

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

РЕНОВАЦИЯ ВТОРОГО НАЧАЛА И НОВЫЙ ИДЕАЛЬНЫЙ ЦИКЛ

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

Представлена новая формулировка второго Начала термодинамики в виде большого неравенства основных теплофизических свойств. Предложен идеальный термодинамический цикл, учитывающий в отличие от цикла Карно свойства газов. Определены границы существования понятия энтропии (R_μ и C_V).

Presents a new formulation of the second law of thermodynamics in the form of large inequalities basic teplofizicheskikh properties. Proposed ideal thermodynamic cycle, taking into account, in contrast to the Carnot cycle, properties of gases. Defined the boundaries of the existence of the concept of entropy (R_μ and C_V).

Ключевые слова: турбулентность, цикл, кпд.
Keywords: turbulence, cycle, efficiency.

Всегда, с момента открытия и по настоящее время, второе Начало термодинамики претерпевало изменения, связанные с его уточнением, конкретизацией, новыми способами математического представления и просто с более четким его пониманием. Такие величайшие умы как Клаузиус, Больцман, Гельмгольц, Гиббс и другие ученые-естествоиспытатели ввели в обиходную термодинамическую науку основы, которые сегодня считаются обычными, привычными и постоянно используются в работе и в процессе познания. Практически ни одна прикладная наука, связанная с техникой, химией и т.д., не обходится без термодинамики. Результаты термодинамических расчетов дают возможность не только количественно оценить эффективность той или иной машины, но и при необходимости преобразовать ее. Термодинамика снабжает начальными и граничными условиями фундаментальные уравнения: газовой динамики, устойчивости, акустики, химии.

Особую ценность представляют рабочие, т.е. инженерные методы. Они самые точные и нагляднее всего раскрывают смысл происходящих процессов.

Но! К сожалению, в термодинамике без гениальных догадок, смелых рискованных заявлений, а зачастую волевых решений не обошлось. Многие выводы были сделаны эвристически, а потом абсолютизированы. Часто не хватало непрерывных взаимозависимых переходов, перенесений рассуждений "без разрыва производных" ближе к поставленной цели. Поэтому и появились такие понятия как энтропия от Клаузиуса, которую он **ввел** в науку. Потом долго и мучительно понимали, что это такое. Складывается ощущение, что многие ученые до сих пор этого не знают. Или, например, Больцман **отождествил** логарифм функции распределения частиц по скоростям с физической энтропией Клаузиуса. Просто волосы дыбом встают от его гениальности. Соединил "ужа с ежом", а ввел всего-навсего коэффициент пропорциональности, константу Больцмана. Некоторые современные ученые используют для доказательств термин **потребуем**. У кого? Какое ты имеешь право требовать у природы? Так ведь таким способом, тем не менее, достигается правильный результат. И вот еще. Замечательный инженер Карно **придумал** идеальный цикл: две адиабаты и две изотермы. Посчитал для него к.п.д. и сказал, что это самый большой к.п.д., который может быть достигнут в турбомашинных и других технических устройствах. До сегодняшнего дня все так и считают, что это именно тот цикл, который является крайним и закрывает справа интервал значений к.п.д. Пишется этот к.п.д. как единица минус отношение температур холодильника и нагревателя. А где здесь свойства газа? Что, если мы в качестве рабочего тела используем водород или гексафторид урана, ничего не изменится? И к.п.д. будет тем же? А все потому, что Карно этот цикл не вывел из основополагающих уравнений, а попросту сконструировал.

Вот почему особой ценностью в науке считается преемственность. Одно должно следовать из другого. И тогда многое можно объяснять.

Еще раз о втором Начале

В понятие "второе Начало термодинамики" на протяжении почти двухсот лет разные авторы вкладывают различное содержание. Наиболее логично, видимо, поступают те, кто понимает под этим законом основной постулат о передаче тепла от горячего к холодному, включая его вариации: постулат Клаузиуса, Томсона-Планка или эквивалентные им утверждения Оствальда. Другие исследователи сводят содержание второго Начала термодинамики к двум положениям, являющимся следствием основного постулата: 1. Существованию энтропии как функции состояния и 2. Принципу ее возрастания. Эти два положения, как впервые отметила Т.А. Афанасьева-Эренфест, логически независимы друг от друга.

