

# ФИЗИКА И ЕЁ ПРЕПОДАВАНИЕ

УДК 536.7

А. Н. Верховин

## ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ КАК ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

*Рассматривается принцип действия системы, преобразующей электрическую энергию в механическую. Показано, что работа такой системы аналогична работе идеальной тепловой машины Карно. Изложение ведётся в духе идей Гухмана, предполагавшего тождественность форм представления всех равновесных взаимодействий.*

**Ключевые слова:** *термодинамическая система, среда, взаимодействие, равновесный процесс, тепловой двигатель, электростатический двигатель.*

В 1947 году советский теплофизик А. А. Гухман (1897–1992) предложил новую систему обоснования термодинамики, в которой предполагалась полная тождественность представления всех равновесных (механических, термических, электрических, магнитных, химических и т. д.) взаимодействий системы со средой [1]. Специфические особенности разных взаимодействий рассматриваются только в связи с необратимостью. В 90-х гг. автор настоящего сообщения пытался (правда, без особого успеха) популяризировать этот подход среди преподавателей физики [2]. По не совсем понятным причинам термодинамика Гухмана распространения не получила, несмотря на её очевидные достоинства. В работе [2] можно найти краткое и доступное изложение идей Гухмана, а также определение основных терминов и понятий его термодинамики. Тех, кто серьёзно заинтересуется термодинамикой Гухмана, отошлём к оригинальной работе [1]. Здесь же напомним только несколько важных понятий, необходимых для понимания обсуждаемого вопроса.

При любом взаимодействии системы и среды изменяется некоторая экстенсивная величина, характеризующая систему. Такая величина называется *координатой*. Примеры координат: объём  $V$ , энтропия  $S$ , масса  $m$ , число частиц  $N$  в системе, заряд  $q$  и т. д. Полное число координат системы называется *числом степеней свободы*. Так, любая тепловая машина представляет собой систему с двумя степенями свободы — механической (координата  $V$ ) и термической (координата  $S$ ). Каждой координате соответствует интенсивная величина, называемая *потенциалом*. Примеры потенциалов: давление —  $p$  (давление, рассматриваемое как потенциал, берётся со знаком «минус», так как по договорённости, если внешний потенциал больше внутреннего, то соответствующая координата должна увеличиваться), температура  $T$ , химический потенциал  $\mu$ , электрический потенциал  $\phi$  и т. д. Взаимодействие возникает тогда, когда между системой и средой имеется *разность потенциалов*, которая в случае

равновесных взаимодействий считается бесконечно малой. При этом внутренний  $P_i$  внешний  $P_e$  потенциалы можно считать приближённо равными:  $P_i \approx P_e = P$ .

Количественной мерой изменения внутренней энергии системы при данном взаимодействии является *обобщённая работа* (по Гухману — *количество воздействия*):  $\delta Q = P dx$ , где  $P$  — потенциал (обобщённая сила),  $dx$  — элементарное приращение координаты,  $\delta Q$  — элементарное количество воздействия. Например, в случае механического (деформационного) взаимодействия  $\delta Q = -pdV$ , термического —  $\delta Q = TdS$ , электрического —  $\delta Q = \varphi dq$ , химического —  $\delta Q = \mu dN$  или  $\delta Q = \mu dt$  и т. д.

*Двигателем называется термодинамическая система, совершающая круговой процесс и преобразующая взаимодействия любого рода в механические.* С точки зрения термодинамики любой двигатель — это система с двумя степенями свободы, одна из которых механическая, а другая любая [3]. Если вторая степень свободы тепловая (термическая), двигатель — тепловой, если электрическая — электрический (электростатический) и т. д. Термодинамика Гухмана позволяет легко и наглядно строить термодинамическую теорию любых двигателей. Покажем это на примере электростатического двигателя.

Но прежде чем перейдём к анализу электростатического двигателя, напомним некоторые особенности известного из курса термодинамики цикла Карно, состоящего из двух изотерм и двух адиабат, имеющего в координатах  $p, V$  вид, показанный на Рис. 1. В координатах  $T, S$  цикл Карно имеет форму прямоугольника (Рис. 2).

