

ГЛАВА XX

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ДВИГАТЕЛЯХ И СВЕРХЗВУКОВОЕ ДВИЖЕНИЕ

§ 132. Основное уравнение газодинамики. Адиабатный теплоперепад

Для исследования движений при больших скоростях, когда нельзя пренебрегать сжимаемостью газа, необходимо руководствоваться сочетанием законов механики с законами термодинамики. Научную дисциплину, возникшую в результате уточнения и развития аэродинамики на основе применения термодинамики, стали называть *газодинамикой*.

Выводы газодинамики приобрели руководящее значение: для современной скоростной авиации, для проектирования паровых и газовых турбин, для реактивной техники, а также для внутренней и внешней баллистики (т. е. учения о движении снаряда внутри орудийного ствола и в атмосфере).

Рассмотрим процессы, происходящие в газовом потоке, с точки зрения законов термодинамики.

Представим себе стационарный газовый поток, схематически изображенный на рис. 265, где выделена часть этого потока. «Профиль» трубопровода (т. е. характер изменения его поперечного сечения) может быть любым, но для простоты рассуждения мы допустим, что начальный и конечный участки выделенной части потока имеют цилиндрическую форму. На пути газового потока могут иметься устройства, преобразующие энергию потока в работу (например, подвижные лопатки турбины) или же, наоборот, сообщающие газовому потоку энергию за счет работы, подводимой извне (например, подвижные лопатки компрессора); на рис. 265 устройства подобного рода схематически обозначены фигурой С.

Поскольку поток стационарен, параметры состояния потока для любого его сечения остаются неизменными во времени, но они, конечно, могут быть неодинаковыми для разных сечений. Пусть в

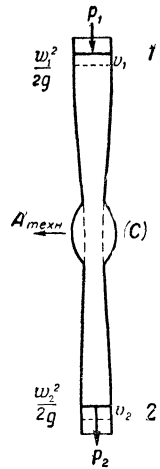


Рис. 265.

начальном участке газ имеет давление p_1 , удельный объем v_1 и движется со скоростью w_1 , а в конечном участке те же параметры пусть имеют значения p_2 , v_2 и w_2 .

Проследим перемещение выделенной части газового потока за промежуток времени, в течение которого через любое сечение потока протекает 1 кг газа (было бы формально строже отнести рассуждения к бесконечно малому промежутку времени dt , когда через любое сечение проходит $G dt$ кг газа, где G — «секундный расход» газа; но по существу это не меняет всех последующих выводов, избавляя нас только от сделанных допущений, что начальный и конечный участки потока цилиндричны).

По первому началу термодинамики количество тепла Q , подведенного к рассматриваемой системе (в данном случае ко всей выделенной части газового потока за указанный выше промежуток времени), равно приросту полной энергии (она в данном случае складывается из прироста внутренней и кинетической энергии газа) плюс производимая работа (которая в данном случае в свою очередь складывается из работы сил давления A_p на торцовые поверхности выделенной части газового потока, технической работы $A_{\text{техн}}$ в устройстве C и работы трения $A_{\text{трения}}$). Таким образом,

$$Q = \Delta U + \Delta E_{\text{кин}} + A_p + A_{\text{техн}} + A_{\text{трения}}$$

Согласно сделанному допущению это уравнение отнесено нами ко времени, в течение которого через любое поперечное сечение трубопровода проходит 1 кг газа. Стало быть, изменение внутренней энергии рассматриваемой части потока вызвано тем, что количество газа в начальном участке (с термодинамическим состоянием 1) уменьшилось на 1 кг, тогда как количество газа в конечном участке (с термодинамическим состоянием 2) увеличилось на 1 кг (для всех промежуточных участков трубопровода вследствие стационарности потока $U = \text{const}$). Таким образом,

$$\Delta U = u_2 - u_1,$$

где u_1 и u_2 — удельные внутренние энергии газа.

