

УДК 536.75

Шиллер Михаил Павлович

Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)

Россия, г. Ульяновск

Камалетдинова Алина Ильдаровна

Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)

Россия, г. Ульяновск

Иванова Олеся Сергеевна

Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)

Россия, г. Ульяновск

Трандин Семён Евгеньевич

Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)

Россия, г. Ульяновск

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦИКЛА КАРНО И ПРЕДЕЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВЫХ МАШИН

Аннотация. В работе проводится теоретический анализ идеального цикла Карно как эталона эффективности тепловых машин. Целью является систематизация знаний о предельном коэффициенте полезного действия и его связи со вторым началом термодинамики. Рассмотрены четыре стадии цикла, выведено выражение для КПД через температуры нагревателя и холодильника, проанализированы физические причины принципиальной невозможности достижения стопроцентной эффективности. Результаты значимы для теплоэнергетики и проектирования двигателей.

Ключевые слова: цикл Карно, тепловая машина, КПД, второе начало термодинамики, изотерма, адиабата, нагреватель, холодильник.

Shiller Mikhail Pavlovich

Student, ULSU(Ulyanovsk State University)

Ulyanovsk, Russia

Kamaletdinova Alina Ildarovna

Student, ULSU(Ulyanovsk State University)

Ulyanovsk, Russia

Ivanova Olesya Sergeevna

Student, ULSU(Ulyanovsk State University)

Ulyanovsk, Russia

Trandin Semyon Evgenievich

Student, ULSU(Ulyanovsk State University)

Ulyanovsk, Russia

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE CARNOT CYCLE AND THE LIMITING EFFICIENCY OF HEAT ENGINES

Abstract. The paper provides a theoretical analysis of the ideal Carnot cycle as a standard of heat engine efficiency. The goal is to systematize knowledge about the limiting efficiency and its connection with the second law of thermodynamics. The four stages of the cycle are considered, an expression for the efficiency in terms of the heater and refrigerator temperatures is derived, and the physical reasons for the fundamental impossibility of achieving one hundred percent efficiency are analyzed. The results are significant for thermal power engineering and engine design.

Keywords: Carnot cycle, heat engine, efficiency, second law of thermodynamics, isotherm, adiabat, heater, refrigerator.

Введение

Тепловые машины, преобразующие тепловую энергию в механическую работу, стали технической основой промышленной революции и по сей день обеспечивают значительную часть мировой энергетики. Центральным вопросом теории тепловых машин является вопрос об их предельной эффективности: какую максимальную долю подведённой теплоты можно превратить в полезную работу?

Ответ на этот вопрос дал французский инженер Сади Карно в 1824 году, предложив идеализированный обратимый цикл, носящий теперь его имя. Цикл Карно является теоретической конструкцией, которая устанавливает абсолютный предел эффективности любой тепловой машины, работающей между двумя тепловыми резервуарами с заданными температурами.

Актуальность анализа цикла Карно сохраняется и в наши дни: он служит эталоном, относительно которого оценивается совершенство реальных двигателей внутреннего сгорания, паровых и газовых турбин, холодильных установок. Понимание принципиальных ограничений на КПД важно для энергосбережения и разработки новых энергетических технологий.

Целью данного исследования является теоретический анализ цикла Карно, вывод выражения для его коэффициента полезного действия и обоснование связи полученного результата со вторым началом термодинамики.

Методы и теоретические основы

Цикл Карно представляет собой замкнутый обратимый процесс, совершаемый идеальным газом и состоящий из четырёх последовательных стадий. Рабочее тело контактирует с двумя тепловыми резервуарами: нагревателем с температурой T_1 и холодильником с температурой T_2 , причём $T_1 > T_2$.

Первая стадия — изотермическое расширение при температуре нагревателя T_1 . Газ получает от нагревателя количество теплоты Q_1 и

совершает работу, при этом его температура поддерживается постоянной. Вторая стадия — адиабатическое расширение, при котором газ продолжает совершать работу без теплообмена с окружением, а его температура понижается от T_1 до T_2 .

Третья стадия — изотермическое сжатие при температуре холодильника T_2 . Над газом совершается работа, а он отдаёт холодильнику количество теплоты Q_2 . Четвёртая стадия — адиабатическое сжатие, возвращающее газ в исходное состояние с повышением температуры от T_2 до T_1 . Цикл замыкается.

Коэффициент полезного действия любой тепловой машины определяется как отношение совершённой полезной работы к количеству теплоты, полученному от нагревателя. Поскольку за цикл внутренняя энергия рабочего тела не меняется, полезная работа равна разности подведённой и отведённой теплоты:

$$\eta = (Q_1 - Q_2) / Q_1 = 1 - Q_2 / Q_1$$

Для идеального газа, совершающего обратимый цикл Карно, можно строго показать, что отношение отведённой и подведённой теплоты равно отношению абсолютных температур холодильника и нагревателя. Подставляя это соотношение, получаем знаменитую формулу для КПД цикла Карно:

$$\eta = 1 - T_2 / T_1$$

В этом выражении температуры берутся по абсолютной шкале (шкале Кельвина). Формула показывает, что КПД определяется исключительно температурами резервуаров и не зависит ни от природы рабочего тела, ни от конструкции машины.

Результаты теоретического анализа

Анализ полученного выражения приводит к фундаментальным выводам. Прежде всего, КПД цикла Карно всегда меньше единицы, поскольку температура холодильника не может быть равна нулю по абсолютной шкале. Это означает, что ни одна тепловая машина не способна полностью превратить полученную теплоту в работу — часть её обязательно передаётся холодильнику.

Согласно теоремам Карно, коэффициент полезного действия обратимой машины, работающей между двумя заданными температурами, является максимально возможным, и любая реальная (необратимая) машина при тех же температурах имеет КПД ниже карнотовского. Этот результат устанавливает абсолютный верхний предел эффективности и тесно связан со вторым началом термодинамики.

Из формулы следует практический рецепт повышения эффективности тепловых машин: необходимо увеличивать температуру нагревателя и понижать температуру холодильника. Именно поэтому в современных газовых турбинах стремятся к максимально высоким температурам рабочего газа, ограниченным лишь жаростойкостью материалов.

Принципиальная невозможность достижения КПД, равного 100 %, является прямым следствием второго начала термодинамики в формулировке Кельвина: невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы превращение всей полученной от нагревателя теплоты в работу. Цикл Карно даёт количественную меру этого фундаментального запрета.

Заключение

Проведённый термодинамический анализ подтверждает, что цикл Карно является идеальным эталоном эффективности и устанавливает абсолютный предел коэффициента полезного действия для всех тепловых машин.

Основные выводы исследования:

Коэффициент полезного действия цикла Карно определяется только температурами нагревателя и холодильника и не зависит от природы рабочего тела.

КПД любой реальной тепловой машины принципиально не может превышать КПД цикла Карно при тех же температурах резервуаров.

Невозможность стопроцентной эффективности является прямым следствием второго начала термодинамики.

Перспективы дальнейших исследований связаны с анализом реальных циклов (Отто, Дизеля, Ренкина) и оценкой их эксергетических потерь относительно идеального цикла Карно.

Использованные источники

Базаров И.П. Термодинамика. — СПб.: Лань, 2010. — 384 с.

Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. — М.: Физматлит, 2005. — 544 с.

Кириллин В.А., Сычёв В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 496 с.

Ферми Э. Термодинамика. — Ижевск: РХД, 2001. — 160 с.