В работе [1] была сделана еще одна попытка формулировки второго Начала термодинамики. Было показано, что энтропия в любом процессе всегда больше или равна газовой постоянной. При этом газовая постоянная, входящая в уравнение Менделеева-Клапейрона, является левой границей значений энтропии, а сама, естественно, и есть энтропия. В работе [2] было строго доказано это равенство с использованием аппарата статистической физики Больцмана. В этой же работе впервые было записано тройное неравенство для основных физических характеристик, а по существу основных энергий:

$$R_\mu \leq S \leq C_V \leq C_p.$$

Но в этом неравенстве не хватает еще одной характеристики - С. Тогда:

$$R_\mu \leq S \leq C_V \leq C \leq C_p.$$

Почему именно это неравенство может быть формулировкой второго Начала термодинамики? Потому, что именно оно строго следует из первого начала и определений основных термодинамических потенциалов [3].

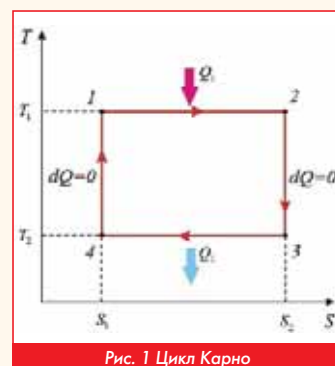


Рис. 1 Цикл Карно

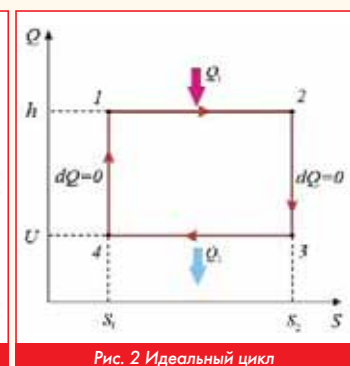


Рис. 2 Идеальный цикл

Анализ последнего неравенства показывает, что энтропия ограничена сверху теплоемкостью при постоянном объеме. Другими словами, произведение ST будет всегда меньше внутренней энергии, а в правую часть энтропия никогда не попадет. По существу, в правой части будет текущая теплоемкость, и она будет всегда находиться между минимальным C_v и максимальным C_p значениями. Или, проходящее по циклу тепло, всегда будет ограничено внутренней энергией слева и энтальпией справа.

Получается так, что C_v или внутренняя энергия U термодинамической системы разделяет это большое неравенство на две половинки, отдельно на два двойных неравенства:

$$R_{\mu} \leq S \leq C_v \text{ и } C_v \leq C \leq C_p.$$

И это не просто так. Именно C_v отделяет процессы без изменения объема, то есть внутренние процессы без совершения работы (первое неравенство) и процессы, где совершается работа (второе неравенство). Именно в диапазоне $[C_v, C_p]$ допускается изменение объема и давления.

Другими словами, левая половина большого неравенства отвечает, в основном, за химическую термодинамику и здесь уместны, в том числе, потенциалы Гиббса и Гельмгольца, а правая - за техническую. Причем техническая термодинамика, построенная во многом на циклах, реальных процессах, характеризуется в итоге параметрами эффективности - полезной работой и к.п.д.

Для идеального газа второй интервал по длине составляет величину, равную R_{μ} . То есть максимальная полезная работа будет равна величине $R_{\mu}T$. Это очевидно из уравнения первого начала термодинамики - левая часть (тепло) равна правой (внутренняя энергия плюс работа). Другими словами [4], массовая теплоемкость идеального газа в общем случае есть сумма массовой теплоемкости при постоянном объеме и удельной работы:

$$C = C_v + A.$$

Из формулы следует, что первое слагаемое для всех процессов одинаково (C_v), второе же различно. В пределе получаем уравнение Майера

$$C_p = C_v + R_{\mu},$$

где R_{μ} - удельная работа газа при постоянном давлении, то есть работа расширения одного килограмма газа при нагревании его на один градус.