По аналогичным соображениям

$$\Delta E_{\text{кин}} = \frac{w_2^2}{2g} - \frac{w_1^2}{2g},$$

где $\frac{w^2}{2g}$ — кинетическая энергия 1 кг газа.

Что касается работы сил давления на торцовые поверхности выделенной части потока, то в участке 1 воображаемый поршень (или поверхность, ограничивающая сзади лежащие слои газа) описывает объем v_1 (объем 1 кг газа), и, стало быть, здесь затрачивается работа $p_1 v_1$, тогда как в участке 2 производится работа $p_2 v_2$, т. е.

$$A_p = p_2 v_2 - p_1 v_1.$$

Итак,

$$Q = i_2 - i_1 + \left(\frac{w_2^2}{2g} - \frac{w_1^2}{2g} \right) + A_{\text{техн}} + A_{\text{трения}}, \quad (1)$$

где $i = u + pv$ есть теплосодержание 1 кг газа (§ 107, стр. 429).

Это уравнение является основным в газодинамике. Уравнение (1) показывает, что главенствующую роль в термодинамической характеристике газового потока и в определении работы, которая может быть получена от газового потока, играет теплосодержание газа. Теплосодержание, которое в случае агрегатных и фазовых превращений связано (как было пояснено в § 107) со скрытой теплотой фазового превращения (например, с теплотой парообразования, плавления и т. д.), в рассматриваемом нами сейчас случае движения газов, а также и в рабочих процессах тепловых машин определяет работоспособность газа. Действительно, когда течение газа происходит адиабатно, а также когда адиабатно происходят процессы в рабочей полости C (в любой машине — поршневой или в турбине), т. е. когда $Q = 0$, то

$$A_{\text{техн}} + A_{\text{трения}} = -\Delta i + \left(\frac{w_1^2}{2g} - \frac{w_2^2}{2g} \right), \quad (2)$$

где $-\Delta i$ есть убыль теплосодержания: $-\Delta i = i_1 - i_2$, тогда как второй член правой части формулы представляет собой убыль кинетической энергии.

Таким образом, без притока и отдачи тепла газовый поток производит работу за счет убыли кинетической энергии и убыли теплосодержания. Во многих тепловых машинах (в двигателях внутреннего сгорания, в паровых поршневых машинах, в некоторых случаях и в турбинах) кинетической энергией отработавших газов или пара часто можно пренебречь в сравнении с изменением теплосодержания, так же как и начальными значениями кинетической энергии газа или пара (в котле); во всех этих случаях наибольшая техническая работа, которая может быть получена при адиабатном расширении газа или пара, определяется убылью теплосодержания, или, как говорят, адиабатным теплоперепадом ($-\Delta i$); по уравнению (2) при $w_1 = w_2$ и $A_{\text{трения}} = 0$ имеем:

$$A_{\text{техн}} = -\Delta i = i_{\text{нач}} - i_{\text{выкл}}.$$

Это заключение нуждается в пояснении, поскольку известно, что абсолютная работа $A_{\text{абс}}$ адиабатного расширения равна убыли внутренней энергии (стр. 403), а не убыли теплосодержания:

$$A_{\text{абс}} = -\Delta u.$$

На рис. 266 заштрихованная площадь показывает абсолютную работу адиабатного расширения газа или пара. Но, с одной стороны, для технического использования указанной работы в любом

возможном устройстве тепловой машины нужно преодолевать противодействие, которое испытывает поршень машины или газовый поток; на это затрачивается работа (считая на 1 кг газа или пара), равная $p_0 v_0$, где v_0 — удельный объем отработавшего газа или пара. С другой стороны, при непрерывном поступлении рабочего газа или пара (например, при наполнении цилиндров поршневой машины паром, который образуется в котле), кроме работы расширения, можно использовать также и «работу наполнения» (в двигателях внутреннего сгорания — работу изобарного сжигания топлива); эта работа равна $p v$, где v — удельный объем газа или пара к началу расширения.

