

Михайловская военная артиллерийская академия, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. На основе анализа актуальной научной, учебной и методической литературы и опыта преподавания термодинамики в рамках дисциплины физика в вузе создан контент включающий тщательно отобранный и логически структурированный лекционный материал, использующий последовательный метод изложения второго начала термодинамики как логического следствия базисных аксиом и определений классической термодинамики, отвечающий современному состоянию развития термодинамики как науки. По своему объему и количеству дидактических единиц материал адаптирован к требованиям ФГОС 3++ и полностью соответствует типовым учебным программам по физике для вузов инженерного профиля.

Ключевые слова: термодинамика; второе начало термодинамики; энтропия; обратимые и необратимые процессы

Классическая термодинамика, изучаемая на первом курсе инженерных вузов в рамках общего курса физики фактически рассматривает только равновесные состояния и квазистатические процессы. Однако в настоящее время бурно развиваются такие тесно связанные друг с другом разделы физики как термодинамика неравновесных процессов и диссипативных систем, явления самоорганизации, синергетика, изучение которых по-видимому будет осуществляться в лучшем случае на спецкурсах либо даже в рамках самообразования. Это обстоятельство, как и тот факт, что на изучение общей физики в вузе при переходе на ФГОС 3++ значительно сокращен бюджет времени вынуждает оставить в базовом контенте дисциплины только основу обобщенных знаний, сохранить только те темы и вопросы, которые относятся к сравнительно медленно изменяющимся со временем фундаментальным понятиям физики, имеющим методологический характер. В состав ядра физических знаний должны обязательно быть включены и основы классической термодинамики, без освоения которых невозможно формировать общепрофессиональные компетенции, предусмотренные рабочей программой и тем самым обеспечиваться их применение на практике при расчете машин и химико-технологических процессов.

Фундаментальных методологических понятий термодинамики сравнительно немного. Это термодинамическая система, термодинамические процессы, термодинамические параметры, первое и второе начала термодинамики, термодинамические функции и величины. Особенное значение имеет связь термодинамики с молекулярно-кинетической теорией и статистической физикой. К числу важнейших фундаментальных законов и понятий термодинамики, объединяющих широкий спектр физических знаний, следует отнести понятия макро- и микросостояний, внутренней энергии, энтропии и первого и второго начал термодинамики.

Проблема удовлетворительного рассмотрения таких актуальных разделов термодинамики как второе начало термодинамики, введения и использования понятия энтропии в курсе физики выливается в чрезвычайно сложную методическую задачу и попытка ее решения при условии снижения уровня и качества физических знаний у обучающихся остается и поныне актуальной для преподавателей физики в высших учебных заведениях, особенно с учетом требований ФГОС 3++ и сокращением времени, отводимого на ее изучение.

Второе начало термодинамики при всей его кажущейся простоте, до сих пор является одним из самых трудных и часто неверно трактуемых законов классической физики. Объективная сложность в преподавании раздела термодинамики, посвященному ее второму началу физики состоит в отсутствии наглядности определений основополагающих понятий термодинамики, при изучении которых у учащихся возникают когнитивные трудности в их восприятии. Трудности в усвоении обучающимися данного раздела обусловлены не только сложностью материала, который отличается абстрактностью и избыточной разнообразностью, но и несовершенством методики изложения этого материала.

С учетом того, что математическая подготовка студентов первого курса совершенно не отвечает используемому в термодинамике математическому аппарату, формально математический подход к установлению важнейших термодинамических понятий не соответствует объективному положению вещей, приводит к утрате физической ясности термодинамических положений, создает у обучающихся негативное отношение к изучаемому материалу и искаженное представление о термодинамике как бесплодной и ненужной для их будущей профессии абстрактной схоластики. В противоположность такому подходу по нашему мнению ход физических рассуждений всегда имеет преимущество ясности и глубины в сравнении с формально математическими построениями.

Термин «второе начало термодинамики» существует и употребляется в физике уже более ста лет. Само название «Второе начало термодинамики» и исторически первая его формулировка (1850 г.) принадлежат Р. Клаузиусу. Несмотря на свою общепризнанность и постоянное применение в разнообразных областях естествознания и техники до сих пор разные авторы вкладывают в него различное содержание, что закономерно оставляет у тех, кто приступает к его изучению некоторую неудовлетворенность. Помимо всего прочего особенность второго начала термодинамики заключена в том, что иногда его проявления представляются завуалированными и лишь при углубленном изучении явлений могут быть уяснены.

Из того факта, что формулировок второго закона было почти столько же, сколько его обсуждали с момента введения в научный нарратив и попытки как-то по-новому изложить его повторяются до сих пор однозначно вытекает, что его содержание значительно труднее определить сжатой формулировкой, чем содержание первого начала. В настоящее время в научной литературе существует как минимум 28 различных формулировок второго начала, из которых важнейшими полагаются примерно 18. Эмпирические формулировки второго начала термодинамики имеют ограниченный характер в том смысле, что каждая из них выражает результат определенной группы опытов и утрачивает смысл за пределами этих опытов. Эти формулировки не выражаются в математической форме и большинство из них носят характер запретов [1]. Обычно в курсе общей физики рассматриваются только следующие два положения считающиеся равносильными: формулировка Томсона – Планка и формулировка Клаузиуса.

На наш взгляд более глубокому пониманию физического смысла второго начала термодинамики и связанных с ним понятий энтропии, обратимых и необратимых процессах при первичном

знакомстве с ними и, как следствие, более осознанному подходу к решению задач способствует рассмотрение роли второго начала термодинамики как основания аксиоматической теории без опоры на представления о микроструктуре вещества.

