

# ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

## ТЕПЛОЕМКОСТЬ И ЭНТРОПИЯ

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

*Исследована природа понятий теплоемкость и энтропия и показано, что она одна и та же и объясняется токами тепла внутри термодинамической системы. Показано, что энтропия определяет потерянную системой энергию, а теплоемкость восстановленную. Опровергнута гипотеза Клаузиуса о тепловой смерти Вселенной.*

*The nature of the concepts of heat capacity and entropy is investigated and it is shown that it is the same and is explained by heat currents inside the thermodynamic system. It is shown that entropy determines the energy lost by the system, and the heat capacity is restored. Clausius's hypothesis of the thermal death of the Universe is disproved.*

**Ключевые слова:** турбулентность, теплоемкость, энтропия.

**Keywords:** turbulence, heat capacity, entropy.

Два фундаментальных понятия термодинамики теплоемкость и энтропия так, по большому счету, в настоящее время до конца и не поняты. Эти понятия до сих пор вызывают в дискуссиях принципиальные вопросы. Может быть, все это от того, что все очень просто? А может, наоборот, все очень сложно? Здесь следует вспомнить, что понятие теплоемкость пришло к нам совсем из другой науки, противоположной современной термодинамике - науки о теплороде. Ведь было время, когда эта наука о теплороде была вне конкуренции. Все, именно все, великие ученые, начиная с С. Карно, были ее приверженцами. Оттуда вышло очень много фундаментальных понятий, в том числе понятие теплоемкость. И спрашивается: "Почему это понятие не утратило своего прежнего значения и торжествует сегодня? Почему емкость, означающая, в общем-то "сосуд для жидкости" и предполагающая переливание в этот сосуд именно жидкости (теплорода), остается актуальной и для тепла в том современном понимании?" Видимо, до конца не разобрались с теплородом? А иначе как объяснить передачу тепла радиационным способом? Скорее всего, здесь имеет место некий дуализм? Во всяком случае, этот вопрос пока не закрыт.

Теперь об энтропии. Здесь все понятно? Скорее нет. Общепринятое объяснение - это мера хаоса. Хаоса чего? Газа? Структуры течения? Степени смешения веществ различной природы? Или чего-то общего, объединяющего, то тогда чего? Да! Хаос в том понимании беспорядка, в котором находятся молекулы, атомы, частицы относительно наиболее вероятного состояния, математического ожидания [1]. То есть дисперсия, мера разброса. Тогда дисперсия чего? Ответ: "Дисперсия функции распределения частиц в уравнении Больцмана".

Это понятие пришло к нам через термодинамику. А объяснение получило в статистической физике.

Понятие энтропия было зафиксировано эвристическим путем. Была констатирована новая функция, которая поначалу даже не воспринималась многими учеными того времени. Например, Нернст ее не только не понимал, но и не любил. А вот великий Больцман ее просто декларировал. Это была великолепная догадка, проявление глубочайшей интуиции - сказать, что энтропия - это всего-навсего логарифм функции распределения с обратным знаком. Только потом нашли прямое соответствие той первоначальной клаузиусовской термодинамической энтропии и больцмановской статистической энтропии.

И вот эти два понятия теплоемкость и энтропия сегодня в термодинамической науке занимают лидирующее место. Более того, у них размерность одна и та же. А если проанализировать глубже, то и смысл этих понятий становится очень близким. А может быть это одно и то же? Может быть энтропия - это теплоемкость? И наоборот теплоемкость - это энтропия?

### Формирование понятия теплоемкости

К понятию теплоемкости очень близко подошел в своих работах Георг Вильгельм Рихман, выдающийся русский физик. Изучая скорости охлаждения различных тел, он уже тогда пользо-

вался понятием объемной теплоемкости. Но, тем не менее, впервые к определению теплоемкости пришел шотландский ученый Джозеф Блэк. В его работах уже содержится идея теплоемкости как тепловой характеристики различных тел. С этой точки зрения Блэк объясняет результаты экспериментов известных ученых того времени: Тейлора, Мартина, Бургаве, Фаренгейта и Рихмана. Он полагает, что каждое тело имеет "свою определенную емкость по отношению к теплоте" и что именно это обстоятельство следует, прежде всего, иметь в виду при изучении распределения теплоты.

