

Полученные кривые показывают отсутствие азеотропов при разгонке рассматриваемой смеси. Анализ линий разгонки позволяет сделать вывод, что при повышенном содержании ацетонитрила более низкокипящий бутadiен-1,3 хуже испаряется из смеси компонентов в сравнении с цис-бутеном-2. Это свидетельствует о том, что бутadiен-1,3

можно выделить из смеси углеводородов C_4 при экстрактивной ректификации в присутствии повышенного количества ацетонитрила (более 0,5 мол.дол.) в составе кубового остатка, а полученные значения параметров бинарного взаимодействия могут быть использованы для моделирования процесса экстрактивной ректификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов, С.Ю. Выделение и очистка мономеров для синтетического каучука / С.Ю. Павлов. – Л.: Химия, 1987. – 230 с.
2. Ульянов, Б.А. Выделение дивинила из бутен-дивинильной фракции (БДФ) продуктов пиролиза углеводородного сырья / Б.А. Ульянов, И.А. Семёнов, А.С. Немцов. – Текст: непосредственный // Вестник Ангарского государственного технического университета. – 2022. – Т. 1, вып. 16. – С. 70-75.

3. Ульянов, Б.А. Сопоставление эффективности разделяющих агентов в процессе выделения дивинила из бутен-дивинильной фракции (БДФ) методом экстрактивной ректификации / Б.А. Ульянов, И.А. Семёнов, А.С. Немцов. – Текст: непосредственный // Вестник Ангарского государственного технического университета. – 2022. – Т. 1, вып. 16. – С. 75-78.

УДК 536.75

к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: semenov_ia82@mail.ru

Магистрант, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»
Магистрант, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»

ЭНТРОПИЯ В НАУКЕ, ТЕХНИКЕ И В ЖИЗНИ

Semenov I.A., Shefer P.P., Shishkin M.D.

ENTROPY IN SCIENCE, TECHNOLOGY AND LIFE

Аннотация. В статье рассмотрены исторические предпосылки появления и развития концепции энтропии. Сделан анализ факторов, способствующих распространению энтропии из узкой области физики, связанной с работой тепловых машин, в другие различные области человеческой деятельности.

Ключевые слова: энтропия, термодинамика, информация.

Abstract. The historical background for the emergence and development of the concept of entropy was discussed in the paper. An analysis is made of how entropy from a narrow area of physics related to the operation of heat engines expended into other various areas of human activity.

Keywords: entropy, thermodynamics, information.

Энтропия, как концепция, является одним из наиболее широко признанных понятий в области физики. При этом она выходит за пределы науки и техники, и затрагивает жизнь даже тех, кто далек от этих областей. Однако, несмотря на широкое признание, для многих она остается сложной и запутанной идеей. Даже людям, погруженным в мир физики и науки, часто сложно дать ясное и исчерпывающее объяснение ее сути.

Энтропия, как физический параметр, появилась в середине XIX века. Однако понимание ее сути не может быть полным для анализа событий и открытий в мире физики и техники, которые предшествовали ее открытию.

Обращаясь к истории XIX века, мы сталкиваемся с поворотной эпохой, отмеченной революционными достижениями. Эта эпоха неразрывно связана с развитием тепло-

вых паровых машин и возникновением науки термодинамики. Понимание этого периода времени имеет первостепенное значение, поскольку именно тепловые двигатели стали мощным толчком к бурной индустриализации человечества, обеспечивая экономическую основу для развития термодинамики и последующего рождения важнейшей концепции – энтропии.

В контексте этой истории нельзя не упомянуть французского ученого и инженера Сади Карно. В своих научных изысканиях Сади Карно пытался разработать принципиально новый термодинамический цикл тепловой машины, обеспечивающий максимальную эффективность. Создание такой машины обещало дать существенное преимущество французской экономике. Несмотря на свою молодость, Карно сделал ряд революционных открытий, которые он опубликовал в своей единственной работе под названием «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» [1, 2].

Понять принципы работы тепловых машин, над которыми работал С. Карно, можно при помощи аналогии с более простым механическим устройством – водяным колесом (рис. 1).

