

УДК 536

© 2007 г. БРОДЯНСКИЙ В.М.

О ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКОЙ БАЗЕ СОВРЕМЕННОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ*

Называй каждую вещь ее собственным именем; в этом величайшая и важнейшая из всех наук.
Р. Декарт

Введение. Состояние терминологической базы инженерной термодинамики**. Термодинамика имеет развитую терминологию, включающую основные понятия и многочисленные приложения. Однако в ней, как и в каждой науке, по мере развития возникает необходимость в обновлении терминологического аппарата – устранение устаревших и неточных терминов и введение новых, соответствующих современному уровню. Это происходит в отечественной и иностранной (главным образом англоязычной и немецкой) литературе.

Нельзя сказать, что разработке такого терминологического аппарата в русскоязычной (немецкой, английской и франкоязычной) научной литературе уделяется недостаточное внимание. В нашей стране, кроме многочисленных термодинамических монографий, статей и учебников, где в числе прочих рассмотрены вопросы терминологии. Академией наук были в 1952, 1973, 1980 и 1984 гг. изданы специальные сборники определений “Термодинамика”, в которых даны основные понятия, термины и буквенные обозначения величин. Они сыграли положительную роль в развитии и упорядочении терминологической базы термодинамики [2].

Аналогичное полезное влияние оказали и сборники терминов: “Теория теплообмена”, вып. 83 и 84 и “Энергетический баланс”, изданные в 1973 г. В дальнейшем такие сборники не выпускались.

В последнее время возникло некоторое отставание терминологической базы термодинамики от требований, выдвигаемых в связи с дальнейшим развитием науки в конце XX [1] и в начале XXI веков.

Это касается общих и частных понятий, связанных с различными процессами и системами. Естественно, все они не могут и не должны входить в официальный сборник определений; тем не менее их содержание и область корректного использования должны диктоваться дальнейшим развитием как самой термодинамики, так и расширением областей ее применения.

В связи с этим полезно проанализировать сложившуюся ситуацию и наметить возможные направления модернизации термодинамической терминологии.

Вопросы, возникающие в связи с описанной ситуацией, целесообразно разделить на три группы в зависимости от назначения рассматриваемых терминов.

* Статья публикуется в порядке обсуждения.

** Термин “инженерная термодинамика” (всего “техническая”) использован в этой статье потому, что область приложений термодинамики в последнее время выходит за пределы собственно техники и включает те элементы экономики, экологии и биологии [1], которыми современным инженерам приходится заниматься.

1. Термодинамическая система и ее связи с окружением. Контрольная поверхность системы.

2. Коэффициенты полезного действия (КПД), коэффициенты эффективности (качества).

3. Отдельные некорректные термины.

1. Термодинамическая система и ее связи с окружением. Контрольная поверхность системы

В сборнике определений “Термодинамики” (вып. 103, 1984 г.) в разделе 1 даны достаточно полные определения 1–9, относящиеся к термодинамической системе и ее разновидностям. Однако в современных условиях наблюдается явная и вполне объяснимая тенденция рассматривать в ряде случаев систему и ее окружение в едином комплексе. Поэтому приходится уделять все большее внимание внешним условиям работы системы, которые оказывают существенное влияние на результаты ее действия.

Прежде всего необходимо выделить и определить понятие “окружающая среда”, о которой (без объяснения этого термина) упоминается только в п. 115 в пояснении к термину “эксергия”. Между тем термин “окружающая среда” достаточно содержателен, и его строгое определение совершенно необходимо. За границами системы в ее окружении могут происходить процессы, влияние которых на систему современная термодинамика не может не учитывать.

Окружающая среда может быть в реальных условиях равновесной и неравновесной, характеризоваться как постоянными, так и переменными параметрами; все это так или иначе может сказываться на результатах действия системы и оценке как ее термодинамических параметров, так и протекающих в ней процессов.

В этой связи представляется целесообразным ввести и узаконить наряду с понятием “эксергия” [2] строгое определение понятия “окружающая среда” в следующей редакции: “Окружающая среда (англ. environment) – равновесная часть окружения термодинамической системы, интенсивные параметры которой не меняются при взаимодействии с системой; характеризуется нулевой эксергией”.