Как известно, термический коэффициент полезного действия цикла Карно определяется только температурами нагревателя и холодильника. Такой же коэффициент полезного действия имеют множество обратимых циклов с такими же изотермическими нагревателями и холодильниками. При этом адиабатические участки перехода с одной изотермы на другую ( $2 \rightarrow 3$  и  $4 \rightarrow 1$  на Рис. 2) должны быть эквидистантными: рабочее тело на участке цикла с уменьшением энтропии передаёт теплоту рабочему телу на участке с увеличением энтропии, т. е. как бы греет само себя за счёт внутренней энергии. Такие циклы называются *регенеративными* (от слова *регенерация* — восстановление) или обобщёнными циклами Карно. Последнее название объясняется тем, что таких циклов может быть сколь угодно много, а цикл Карно является их частным случаем. В координатах  $T, S$  обобщённый цикл Карно имеет форму параллелограмма (на рисунке не показан). Можно сказать, что *регенеративным (обобщённым) циклом Карно называется любой обратимый цикл, осуществляемый между двумя источниками теплоты с постоянными температурами.* Регенеративные циклы нашли широкое применение в паротурбинных и газотурбинных установках.

Напомним, что классическая термодинамика рассматривает только равновесные процессы. Циклы реальных тепловых машин неравновесны. Цикл реальной тепловой машины можно приближённо считать равновесным, если он осуществляется достаточно медленно. Циклы могут быть замкнутыми и разомкнутыми. Если одна и та же система периодически участвует во всех стадиях кругового процесса, то соответствующий цикл будет замкнутым. По такому циклу работают, например, теплоносители в холодильниках, в некоторых ядерных реакторах и т. д. Если после завершения кругового процесса система полностью обновляется, то цикл будет

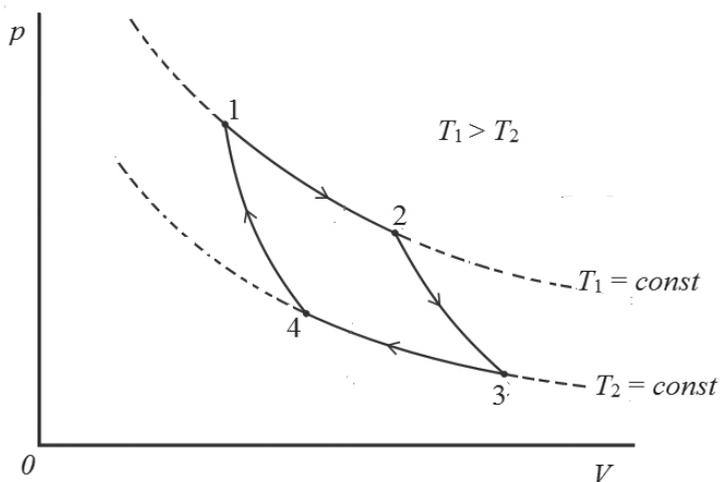


Рис. 1. Цикл Карно в координатах  $p, V$

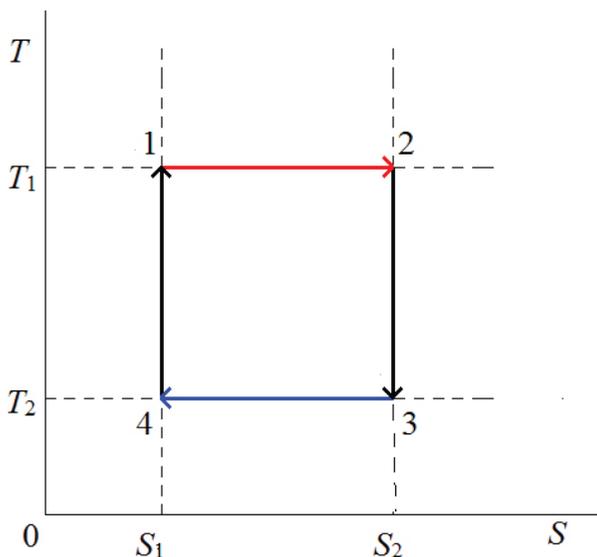
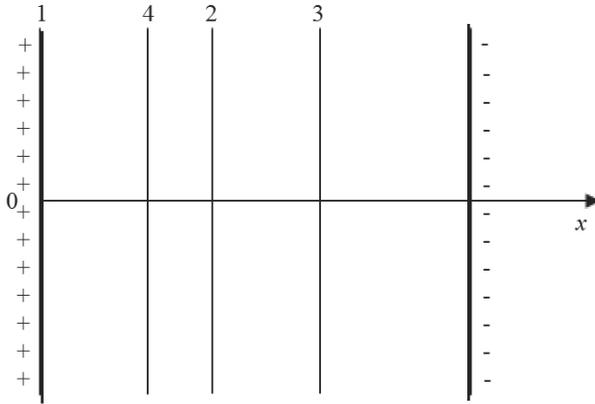