Итак. Что же все-таки понимать под вторым Началом термодинамики в связи с последним анализом? В общем все положения остаются. Энтропия по-прежнему возрастает. Но! Только до величины C_v . Причем с уменьшением показателя адиабаты ($k - 1$) энтропия будет стремиться к бесконечности. Правая часть большого неравенства, куда энтропия по своему физическому смыслу не входит, строго соответствует первому Началу. Очень важным установленным фактом является ограничение энтропии справа величиной C_v . Это означает, что процессы внутри системы проходят строго в замкнутом ограниченном пространстве. То есть левая часть неравенства справедлива только в случае замкнутого ограниченного пространства, а значит распространять это неравенство на всю Вселенную несправедливо. Ведь она бесконечна! И здесь действительно Юлиус Клаузиус перебрал. Хотя, кто знает? Может это только нам, людям, кажется, что Вселенная бесконечна. Бог ее знает.

Еще более идеальный цикл

Уже все привыкли и смирились с тем, что термодинамический цикл Карно является идеальным и его коэффициент полезного действия самый, возможно, большой. То есть нельзя сделать турбомашину или другой агрегат, работающий в соответствии с теорией циклов, у которой к.п.д. будет больше, чем у Карно.

Воспользовавшись новой интерпретацией второго Начала термодинамики, покажем, что при разработке своего идеального цикла, Карно не все учел. Основное, что он не учел - это свойства газов.

Как уже было сказано, у тяжелых и легких газов наблюдаются большие различия в показателях адиабаты. Достаточно сказать, что у гелия $k = 1,67$, а у продуктов сгорания твердого топлива БК-8 (условное название) - $k = 1,16$.



Вильгельм Фридрих
Оствальд,
немецкий физик и химик



Татьяна Алексеевна
Афанасьева-Эренфест,
русский и голландский
математик и физик



Макс Карл Эрнст
Людвиг Планк,
немецкий физик-теоретик

Итак, воспользуемся следующим положением второго Начала термодинамики:

$$C_v < C < C_p.$$

Границы этого неравенства определяют максимально возможную работу цикла. Пока мы не знаем, что это за цикл, проанализируем уравнение для первого начала термодинамики:

$$dQ = dU + dA.$$

То есть тепло в цикле расходуется на внутреннюю энергию и механическую работу, т.е. $Q = U + A$.

Тогда работа - это разница между поступающим теплом и внутренней энергией системы:

$$A = Q - U,$$

а к.п.д.:

$$\eta = \frac{Q - U}{Q} = 1 - \frac{U}{Q}.$$

Максимальным к.п.д. будет только в том случае, когда тепло будет реализовано при постоянном давлении, то есть воспроизведется энтальпия системы h (правая граница неравенства). Это тепло поступит в систему, а остатки после производства работы уйдут в виде внутренней энергии. Другими словами, в систему поступает максимально возможное тепло, а сбрасывается минимально необходимая его часть. Коэффициент полезного действия при этом запишется в виде

$$\eta = 1 - \frac{U}{h}.$$

Поступившее в цикл тепло, имеющее высокую температуру T_1 , будет сработано, а низкопотенциальный газ будет сброшен с существенно низкой температурой T_2 . Прямо как у Карно - поступающий газ имеет температуру нагревателя T_1 , а сбрасываемый, отработанный - температуру холодильника. Тогда можно переписать к.п.д.:

$$\eta = 1 - \frac{C_v T_2}{C_p T_1}.$$

Или окончательно

$$\eta = 1 - \frac{1}{k} \cdot \frac{T_2}{T_1}.$$

Вот и все. Получили формулу для самого идеального цикла. Видно, что из-за свойств формула дает к.п.д., больший, чем у Карно.

Последняя формула превращается в формулу Карно при показателе $k \rightarrow 1$. То есть при уменьшении показателя адиабаты формула для к.п.д. стремится к формуле Карно. Известно, что легкие газы (гелий и др.) имеют самые большие показатели адиабаты, а тяжелые - самые маленькие. Из формулы для к.п.д. следует, что менее эффективными с точки зрения к.п.д., к сожалению, будут аппараты, работающие на твердом топливе, так как молекулы продуктов сгорания СТП имеют очень большую и разветвленную структуру.