Опыт работы и проводимый на протяжении ряда лет анализ качества усвоения материала большинством обучающихся приводит нас к убеждению, что при первичном ознакомлении их с содержанием второго начала термодинамики следует формулировать единым и самым общим образом как закон существования и возрастания особой функции состояния системы, которую Клаузиус назвал энтропией. Согласно этому закону, в замкнутой системе энтропия S при любом реальном процессе либо возрастает, либо остаётся неизменной, т. е. изменение энтропии $dS \geq 0$; знак равенства имеет место для обратимых процессов. В состоянии равновесия энтропия замкнутой системы достигает максимума и никакие макроскопические процессы в такой системе, согласно второму началу термодинамики невозможны. Введенное таким образом понятие энтропии, как термодинамической функции состояния системы позволяет как показывает наш опыт значительно глубже осознать смысл второго начала термодинамики. Утверждение существования функции S совершенно не зависит от необратимости естественных процессов. Основанием для такого понимания может служить замечание, что все соотношения, имеющие характер равенств, выводимые из второго начала термодинамики, используют лишь одно свойство энтропии: ее бесконечно малое приращение dS является полным дифференциалом.

Студенты должны твердо усвоить, что для всех физических процессов, протекающих в любой изолированной, т. е. лишенной возможности обмена энергией или веществом с окружающей средой и сохраняющих постоянный объем системе при данных условиях ее существования, существует общий, единый критерий, которым определяются возможность, направление и предел самопроизвольного протекания этих процессов: характер изменения энтропии в этих процессах.

Для незамкнутой системы возможны процессы сопровождающиеся возрастанием энтропии. Это приводит в общем случае необратимых процессов к неравенствам:

$$\delta Q \leq T dS, (1)$$

$$dU - T dS - \delta A \leq 0, (1')$$

где δQ – переданное системе количество теплоты, δA – совершённая над ней работа, dU – изменение её внутренней энергии, T – абсолютная температура; знак равенства относится к обратимым процессам.

Для обобщения понятия энтропии на случаи неравновесных состояний и неравновесных процессов достаточно сослаться на свойство аддитивности энтропии, т. е. того факта, что энтропия тела или системы в целом равна сумме энтропий его элементов.

В рамках предлагаемого нами строго последовательного термодинамического подхода не предполагается привлечение каких-либо модельных представлений о строении вещества и, следовательно, не может быть раскрыт физический смысл энтропии и выявлен статистический характер второго начала термодинамики. Этим по нашему мнению и оправдывается то, что в разделе термодинамика мы предлагаем рассматривать второе начало термодинамики как абсолютный закон природы в ранге постулата. Тем самым разделяется содержание понятия энтропии как функции макроскопического состояния системы, вводимого в термодинамике от его физической трактовки как меры беспорядка в статистической физике.

Сложность понимания особенно неподготовленными и слабо мотивированными учащимися энтропии в курсе физики связана с невозможностью ее непосредственного восприятия и отсутствием прибора, который бы измерял энтропию, как, например, измеряют температуру. В связи с этим, на наш взгляд, необходимо так или иначе рассматривать все методические приемы и возможности формирования понятия энтропии на базовом уровне. При таком подходе представляется вполне логичным считать такие постулаты как приведенные выше: постулат Томсона – Планка и постулат Клаузиуса или эквивалентные им утверждения следствиями принципа возрастания энтропии в

изолированных системах (подобную логическую задачу можно предложить студентам в качестве индивидуального задания на самостоятельную работу).

С целью мотивирования студентов к изучению второго начала термодинамики и освоению его терминологического багажа следует настойчиво и последовательно доводить до их сведения, что в современной физике энтропия рассматривается как одно из фундаментальных естественнонаучных понятий. Она играет определяющую роль не только в теории тепловых явлений, но и в относительно новой области естествознания – синергетике – науке, изучающей явления самоорганизации в открытых системах, то есть процессы возникновения упорядоченных структур из хаоса или, по-другому, генерацию информации. Исследование информационных процессов оказывается не только актуальной задачей естественных наук, прежде всего – физики сложных систем, молекулярной биологии и генетики, но и, благодаря интенсивному внедрению информационных технологий во все сферы человеческой деятельности, становится важнейшим фактором развития цивилизации.

Список литературы:

1. Абекова Ж.А., Спабекова Р.С., Оралбаев А.Б., Ермаханов М.Н. Методика изучения особенностей второго начала термодинамики в программе высшей школы // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 1-3. – С. 459–462.
2. Ивлиев А.Д. Физика: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 672 с.: ил.
3. Курс физики: Учебник для вузов: В 2 т. Т. 2. / Под ред. В.Н. Лозовского. – СПб.: Издательство «Лань», 2021. – 573 с., ил.

B. A. Ustinov, A. O. Fadeev

Problems of modernization of the content of some relevant sections of thermodynamics and methods of teaching them for engineering specialties in universities to ensure compliance with the requirements of the Federal State Educational Standard 3++

Mikhailovskaya artillery military Academy, Russia

Abstract. *Based on the analysis of current scientific, educational and methodological literature and the experience of teaching thermodynamics within the discipline of physics at the university, a content has been created that includes carefully selected and logically structured lecture material using a consistent method of presenting the second principle of thermodynamics as a logical consequence of the basic axioms and definitions of classical thermodynamics, corresponding to the current state of development of thermodynamics as a science. In terms of its volume and number of didactic units, the material is adapted to the requirements of the Federal State Educational Standard 3++ and fully complies with standard physics curricula for engineering universities.*

Keywords: *hermodynamics; the second principle of thermodynamics; entropy; reversible and irreversible processes*