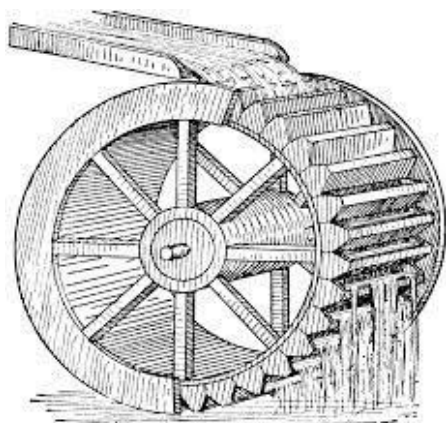


Рисунок 1 – Водяное колесо

Водяное колесо использует силу падающей воды. Когда вода падает с более высокого уровня на землю, ее вес оказывает на колесо крутящую силу, что приводит к выработке полезной работы. По сути, падающая вода обеспечивает источник энергии, которую эффективно использует данный вид двигателя.

Тепловой двигатель работает по тому же фундаментальному принципу с той лишь разницей, что источником энергии служит

тепловой поток. В тепловых машинах тепло перетекает из области с более высокой температурой в область с более низкой температурой (рис. 2). При таком переходе из потока тепла можно извлечь полезную работу аналогичную работе водяного колеса.

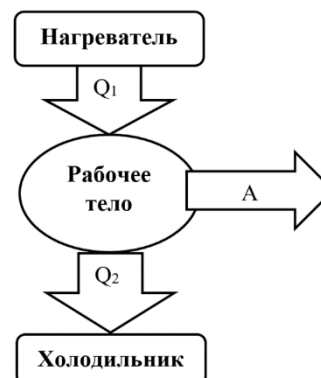


Рисунок 2 – Схема работы тепловой машины
 Q_1 – тепловой поток высокой температуры,
 Q_2 – тепловой поток низкой температуры, A – работа тепловой машины

В своих трудах Сади Карно удалось сформулировать идеальную и наиболее эффективную схему работы теплового двигателя, которую мы сейчас знаем под названием идеального цикла Карно [2].

Теоретические изыскания показали, что даже идеальный цикл все же не может извлекать работу из всего теплового потока Q_1 . Он может использовать только его часть. Другая неиспользуемая часть Q_2 должна отводиться «холодильнику». Это привело к введению понятия термодинамического КПД, который даже для идеальной тепловой машины никогда не достигает 100%. Важно отметить, что тепловые двигатели той эпохи работали намного хуже. Ни одна тепловая машина не могла достичь вершины термодинамического совершенства и сравниться с работой идеального цикла.

Вторым аспектом работы цикла Карно была его обратимость. Он обладал уникальным свойством: тепло могло произвести работу. Но то же самое количество работы могло воспроизвести тот же самый тепловой поток. Реальные тепловые двигатели не обладали таким свойством, что делало их работу по своей сути необратимой.

Такое несоответствие между теорией и практикой вызвало вопрос: почему реальные тепловые двигатели работали намного хуже идеальной машины? Анализируя же обычный процесс перехода тепла из области с вы-

сокой температурой в область с низкой температурой без выполнения какой-либо работы можно было сделать вывод, что прямой потери энергии в процессе не происходит. Но при этом полученное низкотемпературное тепло уже не может совершать работу. В этом контексте стало крайне важно понять, что терялось в случаях работы реальных тепловых машин и простом теплообмене, и как количественно оценить эти потери. Размышления Карно в конечном итоге привели к двум фундаментальным вопросам: во-первых, какова природа этих потерь и, во-вторых, почему реальные процессы нельзя повернуть вспять?

Сади Карно, несмотря на его огромный задел в термодинамике, постигла трагическая судьба. История помнит его по единственному труду, который, по сути, положил начало многим исследованиям в данной области [2]. В рамках своей работы Карно выдвинул две формулировки, которые стали краеугольными камнями зарождающейся науки термодинамики. Во-первых, он сформулировал, что теплоту, как и материю, нельзя уменьшить или увеличить в количестве. По сути, это воплощает принцип сохранения энергии: энергия не исчезает и не возникает спонтанно; ее чистое изменение остается нулевым. Однако Карно также заметил, что не вся энергия одинакова. Он провел аналогию с материей, постулируя, что энергия подобно материи «может быть плотной или разряженной» [1].