Практика показала, что этого недостаточно; во многих случаях необходимо выйти за пределы системы и рассмотреть энергетическую ситуацию в ее окружении. Поэтому наряду с понятием “окружающая среда”, характеризующим равновесную часть окружения системы, все чаще используется более широкое понятие – “окружение системы”, включающее все взаимодействующие с ней внешние объекты. Необходимость появления этого понятия связана с тем, что вне контрольной поверхности системы существуют и (в общем случае) взаимодействуют с ней не только источники работы W и тепла Q , но и потоки вещества, отличные по своим параметрам и химическому составу от равновесной окружающей среды. Потоки вещества, пересекающие контрольную поверхность системы, должны во многих случаях характеризоваться не только энтальпией, но и химическим составом, определяемым их “родословной” – источниками в окружении системы. Без этого определение их эксергии, следовательно, составление и анализ как энергетического, так и эксергетического балансов системы, будут неполными.

Это значит, что более широкое понятие “окружение системы” (англ. surrounding) тоже необходимо узаконить. Оно должно включать наряду с равновесной окружающей средой все элементы внешних объектов, которые в каждом случае могут взаимодействовать с системой (например, топливо, руда, минералы, элементы атмосферы, излучение и т.д.).

Эксергия каждого из них должна рассчитываться по соответствующей методике в случае необходимости [3, 4]. В ряде случаев следует учитывать через эксергию и тер-

модинамическую ценность элементов биосферы (например, древесины, и других органических продуктов)* [4].

Таким образом, понятие “окружение системы” (surrounding) – совокупность равновесной окружающей среды и всех находящихся в ней внешних объектов, взаимодействующих с рассматриваемой системой, закономерно войдет в комплекс базовых терминов термодинамики.

2. Коэффициенты полезного действия и коэффициенты эффективности

Одна из величайших заслуг термодинамики – введение в науку и практику понятия коэффициента полезного действия – КПД.

Следует отметить, что этот термин прошел длительную эволюцию и в последнее время стал употребляться в обыденной жизни, за пределами науки. Кто только не использует этот термин: коэффициент полезного действия? Все – педагоги, писатели, биологи, психологи, экономисты, политики, инженеры.

Бороться с этим явлением бесполезно; научные термины часто проникают в бытовой язык и там “размываются”, теряя строгую определенность. Однако, обратный процесс очень опасен; очевидно, что в сфере науки необходимо исключить любые неточности в определении терминов, и в особенности тех, которые используются за ее пределами.

Применительно к самому “размытому” из них – термину КПД полезно вспомнить краткую историю его возникновения и трактовки.

Идея КПД появилась впервые от понятия “*effet utile*”, которое было введено в науку в конце XVIII века для оценки эффективности механических и гидравлических машин французскими учеными – Л. Карно, Л. Навье и Ж. Понселе. Метод оценки был элегантно простым и однозначным: КПД (пользуясь современным термином) определялся отношением полученной работы W_2 к затраченной W_1 . До этого соответствующее понятие использовал еще Леонардо да Винчи.

Для механических и гидравлических машин такое определение было (и осталось) вполне строгим и однозначным, что естественно: сопоставляемые величины качество однородны и легко измеряются.

Обе величины работы W_1 и W_2 определялись просто и однозначно. Разность $W_1 - W_2$ показывала величину потери работы (от трения, утечек и т.д.).

С появлением паровой машины ситуация с определением КПД усложнилась. Надо было сравнивать качественно различные величины: на входе – расход топлива, на выходе – механическую работу. Кроме того, тогда было вообще неясно, сколько работы можно получить (т.е., говоря словами С. Карно, “ограничена или не ограничена движущая сила тепла”).

Когда С. Карно установил определенно, что она имеет пределы, связанные с верхней и нижней температурами, перед ним возник вопрос о том, как определить, насколько результат работы реальной паровой машины близок к этому пределу. Механика тут была бессильна: результат действия машины – работу нужно было сопоставить с теплом – величиной совершенно иной качественной природы.

С. Карно на основе своей работы нашел гениально простое и безупрочное по логике решение [5]. Он сопоставил работу W_p , производимую реальной машиной, с той $W_{ид}$, которую могла бы дать идеальная машина в тех же температурных условиях. Пользуясь введенным им идеальным циклом, эту работу можно было вычислить, что он и сделал, получив для самой лучшей из тогдашних паровых машин значение

$$\text{КПД} = W_p / W_{ид} \cong 5\%.$$

* Оценка таких продуктов по их теплотворной способности (“калорийности”) не отражает их термодинамическую ценность.

