

1.4. Частные формы уравнения баланса энергии

Рассмотрим взаимные переходы форм энергии в некоторых типовых технологических устройствах.

Течение жидкости в трубопроводе. Учитывая отсутствие обмена энергией с внешней средой ($\dot{W} = 0; \dot{Q} = 0$), и в пренебрежении изменением внутренней энергии и сжимаемостью жидкости ($u = const; \rho = const$) из уравнения (1.8) получим формулу Бернулли

$$\frac{\Delta p}{\rho} + \frac{1}{2} \Delta v^2 + g \Delta z = 0, \quad (1.11)$$

находящую многообразные приложения в технике.

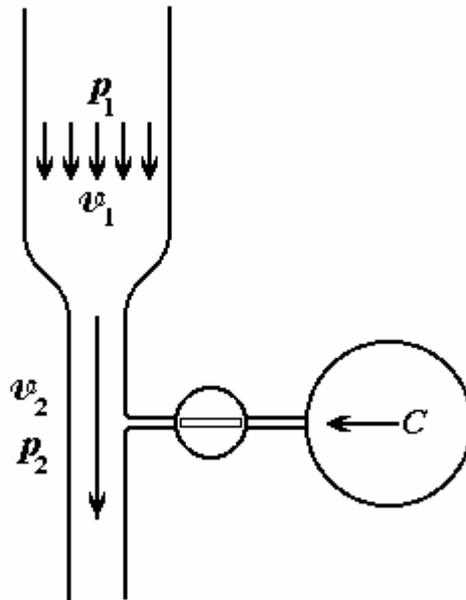


Рис.1.5. Схема действия водоструйного насоса;
C – вакуумируемый сосуд.

Так, это уравнение характеризует изменение давления в потоке жидкости при сужении (расширении) трубопровода. Так как объемный расход несжимаемой жидкости через поперечное сечение трубы $\dot{V} = v A$ не изменяется вдоль трубопровода, то (при пренебрежимо малом $\rho g \Delta z$)

$$p_2 = p_1 - \frac{1}{2} \rho (\dot{V})^2 \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right). \quad (1.12)$$

Последнее выражение объясняет действие водоструйного насоса (рис.1.5), показывая, что при заданных A_1 и p_1 могут быть достигнуты очень малые значения давления в струе p_2 за счет, прежде всего, соответствующего уменьшения сечения струи A_2 , а также увеличения \dot{V} . Кажущийся парадокс с возможностью получения, согласно (1.12), отрицательных p_2 при больших скоростях v_2 объясняется тем, что с ростом скорости возрастают потери энергии

на преодоление трения (трансформация механической энергии в тепловую). Эти потери должны учитываться дополнительным слагаемым Δu в уравнении (1.11), как это следует из более общего уравнения сохранения энергии (1.8).

При $v = 0$ уравнение (1.11) описывает гидростатические эффекты, как например, возрастание давления столба жидкости с увеличением его высоты $\Delta p = \rho g(z_1 - z_2)$.

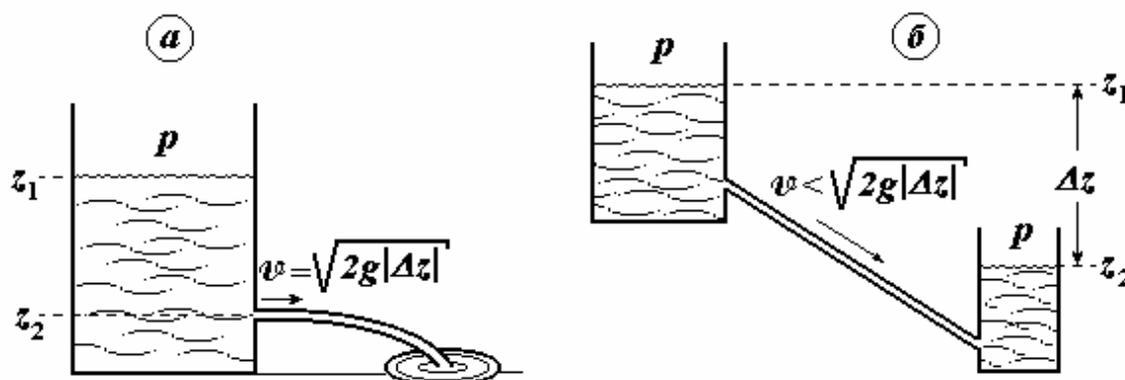


Рис.1.6. К расчету скорости истечения жидкости через отверстие в резервуаре (а) и по трубопроводу между резервуарами (б).