Рис. 2. Цикл Карно в координатах  $T, S$

разомкнутым. По такому циклу работают тепловые двигатели (например, двигатели внутреннего сгорания). В некоторых случаях после завершения цикла система может обновляться частично. Такой цикл соответствует некоторым химическим и другим производствам (каталитические производственные процессы, сварочное и литейное производство и пр.).

Вообще цикл, при помощи которого любую форму движения можно *наиболее эффективно* превратить в механическую энергию, изображается на диаграмме «*немеханическая координата, соответствующий этой координате потенциал*» в виде прямоугольника. Мы видели это на примере теплового двигателя (Рис. 2). Покажем теперь, что это справедливо и для электростатического двигателя, работающего по замкнутому равновесному циклу.



**Рис. 3.** Заряженный плоский конденсатор с передвигаемой вдоль оси  $x$  левой обкладкой: при перемещении из положения  $1 \rightarrow 2$  конденсатор подключён к источнику с потенциалом  $\varphi_1$ ; при перемещении из положения  $3 \rightarrow 4$  — к источнику с потенциалом  $\varphi_2 < \varphi_1$

Рассмотрим заряженный до потенциала  $\varphi_1$  плоский конденсатор с площадью обкладки  $S$  и расстоянием между обкладками  $d$  (Рис. 3). Если  $d$  много меньше линейных размеров обкладки, то электрическое поле между обкладками (пластинами) можно считать однородным. Будем считать правую пластину условно неподвижной и имеющей постоянный электрический потенциал  $\varphi_0 = 0$ , а левую — перемещающейся в направлении оси  $x$ . Координатами состояния такой системы являются координата  $x$  и заряд  $q$  (две степени свободы). Роль потенциалов играют сила  $F$  и электрический потенциал  $\varphi$ . Рассмотрим зависимости  $F(x)$  и  $\varphi(x)$  при осуществлении такого цикла (Рисунки 4 и 5).

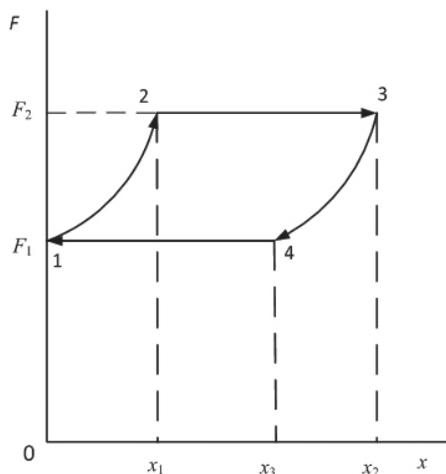
Участок  $1 \rightarrow 2$ . Конденсатор подключён к источнику потенциала  $\varphi_1$ . Разноимённо заряженные пластины притягиваются, расстояние между ними уменьшается ( $x$  — увеличивается), ёмкость конденсатора возрастает, заряд на обкладках увеличивается (заряд «натекает» на конденсатор). На обкладку, имеющую заряд  $+q$ , действует сила притяжения со стороны другой обкладки, имеющей заряд  $-q$ . Сила  $F(x)$  меняется по закону:

$$F = \frac{q^2}{2\varepsilon_0 S} = \frac{\varepsilon_0 S \varphi_1^2}{2(d-x)^2} \quad (1)$$

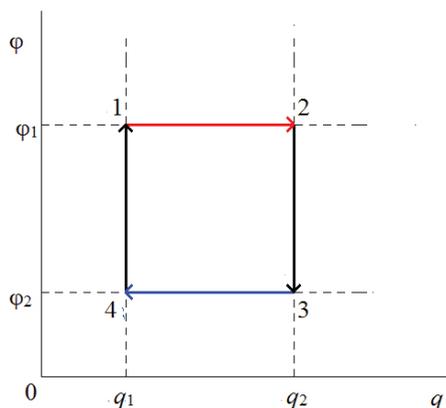
и возрастает от  $F_1$  до  $F_2$ . Система совершает положительную работу.