Это было первое (еще до открытия Первого закона термодинамики) строгое, безупречное и с современной точки зрения определение КПД теплового двигателя. Более того, в дальнейшем стало понятно, что оно имеет универсальный характер и подходит к любому процессу преобразования энергии, независимо от ее форм.

Важно отметить, что С. Карно при этом обобщении сохранил в неприкосновенности классический принцип определения КПД, предложенный французскими механиками. Далее с понятием КПД все сложилось иначе, его развитие шло не вперед, а “вбок”; первоначальный четкий смысл был утерян.

Несмотря на появление понятия “теплотворная способность топлива” эффективность тепловых машин продолжали определять по традиции, идущей от Уатта – по отношению полученной работы к затрате топлива. Разница была только в том, что в знаменатель формулы для определения эффективности стали подставлять не вес израсходованного топлива, а его теплотворную способность. Здесь сопоставляются два энергетических показателя – израсходованное тепло Q и полученная работа W .

Так появился и действует термический коэффициент полезного действия (№ 112 в [2]). В нем, в отличие от КПД по Карно, сопоставляются две качественно различные величины: тепло и работа. Пока этот коэффициент применялся только для оценки тепловых двигателей, работающих на основе сжигания органического топлива, такая подмена отношения двух работ (идеальной и реальной) на отношение реальной работы к теплу мало влияла на величину показателя эффективности.

Теплотворная способность топлива близка к той максимальной работе (“движущей силе тепла”, по Карно), которая может быть получена при его окислении в идеальном процессе (хотя разница может превышать 10%). Однако, когда для производства работы используется тепло от источников с относительно низкой температурой (например, атомных и геотермальных), то в силу закона, установленного Карно, его “движущая сила” становится намного меньше. Термический КПД этого не учитывает и его численное значение для таких станций оказывается существенно ниже, чем у станции, работающей на органическом топливе (при том же или более высоком уровне технического совершенства), т.е. этот КПД, в отличие от КПД Карно, дает искаженную информацию.

Дальше в процессе “размывания” понятия КПД появились, кроме термического, и многие другие КПД (эффективный, тепловой, относительный, термодинамический и др.); каждый из них определяет эту величину по-своему.

В результате использования различных вариантов таких КПД, в которые подставлялись без уточнения любые виды энергии как затраченной, так и полученной (электроэнергия, тепло различного потенциала, химическая энергия (энергия Гиббса) и т.д.), “семейство” КПД превратилось в беспорядочную толпу. Ситуация оказалась очень удобной для выгодных “хозяйственных” умозаключений. Например, КПД ТЭЦ (теплоэлектроцентрали), определяемые по распространенной формуле: $\eta = (W + Q_T)/Q_1$, в которой на равных складываются “полученные для пользы дела” электроэнергия W и тепло Q_T низкого потенциала, отнесенные к высокопотенциальной теплоте сгорания топлива Q_1 , оказались значительно выше (до 80%), чем у КЭС (конденсационная электростанция) (38–45%), работающих на таких же параметрах пара. На основе этого, поскольку доля ТЭЦ в нашей стране больше, чем в других странах (выработка электроэнергии на тепловом потреблении ~20%), было показано, что удельный расход топлива на 1 кВт · ч у нас ниже, чем в других странах [6].

По этим же представлениям КПД котельной (до 82%) намного выше, чем у самой совершенной КЭС. Но еще более удивительный КПД получается у топливных элементов (ТЭ): например, у угольно-кислородного ТЭ КПД превышает 120%! Такие псевдо-КПД используют в серьезных работах, анализируют и комментируют, включают в статистические данные и основывают на них рекомендации по развитию энергетики*.

* Значения КПД, превышающие 100%, служат базой для изобретателей “вечного двигателя” 2-го рода (ppm-2) [7].

