

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

И.Б. Павлова

МЕТОДЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО
АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК

Под редакцией *В.И. Хвесюка*

Рекомендовано Научно-методическим советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебного пособия
по курсу «Термодинамика»

Москва
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
2011

УДК 621.1.016(075.8)

ББК 31.31

П12

Рецензенты: Р.З. Кавтарадзе, В.К. Тютин

Павлова И.Б.

П12 Методы термодинамического анализа эффективности теплоэнергетических установок : учеб. пособие по курсу «Термодинамика» / И.Б. Павлова; под ред. В.И. Хвесюка. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 108, [4] с. : ил.

Дано представление о круговых термодинамических процессах (циклах) и об обратимых и действительных (необратимых) циклах теплоэнергетических установок. Показано, в чем заключается недостаточность анализа эффективности циклов и установок, базирующегося только на 1-м законе термодинамики; описано, в чем состоит анализ эффективности установок, основанный на обоих – 1-м и 2-м – законах термодинамики (эксергетический анализ). Объяснены понятия эксергии и эксергетических потерь. Приведены примеры применения различных методов анализа эффективности: метода коэффициентов полезного действия при анализе теплосиловой установки, а также энтропийного и эксергетического методов во всех разобранных примерах.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению «Теплоэнергетика» и изучающих дисциплину «Термодинамика».

УДК 621.1.016(075.8)

ББК 31.31

ПРЕДИСЛОВИЕ

В рассматриваемых в данном пособии теплоэнергетических установках происходят превращения энергии, в результате которых либо получается работа (в теплосиловых установках), либо передается теплота с низшего температурного уровня на высший (в холодильных и теплонасосных установках). При этом энергетическим ресурсом, которым необходимо располагать, в первом случае является теплота, а во втором – работа.

Проведение общего анализа эффективности таких установок позволяет выяснить:

- как получить максимальный выход работы, холода¹ или теплоты при минимальных затратах соответственно теплоты (топлива – органического или ядерного) или работы (электроэнергии);
- как обеспечить минимальные затраты металла и других материалов при условии достижения необходимой прочности и надежности конструкций; как ограничить затраты на обслуживание установок и т. п.;
- как свести к минимуму вред, наносимый окружающей среде действием теплоэнергетических установок.

Исследования, связанные с первым из поставленных вопросов, заключаются в проведении термодинамического анализа установок. Для выработки мероприятий, необходимых для решения задач, перечисленных во втором и третьем пунктах, требуется проведение технико-экономического анализа. Окончательные выводы можно сделать с учетом и термодинамического, и технико-экономического анализов. В данном пособии вопросы технико-экономического анализа не затрагиваются. Здесь рассматриваются методы термодинамического анализа прямых и обратных необратимых (реальных) циклов различных теплоэнергетических установок.

¹ *Производством холода* называется происходящий в холодильных машинах процесс отвода теплоты от охлаждаемых объектов при температуре ниже температуры окружающей среды [11].

Обычно термодинамический анализ начинается с рассмотрения обратимого цикла. На этой стадии исследования процесса преобразования энергии результаты получаются как следствия 1-го закона термодинамики. Например, если речь идет о преобразовании теплоты в работу, то оценивается отношение величин, входящих в уравнение (1.1а), которое следует из 1-го закона термодинамики, т. е. отношение полученной работы к количеству затраченной теплоты (термический КПД цикла).

Поскольку уравнение 1-го закона термодинамики справедливо для всех процессов – и обратимых, и необратимых, – его используют в виде уравнения баланса теплоты при анализе и необратимых циклов, а также установок в целом. Но на основе уравнения теплового баланса не удастся установить характер распределения необратимости по отдельным элементам установки и провести количественную оценку местных потерь. Так как снижение эффективности преобразования теплоты в работу связано с возрастанием энтропии при проведении этого процесса, оценивать необратимые потери можно только с использованием 2-го закона термодинамики.

Таким образом, задача термодинамического анализа заключается не только в том, чтобы определить предельно возможную эффективность установки, но также и в том, чтобы выявить те элементы установки, уменьшение необратимости в которых может повлиять на повышение эффективности установки в целом. Поэтому термодинамический анализ должен быть основан на обоих законах термодинамики – 1-м и 2-м. В данном пособии показано, в чем состоит недостаточность термодинамического анализа эффективности теплоэнергетических установок по показателям, полученным на основе только 1-ого закона термодинамики, а также как проводится анализ с применением обоих законов термодинамики.

Автор выражает признательность доценту кафедры Э-6 В.И. Хвостову, высказавшему целый ряд замечаний, и аспиранту кафедры Д.Н. Карбушеву, выполнившему графическую часть работы.

1. КРУГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ (ЦИКЛЫ)

Термодинамическая система и окружающая среда. *Термодинамической системой* (ТС) называется макроскопический объект, подлежащий термодинамическому анализу. Все другие тела, которые не входят в состав исследуемой ТС и с которыми ТС может взаимодействовать, принято называть *окружающей средой* (ОС). Взаимодействующие ТС и ОС обмениваются между собой энергией и веществом или только энергией.

Возможны два качественно различных способа передачи энергии от одного тела к другому: передача энергии в форме работы (совершением работы) и в форме теплоты (путем теплообмена). Передача энергии в форме работы происходит в процессе силового взаимодействия тел. Работа, совершенная над телом, есть работа силы, приложенной к нему со стороны другого тела, с которым первое тело взаимодействует. В зависимости от природы действующих сил работу называют механической, электрической и др.