Если, снова обратившись к рис. 266, мы представим себе, что к заштрихованной площади, изображающей абсолютную работу

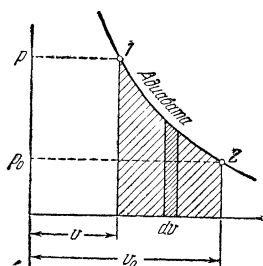


Рис. 266. Абсолютная адиабатная работа (определяется изменением внутренней энергии).

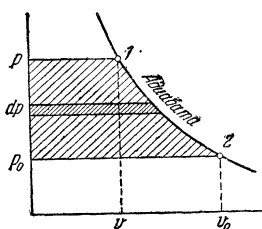


Рис. 267. Техническая адиабатная работа (определяется изменением теплосодержания, «адиабатным теплоперепадом»).

адиабатного расширения, прибавлена площадь прямоугольника $p v$ и вычтена площадь $p_0 v_0$, то получим графическое изображение адиабатной *технической работы*, показанное на рис. 267. Площадь, заштрихованная на рис. 266, определяет убыль внутренней энергии, тогда как площадь под той же адиабатой, взятая по отношению к оси давлений на рис. 267, определяет убыль теплосодержания ($u - u_0 + p v - p_0 v_0 = i - i_0$).

Абсолютная работа адиабатного расширения

$$A_{\text{абс}} = -\Delta u = \int_1^2 p dv,$$

что в графической интерпретации означает, что площадь, заштрихованную на рис. 266, мы рассматриваем как сумму бесконечно большого числа элементарно малых вертикальных полосок $p dv$.

Если аналогично графическое изображение технической адиабатной работы, показанной на рис. 267, рассматривать как сумму эле-

ментарных горизонтальных полосок $v dp$, то обнаруживается, что

$$A_{\text{техн}} = -\Delta i = - \int_1^2 v dp. \quad (3)$$

Эту формулу, обоснованную нами графически, нетрудно получить и аналитически. Действительно, $di = d(u + pv) = du + p dv + v dp$; здесь первые два члена в правой части в сумме равны δQ . Стало быть, при $\delta Q = 0$, т. е. для адиабатных изменений,

$$di = v dp,$$

что и приводит к формуле (3).

§ 133. Адиабатное течение газа

Для многих технических приложений газодинамики весьма важным случаем является течение газа по трубопроводу переменного сечения без притока или отдачи тепла (т. е. адиабатно) и без производства работы. В этом случае, когда $Q = 0$ и $A_{\text{техн}} = 0$ (для упрощения положим, что и $A_{\text{трения}} = 0$), основное уравнение газодинамики преобразуется в уравнение, которое является *термодинамическим обобщением уравнения Бернулли*:

$$i_1 + \frac{w_1^2}{2g} = i_2 + \frac{w_2^2}{2g} = \text{const.} \quad (4)$$

Здесь в отличие от уравнения Бернулли (§ 49) вместо давления, деленного на плотность, фигурирует теплосодержание; но $i = u + pv$, и очевидно, что для потока несжимаемой жидкости, когда нет необходимости учитывать изменение термодинамического состояния (т. е. когда внутренняя энергия жидкости предполагается постоянной, $u_1 = u_2$ и когда плотность $\frac{1}{v}$ неизменна), уравнение (4) переходит в уравнение Бернулли.

Из термодинамического обобщения уравнения Бернулли мы видим, что *сумма теплосодержания и кинетической энергии газового потока при стационарном адиабатном течении без производства работы одинакова для всех сечений потока*.

Течение, при котором скорость газа убывает, а плотность, давление и температура растут, называется *течением со сжатием*. (Следует подчеркнуть, что здесь слово «сжатие» относится к термодинамическому состоянию потока, к удельному объему газа, а отнюдь не к площади поперечного сечения трубопровода; при не слишком больших начальных скоростях газа в расширяющемся трубопроводе газ затормаживается, кинетическая энергия его уменьшается, а температура и плотность растут, т. е. имеет место течение со сжатием.)