Идеи Карно побудили к работе в этой области многих других ученых, в том числе такого известного деятеля науки как Уильяма Томсона Лорда Кельвина [3].

Лорд Кельвин, известный в области физики, прославился введением шкалы абсолютных температур, и определением концепции абсолютного нуля. Анализируя работу Карно, Кельвин размышлял о том, как можно достичь 100 % эффективности с помощью идеальной машины. Этот вопрос заставил его постулировать, что в идеальной машине тепло должно переходить к холодному источнику с температурой равной абсолютному нулю Кельвина – самой низкой возможной температуре. Впоследствии размышления Кельвина завершились формулировкой, что температуру можно понимать, как меру «плотности» энергии.

Несмотря на подобные открытия, не существовало общепринятой величины, позволяющей количественно определить, на-

сколько «хороша» или «плоха» энергия. Значительный вклад в раскрытие этого вопроса внес Рудольф Юлиус Эмануэль Клаузиус [1].

Первоначально Клаузиус сосредоточился на принципе диссипации, исследуя, почему молекулы самопроизвольно расходятся при нагревании газа. Однако позже он ввел понятие энтропии (пер. с греч. «обращение», «превращение»).

Клаузиус также пытался ответить на вопрос, почему реальные термодинамические циклы не могут достичь того же совершенства, что и идеальный цикл Карно. Стало очевидно, что основными препятствиями являются частичные потери энергии в окружающую среду, и расходование полезной работы на силу трения. Не вся энергия может быть использована для полезной работы: часть ее неизбежно будет рассеяна во внешнем пространстве. Клаузиус стремился понять и количественно оценить этот расход, что в конечном итоге привело к разработке концепции энтропии. Эта концепция сыграла ключевую роль в понимании ограничений тепловых машин и направления преобразования энергии.

Клаузиус сделал выводы, что, с одной стороны, энергия нигде не исчезает, с другой стороны, она самопроизвольно и неизбежно рассеивается. Мерой рассеивания и стала нововведенная величина – энтропия. Он заявил, что энергия Вселенной остается постоянной, что можно рассматривать как более совершенную версию закона сохранения энергии. Введя понятие энтропии, он предположил, что энтропия Вселенной имеет тенденцию увеличиваться.

Изначально энтропия была в большей степени математическим и абстрактным понятием – математической функцией, облегчающей описание текущего положения дел. В области физики при этом данная функция стала занимать особое место. Ее основная идея заключалась в том, что энергия неизбежно рассеивается, поэтому функция может с течением времени спонтанно только увеличиваться.

В любом самопроизвольном термодинамическом процессе энтропия неуклонно возрастает. Однако, как только процесс достигает равновесия, энтропия перестает увеличиваться, а значит, она достигает своего максимального значения. Это фундаментальное свойство энтропии позволило объяснить, чем реальные тепловые двигатели от-

личаются от идеального цикла Карно. Когда работает идеальный цикл Карно, энтропия остается неизменной. Именно поэтому он обладает свойством обратимости. Напротив, работа реальных тепловых машин приводит к увеличению энтропии, что делает процесс необратимым.

Концепция энтропии, первоначально созданная для решения конкретных вопросов тепловых двигателей, с течением времени начала распространяться в других областях физики. Один из особенно важных ее аспектов заключался в том, что энтропия могла математически предсказывать развитие процессов. Она стала тем математическим инструментом, позволяющим понять, что будет происходить с процессом внутри изолированной системы. Независимо от специфики того, что происходит внутри изолированной системы, процессы будут развиваться только в сторону увеличения энтропии системы.

Одним из выдающихся деятелей, признавших полезность энтропии, был известный ученый Джозайя Уиллард Гиббс. Гиббс оценил прогностические свойства энтропии, но находил ее несколько ограничительной, поскольку ее можно было применять только к изолированным системам. Однако многие практические ситуации не являются по-настоящему изолированными. Поэтому Гиббс, опираясь на энтропию, разработал свою теорию химических потенциалов, выведя серию других математических потенциалов, которые, как и энтропия, позволяют указать направление протекания самопроизвольных процессов. Эти уравнения дают представление о том, куда пойдет процесс и в каком направлении он будет развиваться. В своих работах Джозайя Уиллард Гиббс представил концепцию свободной энергии. Свободная энергия представляет собой ту часть энергии внутри любого вещества, тела или системы, которая может быть преобразована во что-то полезное. За свою новаторскую работу, которая расширила применение второго закона термодинамики за пределы тепловых двигателей и включила всестороннее рассмотрение взаимосвязи между химической, электрической, тепловой и другими формами энергии, Гиббс получил признание в виде медали Копли – награды Лондонского королевского общества.

