которымъ пользуются въ газовыхъ машинахъ, матеріалъ, вообще говоря, довольно дорогой. Но во многихъ случаяхъ можетъ даже оказаться выгоднымъ устраивать особые газовые заводы для такихъ машинъ, и попытки этого рода, сдѣланныя въ послѣднее время въ Германіи, оказываются вполне удачными. Стоимость единицы работы (паровой лошади въ часъ) можетъ при этомъ выходить гораздо ниже, чѣмъ при употребленіи угля непосредственно въ паровой машинѣ, и между прочимъ, потому, что при добываніи газа получаютъ другіе цѣнные продукты сухой перегонки.

Кромѣ того, для машинъ нѣтъ надобности въ чистомъ свѣтиль-

номъ газѣ, и можно надѣяться, что съ разрѣшеніемъ вопроса объ экономичномъ добываніи водянаго газа (смѣси водорода и окиси углерода) изъ каменнаго угля какого-бы то ни было качества, газовые двигатели найдутъ широкое распространеніе. Они представляются серьезными конкурентами для паровыхъ машинъ, особенно постоянныхъ (не мѣняющихъ мѣста). Въ настоящее время газовыя машины системы *Otto* строятся силою до 60 лошадей.

Едва-ли нужно говорить, какую важность для правильнаго изученія и уразумѣнія работы паровыхъ машинъ и вообще тепловыхъ двигателей имѣютъ изложенные здѣсь принципы термодинамики, — науки о соотношеніяхъ между теплотою и механическою энергіей.

Термодинамика, иначе называемая также механическою теоріей теплоты, покоится на основаніяхъ, нисколько независящихъ отъ тѣхъ или другихъ предположеній относительно сущности теплоты. Основатель термодинамики, *Sadi Carnot*, въ своихъ „*Réflexions sur la puissance motrice du feu*“ (1824), согласно общепринятымъ въ то время взглядамъ, полагаетъ, что теплота — вещество; но какъ оказывается изъ посмертныхъ его бумагъ, недавно опубликованныхъ, потомъ онъ окончательно пришелъ къ заключенію, что теплота, въ сущности, движеніе. Послѣдній взглядъ, высказывавшійся и ранѣе еще *Bacon*'омъ и *Locke*'омъ, *Newton*'омъ и *Hooke*'омъ, *Laplace*'омъ и *Lavoisier*, *Rumford*'омъ и *Davy*, оставался бесплоднымъ, пока въ 40-хъ годахъ не созрѣла окончательно идея о неуничтожаемости силы (энергіи) и объ эквивалентности теплоты и работы, и не у одного лица, — нѣтъ, а къ этому выводу пришли почти одновременно и независимо другъ отъ друга нѣсколько лицъ разныхъ національностей, что вовсе не представляетъ ничего исключительнаго, какъ видно изъ исторіи науки и изобрѣтеній. Научныя истины являются не вдругъ, какъ откровеніе, а требуютъ много труда и долгой подготовки, но зато въ данный моментъ появленіе ихъ носить на себѣ уже отпечатокъ роковой необходимости, какъ это прекрасно выражено однимъ изъ величайшихъ математиковъ, *C. G. J. Jacobi*:

Crescunt disciplinae lente tardeque, per varios errores sero pervenitur ad veritatem. Omnia praeparata esse debent diuturno et assiduo labore ad introitum veritatis novae. Jam illa certo temporis momento divina quadam necessitate coacta emerget *).

*) Науки растутъ медленно и долго, и только послѣ разныхъ ошибокъ достигается истина. Продолжительнымъ и усидчивымъ трудомъ должно быть подготовлено все къ появленію новой истины. Зато уже въ извѣстный моментъ времени она выдвинется, побуждаемая какою-то роковою необходимостью.

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

Работа совершенныхъ тепловыхъ машинъ.

РОДЪ МАШИНЫ	Абс.давл. въ котлѣ (въ атм.).	Вышая температ. по стогр. терм.	Расходъ на инд. лош. въ часъ			Полезное дѣйствіе.
			един. тепл.	кил. углер.	кил. пара.	
Паровая машина безъ хо- лодника. Низшая темп. 100° С.	14	195,5°	3.086	0,38	5,6	0,204
	11	184,5	3.401	0,42	6	0,185
	8	170,8	3.950	0,49	7,1	0,159
	5,5	155,8	4.843	0,60	8,7	0,130
	4	144	5.971	0,74	10,9	0,105
Паровая машина съ холо- дильникомъ. Низшая темп. 40° С.	8	170,8	2.103	0,26	3,4	0,299
	6,5	162,4	2.204	0,27	3,6	0,285
	4	144	2.475	0,30	4	0,254
	2	120,6	3.004	0,37	5	0,209
Паровая машина съ эфир- ной. Низшая темпер. 15° С.	1,4	109,7	3.363	0,41	5,6	0,187
	8	170,8	1.801	0,22	2,8	0,350
Воздушная машина. Низ- шая темп. 15° С.	4	144	2.041	0,25	3,2	0,308
	—	350	1.171	0,15	—	0,537

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.

Списокъ важнѣйшихъ произведеній литературы по предмету статьи.

Carnot (Sadi).—*Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance.* Paris, 1824.

Helmholtz. — *Ueber die Erhaltung der Kraft.* Berlin, 1847 (а также въ его *Wissenschaftlichen Abhandlungen*, Bd. I).

Regnault.—*Relation des expériences entreprises par ordre de M. le Ministre etc., pour déterminer les principales lois et les données numériques qui entrent dans le calcul des machines à vapeur.* 2 vv. Paris, 1847 et 1862 (vol. XXI et vol. XXVI des *Mémoires de l'Académie des Sciences de Paris*).

Clausius.—*Die mechanische Wärmetheorie*. 2-te Aufl. Его *Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie*. 1-er Bd. Braunschweig, 1876.

Zeuner.—*Grundzüge der mechanischen Wärmetheorie*. 2-te Aufl. Leipzig, 1866.

Joule.—*Das mechanische Wärmeäquivalent*. (Собрание статей, помѣщавшихся въ разныхъ періодическихъ англійскихъ изданіяхъ и переведенныхъ на нѣмецкій языкъ). Braunschweig. 1872.

Verdet.—*Théorie mécanique de la chaleur*. 2 vv. Paris, 1868—72.

Saint-Robert.—*Principes de Thermodynamique*. 2-de éd. Turin et Florence, 1870.

Hirn.—*Exposition analytique et expérimentale de la théorie mécanique de la chaleur*. 3-me éd. Paris. T. I, 1875 et T. II, 1876.

Tait.—*Sketch of Thermodynamics*. Edinburgh, 1868 (2-d ed., 1877).

Tait.—*Lectures on some recent advances in physical science*, 2-d ed., London, 1876 (русскій переводъ: Тэйтъ, *О новѣйшихъ успѣхахъ физическихъ знаній*. Спб. 1877).

Cotterill.—*The steam engine considered as a heat engine*. London & New-York, 1878.

Hirsch.—*Théorie des machines aérothermiques*. Paris, 1874.

Schöttler.—*Die Gasmachine*. Braunschweig und Leipzig, 1882.

Witz.—*Etudes sur les machines à gaz tonnant*. Paris, 1884.