Участок  $2 \rightarrow 3$ . Конденсатор отключается от источника  $\varphi_1$ . Пластины продолжают сближаться,  $x$  увеличивается от  $x_1$  до  $x_2$ . Ёмкость конденсатора увеличивается, потенциал уменьшается. Заряд на обкладке не изменяется. Сила  $F$  остаётся постоянной.

Участок  $3 \rightarrow 4$ . Когда потенциал уменьшится до величины  $\varphi_2$ , конденсатор подключается к источнику потенциала  $\varphi_2$ . Пластины начинают раздвигаться,  $x$  умень-



**Рис. 4.** Цикл электростатического двигателя в координатах  $F, x$



**Рис. 5.** Цикл электростатического двигателя в координатах  $\varphi, q$

шается от  $x_2$  до  $x_3$ . Ёмкость и заряд уменьшаются (заряд «стекает» с конденсатора). Сила  $F(x)$  изменяется по закону

$$F = \frac{\varepsilon_0 S \varphi_2^2}{2(d-x)^2} \quad (2)$$

и уменьшается от  $F_2$  до  $F_1$ . Внешние силы совершают работу над системой (система совершает отрицательную работу).

Участок  $4 \rightarrow 1$ . Конденсатор отключается от источника  $\varphi_2$ . Пластины продолжают раздвигаться,  $x$  уменьшается от  $x_3$  до 0. Ёмкость уменьшается, потенциал возрастает от  $\varphi_2$  до  $\varphi_1$ . Сила остаётся постоянной. Система возвращается в исходное состояние.

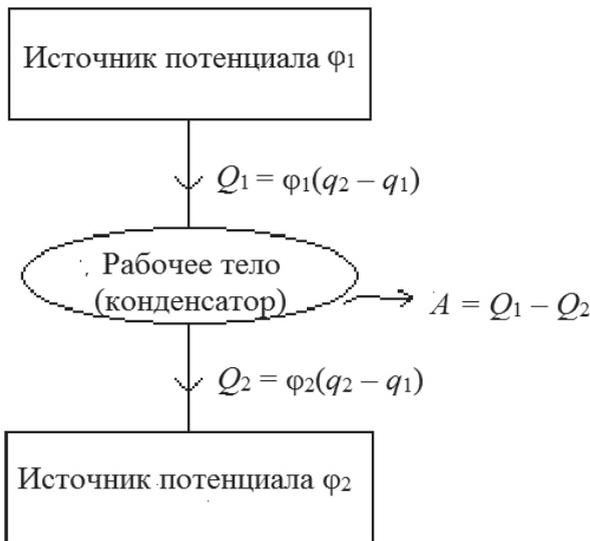
Таким образом, сближение пластин происходит при более высоком потенциале, чем их удаление друг от друга. В результате получаем выигрыш в работе.

Работу системы и работу над системой (полученное и отданное *количество воздействия*) можно найти, умножая (1) и (2) на  $dx$  и интегрируя по  $x$  в соответствующих пределах. Ещё проще это сделать с помощью графика  $\varphi(q)$  (Рис. 5).

Сравним диаграммы, характеризующие цикл Карно и цикл электростатического двигателя. Как видно, адиабатным участкам цикла Карно соответствуют на рис. 4 и 5 участки  $2 \rightarrow 3$  и  $4 \rightarrow 1$ , описывающие процессы при постоянном заряде. Процессы при постоянном потенциале ( $1 \rightarrow 2$  и  $3 \rightarrow 4$ ) соответствуют изотермам в обобщённом цикле Карно.

Энергетическая диаграмма электростатического двигателя показана на Рис. 6. Здесь  $Q_1$  — *количество воздействия* (термин, введённый А. А. Гухманом), полученное от источника с потенциалом  $\varphi_1$ ,  $Q_2$  — *количество воздействия*, отданное источнику с потенциалом  $\varphi_2$ ,  $A = Q_1 - Q_2$  — полезная работа. Коэффициент полезного действия  $\eta = A/Q_1 = (Q_1 - Q_2)/Q_1 = 1 - Q_2/Q_1$ .