Хотя первоначально энтропия применялась в первую очередь к тепловым двигателям, она начала проникать в другие обла-

сти физики и техники, не связанные напрямую с тепловыми двигателями. Что особенно вызвало интерес, так это идея о том, что энтропия сродни времени. Точно так же, как время является параметром, который постоянно движется вперед, энтропия стала тем самым неубывающим параметром, который неуклонно движет все процессы к их логическому завершению. По этой причине в термодинамике энтропию стали называть «стрелой времени».

Эта концепция привела к важному вопросу: куда в конечном итоге ведет эта «стрела времени? И Лорд Кельвин, и Клаузиус попытались ответить на этот вопрос, и их прогнозы не были оптимистичными. Они признали, что увеличение энтропии в конечном итоге приведет к выравниванию температур во Вселенной. Все тела, способные обмениваться теплом, в конечном итоге сделают это. Лорд Кельвин утверждал, что через ограниченный период времени Земля окажется в непригодном для поддержания жизни состоянии и все процессы прекратятся. Клаузиус придерживался более глобальной точки зрения на этот вопрос и предрекал «тепловую смерть» для всей Вселенной [1, 3].

Но энтропия подобно другим параметрам термодинамики все же оставалась макроскопическим параметром. Ученым же не давала покоя природа энтропии: чем она являлась на уровне микромира для молекул вещества. Одной из ключевых фигур в ответе на этот вопрос был Людвиг Больцман, основатель третьего закона термодинамики.

Понять концепцию Больцмана можно на простом примере: изменении агрегатного состояния воды. Вода может существовать в разных состояниях: твердом (лед), жидком (вода) и газообразном (пар). Во льду молекулы воды плотно упакованы и связаны друг с другом в специфической кристаллической решетке. Лед представляет собой особую конфигурацию, особое состояние молекул воды, и важно отметить, что существует ограниченное количество способов, которыми молекулы могут располагаться так, чтобы в результате образовалось то, что мы воспринимаем на макроскопическом уровне как лед.

С другой стороны, жидкая вода представляет собой другой случай. На молекулярном уровне связи между молекулами жидкой воды различаются по силе и поведе-

нию их в твердой фазе. Во льду молекулы образуют относительно прочную, упорядоченную и структурированную структуру, тогда как в жидкой воде связи не такие прочные, и молекулы движутся более хаотично. Число возможных конфигураций энергетических состояний молекул жидкой воды значительно больше, чем у льда.

В случае водяного пара между молекулами существует еще меньше связей, они движутся более независимо и хаотично, а число возможных конфигураций их взаимодействий и положений значительно больше, чем для воды.

Анализируя все эти различия, Больцман ввел понятие термодинамической вероятности – математического показателя, который численно определял количество возможных конфигураций молекул вещества, которые будут соответствовать текущему состоянию вещества. Этот показатель он связал с макроскопическим параметром энтропией:

$$S = k \ln \Omega, \quad (1)$$

где S – энтропия системы, Дж/К; Ω – термодинамическая вероятность; $k=1,381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Появление формулы (1) ознаменовало значительный сдвиг в понимании энтропии, которая с тех пор стала восприниматься как мера дезорганизации или беспорядка, по крайней мере, на молекулярном уровне. Чем больше энтропия, тем более неупорядочены молекулы и больше количество их возможных состояний.

Концепция энтропии в дальнейшем распространила свое влияние за пределы чистой физики, проникнув в другие научные дисциплины и различные аспекты человеческой мысли, которые не были связаны с физикой.

В XX веке американский ученый Клод Шеннон, который в работал в области теории информации, казалось бы, не связанной с молекулярной физикой, химией или тепловыми двигателями, сделал интересное наблюдение. В своей работе по теории информации Шеннон подчеркивал разнообразие информации.