Теперь, когда получена формула для расчета к.п.д. идеального цикла, представим себе этот цикл. По аналогии с циклом Карно (рис. 1), где имеется две адиабаты и две изотермы, оставим лишь две адиабаты, а вместо изотермы введем две изотеплоты.

То есть будем считать, что на двух противоположных сторонах криволинейного четырехугольника, составляющего цикл (в P - V координатах), будут две изотеплоты. Верхняя будет соответствовать

энтальпии при исходной температуре газа после нагревателя, а нижняя - внутренней энергии при температуре холодильника. Для наглядности цикл изобразим в виде ку-эс диаграммы (более привычно и-эс диаграммы), где по абсциссе откладывается энтропия (теперь уже ее аналог), а по ординате - тепло (энтальпия и внутренняя энергия). В этих координатах (рис. 2) в наглядном виде представлен тот самый идеальный цикл. Он выглядит как прямоугольник. Так же, как известно, выглядит цикл Карно в T - S координатах.

Следует отметить, что формулу для к.п.д. идеального цикла не следует рассматривать как формулу для предельного цикла и устремлять T_1 к T_2 , чтобы получить асимптотическое значение. Это - не корректно. Правильно устремлять $h(Q)$ к U . В этом случае она (формула для к.п.д.) будет сходиться к нулю.

И еще. Как было показано, C_v является некой границей, разделяющей химическую термодинамику и термодинамику тепловых машин. Если большое неравенство переписать в отношениях к C_v , то получим:

$$(k - 1) \leq \frac{S}{C_v} \leq 1 \leq \frac{C}{C_v} \leq k$$

и это новое неравенство очень показательно. Левая половина неравенства соизмеряется с изоэнтропическими процессами, а правая - с адиабатическими.

Изоэнтропические процессы характеризуют некую стабильность, равновесность химических процессов. Адиабатические процессы (процессы без подвода тепла к системе) характерны для тепловых циклов. **П**

Литература

1. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Новая интерпретация второго Начала термодинамики и теорема векторного анализа о соотношении движений // Двигатель №6, 2016.
2. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Энтропийные потоки и коэффициенты переноса // Двигатель №4, 2017.
3. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Базис-определяющие тензоры термодинамики // Двигатель №3, 2017.
4. В.В. Сушков. Техническая термодинамика // М.-Л. Государственное аналитическое издательство, 1953.

Связь с автором: swgeorgy@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ

В июне этого года самый большой на сегодняшний день в мире самолет Stratolaunch впервые покинул свой ангар.

И уже в сентябре были запущены все шесть огромных двигателей этого гигантского самолета. Испытания двигателей проводились в рамках программы наземных испытаний, после завершения которых самолет сможет подняться в воздух. Ожидается, что это должно произойти в 2019 году.

На самолете Stratolaunch, размах крыльев которого составляет 117 метров, сейчас установлены шесть турбореактивных двигателей Pratt & Whitney, которые были сняты с двух самолётов Boeing 747-400 и на которых был выполнен капитальный ремонт. Двигатели на Stratolaunch установлены по три на одном крыле и каждый из них имеет свою собственную систему подачи топлива, систему управления и прочие системы, которые позволяют пилотам управлять работой каждого двигателя индивидуально.

Недавние испытания были проведены в три этапа. Сначала двигатели приводились во вращение с помощью электростартеров. Затем во вращающиеся двигатели подавалось топливо, но зажигание не подавалось. На третьем этапе каждый из двигателей был запущен в нормальном режиме и прорабо-



тал какое-то время на минимальных оборотах. Затем постепенно, в течение нескольких месяцев, будут гонять двигатели самолета на разных режимах и разной мощности. И испытания на максимальной мощности будут проводиться уже ближе к сроку начала полетов.

Самолёт Stratolaunch построен компанией Stratolaunch Systems, основанной семь лет назад Полом Г. Алленом (Paul G. Allen), одним из учредителей компании Microsoft. Целью создания этой компании является разработка многоразовой системы воздушных космических запусков. Использо-

вание для этих целей специализированных самолетов позволит избавиться от необходимости использования наземных стартовых площадок, часть оборудования которых требуется менять после каждого запуска. При этом, вывод в космос полезного груза будет осуществляться при помощи небольшой одноступенчатой ракеты-носителя. **П**