Передача энергии в форме теплоты (теплообмен) обусловлена разностью температур взаимодействующих тел. Теплообмен происходит либо при непосредственном контакте тел (теплопроводность, конвекция), либо при испускании и поглощении электромагнитных волн (теплообмен излучением).

Максвелл охарактеризовал работу как передачу упорядоченного движения от одного тела к другому, а теплоту – как передачу хаотического движения микрочастиц вещества. Понятие «работа» связано с передачей энергии любого вида, а понятие «теплота» – с передачей только внутренней энергии. Количество энергии, передаваемой в форме работы или в форме теплоты, называют *количеством работы* или *количеством теплоты* соответственно.

Телами ОС являются источники и приемники теплоты, работы и вещества. В качестве одного из тел ОС рассматривается источник теплоты бесконечно большой теплоемкости, имеющий наиминимальную установившуюся естественным образом температуру – атмосферный

воздух или вода природных водоемов. В различных случаях такое тело может быть приемником или источником теплоты.

Поверхность, реальная или условная, которая отделяет ТС от ОС и на которой могут происходить взаимодействия между ними, называется контрольной поверхностью. Контрольная поверхность может допускать взаимодействия различного рода, а может и изолировать ТС от ОС. Например, если контрольная поверхность не допускает обмена энергией между ТС и ОС в форме теплоты, то она называется адиабатной поверхностью, а процесс взаимодействия – адиабатным процессом. Если контрольная поверхность рассматривается как абсолютно жесткая, обмен энергией в форме работы деформации отсутствует. И наконец, контрольная поверхность может быть проницаемой или непроницаемой для вещества.

Если контрольная поверхность допускает обмен энергией между ТС и ОС в любой форме, но не допускает обмена веществом, то ТС называется *закрытой*. Если ТС может обмениваться с окружающей средой и энергией, и веществом, она называется *открытой*.

Взаимодействия определенного рода: деформационное, электрическое, магнитное и др., а также тепловое – возможны, если на контрольной поверхности существуют разности соответствующих одноименных интенсивных параметров состояния. При изучении процессов в теплоэнергетических установках рассматриваются главным образом два рода взаимодействий: тепловое, обусловленное разностью температур, и деформационное, вызванное разностью давлений. Если эти разности бесконечно малы (в пределе равны нулю), протекает *равновесный* процесс, а если разности конечны – *неравновесный*. Поскольку в равновесном процессе термодинамическая система проходит ряд бесконечно близких состояний, каждое из которых является равновесным, равновесные процессы можно изображать в термодинамических диаграммах. Представление о равновесности процесса является идеализацией, важной для понимания термодинамики. Все реальные процессы неравновесны.

Равновесные процессы обладают свойством обратимости: *обратимым* называется процесс, при проведении которого сначала в прямом, а затем в обратном направлениях к начальному состоянию возвращаются и термодинамическая система, и окружающая среда.

Совокупность взаимодействующих между собой ТС и ОС, включенная в границы, не допускающие никаких иных взаимодействий, называется *расширенной системой* (рис. 1.1). Например,

если термодинамическому исследованию подвергается установка с поршневым двигателем внутреннего сгорания, она и представляет собой расширенную систему: в качестве ТС рассматриваются продукты сгорания топлива, периодически подвергающиеся расширению и сжатию в цилиндрах двигателя. Телами ОС являются источник теплоты (сгорающее топливо), приемник теплоты (атмосферный воздух) и приемник работы (например, электрогенератор). Кроме того, в процессах расширения газов маховик является приемником работы, а в процессах сжатия – источником работы.

Рис. 1.1. Расширенная система:

ТС – термодинамическая система; 1, 2, 3, 4 – тела, составляющие окружающую среду

Круговые процессы (циклы). Несколько последовательных процессов, в результате протекания которых термодинамическая система, взаимодействуя с окружающей средой, возвращается в исходное состояние, образуют круговой процесс, или *цикл*.

Обратимый цикл, т. е. цикл, состоящий из обратимых (равновесных) процессов, может быть представлен графически (см., например, цикл $1D2C1$ в координатах $V - p$ и $S - T$ на рис. 1.2, *а* и *б*).

Поскольку внутренняя энергия системы является функцией состояния, ее изменение ΔU в круговом процессе равно нулю. По уравнению 1-го закона термодинамики

$$\Delta U = Q - L,$$

где Q – теплота; L – работа, для кругового процесса имеем

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Круговые процессы (циклы)	5
2. Принципиальные схемы действия теплоэнергетических установок	18
3. Циклы теплоэнергетических установок	24
3.1. Схемы установок и анализ циклов	24
3.2. Необратимость процессов и циклов	35
4. Показатели эффективности действительных циклов, основанные на 1-м законе термодинамики	40
5. Эксергетический анализ эффективности теплоэнергетических установок	46
5.1. Эксергия	46
5.2. О потерях эксергии	53
5.3. Оценка потерь эксергии	54
5.4. Методы эксергетического анализа	60
6. Примеры	64
Пример 1. Теплообменник	65
Пример 2. Парогенератор	67
Пример 3. Конденсационная электростанция	73
Пример 4. Воздушная холодильная установка	92
Пример 5. Теплонасосная установка	97
Приложение	106
Литература	108