Для того, чтобы можно было сравнивать между собой различные количества теплоты, необходимо было ввести единицу для его измерения. В качестве такой единицы Ричард Кирван (современник Блэка) предложил то ее количество, которое нагревает единицу массы воды на один градус. Иными словами, Кирван предложил приравнять удельную теплоемкость воды единице [2]. Наименование для единицы количества теплоты калория было введено значительно позже Фавром и Зильберманом.

В дальнейшем Блэк со своим учеником и ассистентом Вильямом Ирвином провел в течение почти десяти лет большое количество экспериментов, которые окончательно убедили его в том, что каждое тело должно обладать своей собственной емкостью по отношению к теплоте. В итоге Блэком был предложен термин "теплоемкость". И в дальнейшем это понятие было принято всеми учеными, писавшими о теплоте.

Что касается термина "удельная теплоемкость", то его впервые применил финский химик Гадолин. В своих трудах он отмечает, что эта величина для каждого из тел практически постоянная, если данное тело сохраняет свое состояние неизменным. Гадолин также установил, что удельная теплоемкость газообразных веществ (газов) превосходит удельную теплоемкость жидкости. Твердые же тела имеют наименьшую теплоемкость.

Во времена Рихмана, Блэка, Вильке и других ученых последователи теории теплорода увидели один из решающих аргументов в пользу своей концепции. Предложенные термины "количество теплоты", "теплоемкость", "скрытая теплота" и другие целиком были выдержаны в духе вещественной теории теплоты и в таком смысле воспринимались последующим поколением физиков. Поэтому теория теплорода была господствующей научной концепцией в мировоззрении физиков XVIII века.



Георг Вильгельм Рихман



Юхан Гадолин



Джозеф Блэк

Сформировавшееся понятие теплоемкость в рамках теории теплорода не претерпело изменений при создании корпускулярной теории теплоты. И более того, в совокупности с понятием энтропия оно является основой, фундаментом современной термодинамики.

Понятие теплоемкость можно так и воспринимать, как некоторое свойство вещества, которое лимитирует количество, объемное или массовое, которое может воспринять тело при подходе к нему внешней тепловой энергии. Это свойство является специальным дозатором, ограничителем, регламентирующим потоки тепла в сторону вещества.

**Динамика взглядов на энтропию**

Беспрецедентный факт о том, что тепло всегда перетекает от горячего тела к холодному, то есть тепловые потоки всегда направлены в одну сторону, по-видимому, сподвиг Рудольфа Юлиуса Эммануила Клаузиуса придумать новую функцию, отражающую этот процесс. И он вводит в обиход термодинамики понятие энтропия. Это понятие также, как и теплоемкость, тесно связано с потоком тепла и температурой. Формальное введение этой функции дало ошеломляющий результат. С помощью этой функции стало возможным объяснять различные физические процессы: рассеивания энергии, тепловые потери и прочее. Функция явилась предметом анализа различных физиков. Ее связывали с процессами при работе турбомашин, тепловых двигателей. С ее помощью анализировали к.п.д. Был сформулирован фундаментальный второй закон термодинамики. И даже высказан всеобщий принцип обесценивания всей энергии Вселенной и в будущем наступления вечного холода.

К сожалению, многие аспекты во взглядах на энтропию даже в настоящее время так и не поняты. Понятие мера хаоса неопределенно и неточно. Введенное Людвигом Больцманом определение статистической энтропии является одним из вариантов доказательства несостоятельности теории Клаузиуса о тепловой смерти Вселенной. Дескать, это невероятно. Но утверждение о невероятности не является окончательным доказательством потому, что в какой-то степени, хоть и в малой степени, оно может оказаться вероятным. И в конце концов когда-нибудь это случится.