Жертвой непонимания причин появления таких странных значений КПД стал даже автор статьи на эту тему в таком авторитетном издании, как Большая советская энциклопедия (БСЭ), попытавшийся объяснить читателям смысл этого понятия. Вначале он справедливо утверждает, что КПД не должен быть больше единицы. Но в дальнейшем возникает необходимость объяснить, откуда на практике берутся КПД больше единицы. Не имея возможности установить причину этого он находит выход из противоречия, вводя странное представление о том, что бывают как “истинные” КПД, так и “другие”. Он пишет: “Хотя истинный КПД установки меньше единицы, рассмотренный КПД может оказаться больше единицы”. Мысль о том, что рассмотренный “другой” “неистинный” КПД получился из-за нарушения завета Карно – соотносить качественно однородные величины “движущей силы”, т.е. работы, и что “неистинный” КПД не имеет права носить это звание, у автора не возникла.

Эта путаница с КПД вызвала недоумение прежде всего у научной общественности, далекой от теплоэнергетики. В этом отношении характерна статья акад. А.А. Харкевича [8]. Он писал: “Методические трудности здесь носят фундаментальный характер... Главная из них... состоит в определении того, что именно следует рассматривать в качестве полезного действия данного устройства, и подыскания количественной меры этого полезного действия”.

Выход был найден введением понятия эксергии [3, 4], обобщившего идею Карно об универсальной мере – “движущей силе” для всех форм энергии. Он позволил применить к любым видам энергии единую количественную характеристику, определяющую ее работоспособность в данных условиях окружающей среды, т.е. создалась возможность дать четкое определение КПД. Такой эксергетический КПД (Exergy Efficiency или Carnot Efficiency) все в большей мере используется как в теоретических работах, так и на практике в энергетике и других, связанных с ней отраслях.

Тем не менее, без уточнений часто используются под названием КПД самые разнообразные показатели термодинамической эффективности, в которых “принцип Карно” – качественная однородность сопоставляемых величин не соблюдается.

В настоящее время необходимо узаконить термодинамически строгое универсальное определение КПД, что не должно исключать все другие коэффициенты, определяющие эффективность различных преобразований энергии; однако четкое терминологическое различие между ними установить необходимо.

С этой целью вместо “термического коэффициента полезного действия термодинамического цикла” (термин 112, [2])^{*} необходимо ввести два фундаментальных понятия.

Эксергетический КПД η_e системы преобразования вещества и энергии (Exergy Efficiency); отношение суммарной полезной эксергии на выходе системы к ее затрате на входе системы:

$$\eta_e = \Sigma E' / E'.$$

Это определение справедливо для любой системы преобразования вещества и(или) энергии, в которой осуществляется как замкнутый цикл, так и разомкнутый процесс, а так же к любой ее части.

Эксергетическая потеря (потеря эксергии) ΣD – разность значений суммарной эксергии $\Sigma E'$ на входе в систему (или ее часть) или на выходе из нее $\Sigma E''$:

$$\Sigma D = \Sigma E' - \Sigma E''.$$

Использование этих понятий дает возможность получить полную количественную картину преобразования вещества и энергии в технической системе любой сложности [3, 4] и в отдельном ее элементе.

^{*} Сформулирован в [2] с ошибкой: слово “обратимый” не нужно, так как определение относится ко всем реальным циклам.

Такой обобщенный подход не исключает использование частных коэффициентов, которые показывают степень приближения процессов к принимаемому в рассматриваемом случае за образец. Количество таких коэффициентов очень велико (в отечественной термодинамической литературе больше двух десятков). Среди них есть и такие, которые достаточно наглядно показывают качество отдельных процессов (например, сжатия и расширения – изотермический и адиабатный).

Однако большинство терминов, относящихся к системам, не дает без сложных дополнительных пояснений (иногда и с ними) наглядной информации об их термодинамическом качестве*.

Разумное сокращение числа таких коэффициентов облегчит и изложение термодинамики, и усвоение существа дела, необходимого для практики.

3. Термины, относящиеся к переносу энергии и энергетическим балансам

Большую группу терминов, не связанных непосредственно с термодинамической эффективностью систем и отдельных процессов, составляют те, которые характеризуют термодинамические свойства вещества и процессы переноса энергии. Многие из них связаны с вещественной теорией тепла, некоторые были вытеснены новыми (например, “теплосодержание” было заменено на “энтальпию”). Однако дезориентирующие термины: теплоемкость (теплосодержание), скрытая теплота, теплопадение – остаются, хотя физическую сущность процессов они не только не отражают, но соответствуют ушедшим в прошлое представлениям вещественной теории тепла.