Как уже отмечалось, коэффициент полезного действия цикла Карно не зависит от природы рабочего тела и определяется отношением температур нагревателя и холодильника. К. п. д. электростатического двигателя, с учётом отмеченных на рисунке равенств, можно записать в виде:  $\eta = 1 - \varphi_2/\varphi_1$ , т. е. он так же полностью определяется отношением потенциалов источников. Такой же коэффициент полезного действия имеют множество обратимых циклов с такими же источниками потенциалов. Участки цикла  $2 \rightarrow 3$  и  $4 \rightarrow 1$  на Рис. 5, подобно адиабатным участкам цикла Карно, должны быть эквидистантными. Таких циклов может быть сколь угодно много, а рассмотренный нами цикл является их частным случаем (ср. с обобщённым циклом Карно!).



**Рис. 6.** Энергетическая диаграмма электростатического двигателя

Термический к. п. д. идеальной тепловой машины может лишь приближаться к 100 % при  $T_2 \rightarrow 0$ . Напротив, к. п. д. электростатического двигателя может быть равен 100 %.

В самом деле, при  $\varphi_2 = 0$ ,  $\eta = 1$ . Это означает, что *количество воздействия*  $Q_1$  (энергия, полученная от источника с высоким потенциалом) превращается полностью в механическую работу.

Заметим, что иногда рассмотренный выше цикл электростатического двигателя не совсем корректно, на наш взгляд, называют также обобщённым циклом Карно [3]. Мы придерживаемся общепринятой терминологии и называем обобщённым циклом Карно

регенеративный цикл, определяемый так, как это сделано выше.

В настоящее время описано несколько типов электростатических двигателей:

— электростатический маятник (маятник качается между двумя пластинами, подключёнными к источнику высокого напряжения, перенося заряд от одной пластины к другой);

— конденсатор с переключением полярности приложенного напряжения при вращении;

— игольчатый двигатель (используется эффект «стекания» заряда с острия);

— двигатель С. С. Литовченко [4] и т. д.

В общем случае такой двигатель отличается от рассмотренного нами, как реальная тепловая машина отличается от идеальной машины, работающей по равновесному обратимому циклу. Но в любом из них можно усмотреть термодинамическую систему с двумя степенями свободы: источник с высоким потенциалом, источник с низким потенциалом и рабочее тело, совершающее циклический процесс.

Подведём итог. Термодинамика Гухмана позволяет с единых позиций рассматривать любой двигатель как систему с двумя степенями свободы, одна из которых механическая, а другая — любая. Такой системой является и рассмотренный электростатический двигатель, имеющий механическую и электрическую степени свободы. Теория электростатического двигателя подобна теории идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно. В частности, к. п. д. его определяется отношением потенциалов источников, подобно тому, как в идеальной тепловой машине к. п. д. определяется отношением температур нагревателя и холодильника. В отличие от тепловой машины, термический к. п. д. которой может лишь *приближаться* к 100 %, к. п. д. электростатической машины может быть равен 100 %.

Автор выражает признательность кандидату технических наук, доценту С. С. Воронкову за интерес к работе и высказанные замечания.

#### Литература

1. Гухман А. А. Об основаниях термодинамики. М.: Энергоатомиздат, 1986. 384 с. (2-е изд. М.: Издательство ЛКИ, 2010).  
— Режим доступа: <http://bib.convdocs.org/v17847/?cc=1&view=pdf>
2. Верховин А. Н. Термодинамика в элементарном курсе физики. В сб.: В помощь учителю физики. Вып. 5. Псков: Изд-во Псковского областного института усовершенствования учителей, 1996. С. 52–58.
3. Леонова В. Ф. Термодинамика. М.: Высшая школа, 1968. С. 101.  
— Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/407862/>
4. Электростатический двигатель Литовченко.  
— Режим доступа: <http://www.skif.biz/index.php?name=Pages&op=page&pid=130>

*A. Verkhozin*

### ECTROSTATIC ENGINE AS A THERMODYNAMIC SYSTEM WITH TWO DEGREES OF FREEDOM

*The principle of the system which converts electrical energy into mechanical energy is discussed. It is shown that the operation of this system is similar to the work of an ideal Carnot heat engine. The submission in the spirit of Gukhman assumed to be identical forms of representation of all equilibrium interactions is given.*

**Keywords:** *thermodynamic system, the environment, interaction, equilibrium process, heat engine, electrostatic engine.*