Разработав великолепную общую теорию, в том числе и теорию энтропии, Людвиг Больцман все-таки не поставил точку. Он дал возможность развивать это понятие будущим поколениям. Было много известных ученых, которые изучали эту великолепную функцию, доказывая при этом различные теоремы физики и математики. При этом все они тесно связывали свою деятельность со вторым началом термодинамики. Но справедливости ради следует сказать, что основные положения были разработаны двумя великими учеными - Клаузиусом и Больцманом. Новые формулировки этого понятия являлись лишь следствием результатов, полученных этими учеными [3].

Понятие энтропии тесно связано с необратимыми процессами. Энтропия является ответственной за внутренние токи внутри системы при реализации процессов диффузии, трения и теплопроводности. Равновесная термодинамика при реальных процессах становится идеальным, частным случаем. Скорости звука сменяются энтропийными скоростями. Эти скорости определяют коэффициенты диффузии, вязкости и теплопроводности [4]. Энтропия уже выступает не как некое статическое понятие, а как динамическое - энтропийные потоки. При этом и сама энергия обретает статус динамического понятия - потока энергии. В неравновесной термодинамике энтропия играет ключевую роль.

**Соответствие теплоемкости и энтропии**

Анализ целесообразно начать с интерпретации новой формулировки второго начала термодинамики [5]. Эта формулировка представляется в виде большого неравенства:

$$R \leq S \leq C_v \leq C \leq C_p.$$

Здесь в промежутках между крайними, граничными значениями находятся две рассматриваемые нами функции: энтропия (S) и

теплоемкость (C). Как видно, эти функции ограничены характеристиками внутренних процессов в веществе R и C<sub>v</sub> и внешних процессов внутри диапазона от C<sub>v</sub> до C<sub>p</sub>.

Из неравенства следует, что функции S и C являются функциями процессов. Значения R, C<sub>v</sub> и C<sub>p</sub> являются функциями состояния. Причем энтропия является функцией внутренних процессов (химические реакции, фазовые превращения и прочие). Теплоемкость же является функцией внешних процессов и связана с работой турбомашин, тепловых аппаратов и т.д.

При этом произведение (ST), которое связано с потенциалом Гиббса и Гельмгольца, а в общем случае с химическим потенциалом, ограничено слева большим потенциалом (RT). Справа это произведение ограничено потенциальной энергией. Оба ограничивающих потенциала отвечают за внутренние процессы. Теплоемкость, умноженная на температуру, то есть тепло процесса, а на практике тепло в циклах турбомашин и тепловых двигателей, ограничено внутренней энергией и энтальпией. Это тепло отвечает за совершение работы цикла. Очевидно, что максимальная работа цикла будет в случае, когда энтальпия сработает до внутренней энергии. То есть максимальная работа будет равна (RT). Идеальный коэффициент полезного действия будет зависеть от разности температур на входе и выходе из цикла и значений C<sub>p</sub> и C<sub>v</sub>:

$$\eta = 1 - \frac{1}{k} \frac{T_2}{T_1} [5].$$

Понятно, что этот коэффициент будет тем больше, чем больше разница в температурах (T<sub>1</sub> > T<sub>2</sub>).

**Что же будет со Вселенной?**

Итак, Клаузиус предсказал самое неприятное. Все остановится и всему будет конец. Будет вечная мерзлота. А может все-таки есть надежда на хорошее? Рассмотрим процессы во Вселенной с другой точки зрения. Будем считать всемирный процесс циклическим, колебательным. Все подчиняется колебаниям. Точнее автоколебаниям, являющимся частным случаем солитонов. Ведь было уже показано, что автоколебания - это временной солитон. И вполне возможно, что наша Вселенная тоже работает в режиме солитона.