Клод Шеннон, родоначальник теории информации, заметил, что информация бывает разного «качества». Некоторая информация ясна, понятна и недвусмысленна, тогда как другая информация может быть расплывчатой и допускать множественные интерпретации. Чтобы численно охарактеризо-

вать степень информации или сигналов, Шеннон разработал функцию неопределенности, основанную на статистических принципах. Целью этой функции было количественное определение уровня неопределенности или двусмысленности в пределах заданного фрагмента информации:

$$H = - \sum_{i=1}^k p_i \cdot \log p_i,$$

где H – функция неопределенности (информационная энтропия); k – количество трактовок информации; p_i – вероятность i -ой трактовки информации.

Математическая форма, использованная для расчета функции неопределенности, имела сходство с математическими формулами, которые использовал Людвиг Больцман в своих работах. В результате Шеннону было предложено назвать свою функцию «информационной энтропией» из-за такого математического сходства. Это ввело новую функцию в область теории информации и придало ей определенную степень признания и распространения.

Идея связать чисто математическую формулу с физической концепцией была несколько спорной, но она привела к тому, что энтропия вышла за пределы физики в различные сферы науки и жизни, уходя далеко за узкие рамки тепловых двигателей и молекул.

Понять концепцию информационной энтропии можно рассмотрев классический пример – игры «орел и решка». У данной игры есть два возможных исхода: выпадение «орла» или «решки». Используя формулу Шеннона функцию неопределенности (информационную энтропию), можно рассчитать, что для этой игры она равна единице. Это указывает на некоторую степень неопределенности возможного исхода. При игре с монетой, которая с обеих сторон имеет одно и тоже изображение, например, «орел», такой неопределенности не имеется. Энтропия игры в этом случае будет равняться нулю.

После появления концепции информационной энтропии она стала универсальным понятием, которое можно применять к различным явлениям, событиям и понятиям жизни. Энтропия стала служить числовым обозначением неопределенности, дезорганизации и хаоса в общем смысле. Например, рассмотрим военный парад как конкретное мероприятие. У людей обычно есть схожее

друг с другом понимание того, что собой представляет военный парад: организованные формирования людей в строгой военной форме, выполняющие синхронные марширующие действия. Ограниченное количество возможных вариантов того, как может проводиться военный парад, означает, что он как событие имеет низкую энтропию.

Далее проанализируем другое мероприятие – молодёжную вечеринку. Молодёжная вечеринка менее специфична и может принимать различные формы и виды деятельности. Разные люди могут совершенно по-разному проводить подобное мероприятие. Поскольку концепция молодёжной вечеринки менее конкретна, менее структурирована и более неопределенна, она, как мероприятие, имеет более высокую энтропию.

Говоря об энтропии, важно помнить второй закон термодинамики, который гласит, что в самопроизвольном процессе энтропия имеет тенденцию возрастать. Когда мы применяем энтропию к любому понятию или явлению, то можем сделать предположение о том, как событие или явление будет развиваться, если его оставили на волю слу-

чая и не прилагать усилий к поддержанию строгой организации. Согласно второму закону термодинамики, спонтанность имеет тенденцию приводить к усилению беспорядка или хаоса.

В заключение отметим, что энтропия – это концепция, которая вышла за рамки своего происхождения в физике и нашла применение в различных областях, помогая нам понять естественную тенденцию к увеличению беспорядка и случайности в различных процессах и событиях.

Трудность в объяснении энтропии возникает из-за ее универсальности и многогранности. На протяжении всей своей истории энтропия принимала различные значения и интерпретации. Первоначально она появилась как чисто физический параметр, используемый в качестве меры рассеяния энергии и описания «качества» энергии, степени ее полезности. С момента появления работ Больцмана и Шеннона энтропия превратилась в меру разнообразия и неопределенности. В общекультурном контексте ее называют мерой беспорядка и хаоса во Вселенной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кошманов, В.В.** Карно, Клапейрон, Клаузиус / В.В. Кошманов. – М.: Просвещение, 1985. – 95 с.

2. **Льоцци, М.** История физики / М. Льоцци. – М.: Мир, 1970. – 464 с.

3. **Храмов, Ю.А.** Томсон (Кельвин) Уильям (Thomson William, Baron Kelvin) // Физики : Биографический справочник / Под ред. А.И. Ахиезера. – Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: Наука, 1983. – 400 с.