Несколько иное, но научно некорректное содержание имеет термин “теплообмен”. Как известно, во всех случаях, кроме лучистого теплообмена, никакого обмена энергией нет, есть только передача энергии (а не тепла) в одном направлении.

Если в этих случаях при замене терминов нужно преодолевать языковые трудности, то в других аналогичных ситуациях таких затруднений не возникает, нужно только использовать верные слова русского языка.

Примером могут служить совершенно некорректные термины, относящиеся к тем случаям, где слово “источник” используется в смысле, противоположном его значению в русском языке.

“Источником” во многих руководствах называют не только тот объект, который снабжает систему энергией (или эксергией), но и тот, куда энергия (или эксергия) сбрасывается. Это делается вопреки логике, называть “источником” (независимо от того, верхний он или нижний по температуре) тот объект, куда сбрасывается что-либо отработанное и в данной системе ненужное, по крайней мере, странно. Этому способствует неточная формулировка термина “источник теплоты” (№ 111) в [2], где в “источникам теплоты” относится “система, способная отдавать или воспринимать теплоту и характеризующаяся определенной неизменной температурой”.

Здесь содержится два спорных положения.

– “Отдавать или воспринимать тепло”. Источник, который не отдает, а воспринимает – это никак не источник (скорее приемник).

– Требование “неизменной температуры” устарело – оно излишне. На практике и источники, и приемники тепла могут менять в ходе процесса свою температуру (и часто меняют).

В русском языке есть для всех этих случаев вполне корректный термин – “приемник”. Тогда тот объект, который отдает тепло, будет “теплоотдатчик”, а тот, который

* Примеры таких коэффициентов, взятые из литературы: “использования тепла”, “использования энергии”, “потери энергии”, “эффективный”, “абсолютный эффективный”, “внутренний эффективный”, “внутренний относительный”, “обобщенный регенеративный”, “заполнения цикла” и т.д. Опыт преподавания термодинамики в технических университетах показывает, что ни один студент (а затем и инженер не в состоянии не только запомнить, но и осознать такой набор ученых слов.

принимает – “теплоприемник”, и все становится на свое место. Это примеры можно продолжить.

Нельзя не учитывать, что термодинамика занимает ведущее место в теоретической базе энергетики, а ее термины и их производные широко используются. Поэтому все неточные и ошибочные термодинамические термины оказывают негативное воздействие на всю теплоэнергетику.

Ошибки и неточности в терминологии могут привести (и приводят) к ошибкам в понимании (что часто происходит), а ошибки в понимании – к неправильным действиям и практическим решениям; правильные термины, напротив, дают мыслям нужное направление.

Заключение. Ситуация, сложившаяся в последнее время с термодинамической терминологией, аналогична той, которая характерна как для теории теплопередачи (Термодинамика. Сб. определений. Теория теплообмена), так и энергетического баланса (Термодинамика. Сб. определений. Энергетический баланс. Вып. 84).

Последний сборник отражает давно устаревшие взгляды на вопросы, связанные с развитием и оптимизацией энергетического баланса нашей страны; он требует существенной переработки, основанной на анализе всего нового, что появилось за прошедшие десятилетия. Эти вопросы требуют специального квалифицированного рассмотрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бродянский В.М. Классическая термодинамика на рубеже XXI века. Состояние и перспективы развития // Изв. РАН. Энергетика. 2001. № 5. С. 17–43.
2. Термодинамика. Сб. определений. Вып. 103. М.: Наука, 1984.
3. Szargut J. Exergy method. UK: Witpress, 2005.
4. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. М.: Энергоиздат, 1988.
5. Карно С. Размышления о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу / В кн. “Второе начало термодинамики”. М.-Л.: ГТИ, 1934.
6. Бродянский В.М. По поводу дискуссии о распределении затрат на ТЭЦ // Теплоэнергетика. 1992. № 9.
7. Бродянский В.М. Вечный двигатель прежде и теперь. М.: Физматлит, 2002.
8. Харкевич А.А. Рассуждение о КПД // Вестник АН СССР. 1965. № 6. С. 27–33.

Москва

Поступила в редакцию
19.IX.2005