Что требуется, чтобы реализовался солитон и автоколебания? Три вещи:

1. Система, колебательный контур.
2. Поток энергии, компенсирующий ее потери в реальном контуре.
3. Регулятор и клапан, который регламентирует подачу этой энергии, необходимой для восстановления процесса.

Что у нас есть сейчас?

Во-первых, есть система, контур, внутри которого происходят циклические процессы. То есть можно построить цикл.

Второе. Понятно, что энергия во Вселенной после прохождения реальных процессов расплывается переносным способом благодаря диффузии, вязкости и теплопроводности. Есть ли на её компенсацию внешняя энергия? Да [6]! Это солнце, звезды и ядерные реакции.

И третье. Есть ли дозатор этой энергии, который следит, чтобы внутрь системы энергии поступало ровно столько, сколько необходимо для восстановления процесса (автоколебательного процесса)? Да, тоже есть.

Итак, за расплытие и "обесценивание" энергии отвечает энтропия. Она работает в одну сторону. Всегда увеличиваясь, она стремится систему "заморозить". Но, с другой стороны, поступающая извне энергия облучает систему. И тогда система включает свою обратную связь. Тот свой дозатор, который начинает работать в противоположную сторону, "согреть" систему. Этим дозатором является теплоемкость. Именно теплоемкость возьмет достаточное количество энергии и "жизненный цикл" восстановится.

Как же теперь графически представить себе этот "жизненный цикл" Вселенной. По аналогии с идеальным циклом, содержащим в

(I-S) координатах три характерные изолинии  $I = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$  и две линии  $Q = \text{const}$ , можно этот цикл воспроизвести. Учитывая, что понятие температуры во Вселенной отсутствует, будем оперировать удельными параметрами и цикл построим в C-S координатах (рис. 1), который будет из себя представлять прямоугольник с двумя вертикальными значениями  $R = \text{const}$ ,  $C_v = \text{const}$  и двумя горизонтальными  $C_p = \text{const}$  и  $C_v = \text{const}$ . Говорить о коэффициенте полезного действия здесь неуместно, но стоит сказать, что этот цикл зависит только от функций состояния.

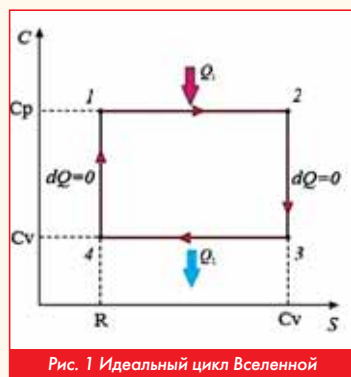


Рис. 1 Идеальный цикл Вселенной

Таким образом, гипотеза Юлиуса Клаузиуса опровергнута.

Представим далее количественную связь между энтропией и теплоемкостью. Будем исходить из того, что энтропия - это свойство вещества, отвечающее за рассеивание ("обесценивание") энергии. Она (энергия) теряется в вязких процессах, с потерей тепла, при механическом трении и др. Меткой или количественным параметром здесь является именно энтропия. Это - возрастающая функция, стремящаяся к пределу. Восстанавливается потерянная энергия в системе за счет внешней поставки энергии под "присмотром" теплоемкости. Именно теплоемкость является тем дозатором, который способен взять лишь необходимое количество внешней энергии. И тогда в случае баланса потерянной энергии и восстановленной можно записать:

$$dQ_{\text{пот}} = dQ_{\text{восст}}$$

Это значит, что  $TdS = CdT$ .

В дивергентной форме, теперь уже для потоков тепла это:

$$T \operatorname{div} S I = C \operatorname{grad} T.$$

Другими словами, энтропийный тензор  $S I$ , где  $I$  - единичный тензор будет пропорционален теплоемкости:

$$\operatorname{div} S I \sim C.$$

Это означает, что воздействие на этот тензор оператором дивергенция приведет диссипацию в исходное состояние [6].

### Постскриптум

И все вроде бы хорошо! Но! Не сходится одно утверждение. То, что энергия поступает именно от внешнего источника. От какого? Ведь вся материя размещена во Вселенной. При этом Вселенная - бесконечна. Где ее граница? И если есть другая Вселенная, которая способна питать энергией Нашу Вселенную, то где она? Ведь говоря о Солнце и Звездах, мы говорим о внутренних резервах нашей Вселенной. А где же внешнее проявление? Именно Солнце и Звезды питаются энергией от внешней Вселенной. Другой Вселенной и тоже бесконечной. Эта Вселенная - микромир. Оттуда Она посылает нам энергию термоядерных реакций. Эта другая Вселенная распространяется в бесконечность нуля, а граница ее - это наша реальность. Одну макрореальность мы воспринимаем как клаузиусовскую ощущаемую, а другую, как некую абстрактную бальмановскую, но тоже ощущаемую. Именно эта внешняя, граничащая с созерцательной, Вселенная и является источником энергии для погашения тепловых потерь. И еще! Что означает выражение "тепло или энергия теряется или обесценивается?". Это значит, что энергия с помощью энтропии уходит в другую Вселенную. Но потом, с помощью теплоемкости она оттуда возвращается. Происходит извечный обмен энергиями двух смежных Вселенных. Если одна Вселенная стремится к "похолоданию", то другая к "потеплению", а в целом все стремится к равновесию.

Итак, как было сказано выше, именно дивергенция является тем мостиком, по которому осуществляется переход тепла из одной Вселенной в другую. □

### Литература

1. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Закон пси от кси // Двигатель №2, 2017.
2. Я.М. Гельфер. История и методология термодинамики и статистической физики. М. Высшая школа, 1981.
3. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Базис-определяющие тензоры термогазодинамики // Двигатель №3, 2017.
4. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Энтропийные потоки и коэффициенты переноса // Двигатель №4, 2017.
5. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Реновация второго начала и новый идеальный цикл // Двигатель №5, 2017.
6. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Тензоры и хаос // Двигатель №6, 2017.

Связь с автором: [swgeorgy@gmail.com](mailto:swgeorgy@gmail.com)

## НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ



10 - 11 сентября Международная ассоциация "Союз авиационного двигателестроения" совместно с петербургской компанией АктивТестГруп провели Научно-технический совет "Новые технологии неразрушающего контроля деталей авиационного назначения".

Почти 100 специалистов из более, чем 40 различных российских авиастроительных и двигателестроительных предприятий,

включая Объединенную двигателестроительную корпорацию и Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, собрались в рамках НТС для обсуждения современного состояния капиллярного контроля и российских инновационных раз-

работок в области оборудования и материалов для капиллярного контроля. Особое место в программе НТС заняло знакомство участников с разработкой компании АктивТестГруп - автоматизированной установкой для капиллярного контроля, не имеющей аналогов в России и в мире. Запатентованная технология FPI All-in-VAC, реализуемая в установке КАМА, существенно повышает надежность выявления

поверхностных дефектов, увеличивает производительность контроля, делая его экологически безопасным и менее затратным.

Разработанная технология прошла проверку и уже получила положительное заключение ФГУП "ВИАМ" о ее соответствии первому классу чувствительности, то есть способности выявлять дефекты с шириной раскрытия менее 1 мкм. Президиумом НТС ФГУП "ВИАМ" была подтверждена эффективность технологических решений по интенсификации процесса капиллярного контроля по технологии FPI All-in-VAC, реализуемой на линии капиллярного контроля КАМА и даны рекомендации АктивТестГруп по дальнейшему совершенствованию методики капиллярного контроля с использованием технологии FPI All-in-VAC.

Президиум НТС АССАД одобрил результаты применения различных способов интенсификации процесса капиллярного контроля и рекомендовал участникам заседания подготовить и направить в АктивТестГруп образцы для тестового контроля по технологии FPI All-in-VAC на установке капиллярного контроля КАМА. □