Еще один пример использования уравнения Бернулли – расчет скорости истечения жидкости из резервуара через свободное отверстие (например, в результате аварии) или через трубопровод в другой резервуар (рис. 1.6). В первом случае при одинаковом внешнем давлении ($\Delta p = 0$) имеем $v = \sqrt{2g(z_1 - z_2)}$, где $(z_1 - z_2)$ – расстояние между уровнем жидкости в резервуаре и отверстием. В случае перетока жидкости по трубопроводу между двумя открытыми резервуарами расчет по уравнению Бернулли независимо от уклона трубопровода приводит к аналогичному выражению, в котором $(z_1 - z_2)$ – разность высот уровней жидкости в резервуарах (проверьте это). Однако на практике скорость течения по трубопроводу будет несколько ниже, поскольку некоторая часть потенциальной энергии жидкости, зависящая от протяженности и сечения трубопровода, будет расходоваться на преодоление трения (пропорциональную часть Δz называют потерей «напора») и тем самым на соответствующее повышение внутренней энергии жидкости Δu . Можно отметить, что с точки зрения внутреннего состояния движущейся жидкости указанное изменение u , обусловленное диссипацией механической энергии, как правило, не столь значительно, чтобы выразиться в значимом повышении ее температуры.

Гидротурбина и гидронасос. В гидротурбине происходит преобразование потенциальной энергии падающей воды через изменение ее кинетической энергии в механическую работу и с помощью электрогенератора – в электрическую работу;

$$\dot{W} = -\dot{m}g\Delta z,$$

где $\Delta z < 0$ есть разность уровней поверхности воды ниже и выше плотины водохранилища. Гидронасос выполняет обратное преобразование энергии,

поднимая жидкость с одной высоты на другую за счет потребления электрической энергии; в этом случае $\Delta z > 0$ и $\dot{W} < 0$.

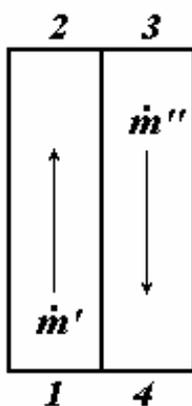


Рис.1.7. Схема противоточного теплообменного аппарата.

Теплообменный аппарат. В данном устройстве происходит нагревание (повышение энтальпии) одной движущейся среды за счет охлаждения (понижения энтальпии) другой путем теплообмена через разделяющие два потока перегородки.

Пусть массовый расход первого теплоносителя равен \dot{m}' , его удельная энтальпия на входе h_1' и на выходе h_2' ; соответственно массовый расход второго теплоносителя \dot{m}'' , удельная энтальпия на входе h_3'' и на выходе h_4'' (рис.1.7).

Обычно изменение механической энергии потоков в аппарате незначительно по сравнению с изменениями энтальпии, поэтому с большой точностью выполняется уравнение баланса

$$\dot{m}'(h_2' - h_1') = \dot{m}''(h_3'' - h_4''), \quad (1.13)$$

являющееся следствием (1.10) при $\dot{W} = 0$ и $\dot{Q} = 0$. Соотношение (1.13) выполняется независимо от структуры потоков теплоносителей в аппарате (прямоток, противоток или более сложная конфигурация потоков), как для потоков газов, так и жидкостей; оно охватывает также процессы теплообмена, сопряженные с фазовым переходом вещества (парообразование или конденсация пара).

Адиабатический реактор. Как следует из уравнения (1.9), в адиабатическом реакторе удельная энтальпия реакционной смеси сохраняется постоянной,

$$\Delta h = 0.$$

Если в реакторе протекает экзотермическая реакция, $\Delta_r H < 0$, то убыль энтальпии в ходе реакции в точности компенсируется разогревом реакционной смеси, как это происходит, например, в камере сгорания топлива в газотурбинном двигателе. Напротив, в случае эндотермической реакции, $\Delta_r H > 0$, рост энтальпии за счет химического превращения компонентов компенсируется самоохлаждением реакционной смеси.

Газовая турбина и компрессор. В газовой турбине энтальпия разогретой смеси продуктов сгорания топлива с избытком воздуха

трансформируется за счет адиабатического расширения в кинетическую энергию газов, которая в свою очередь преобразуется через вращение лопаток турбины в механическую работу; последняя с помощью генератора тока переводится в работу электрическую. В пренебрежении потерями теплоты в окружающую среду

$$\dot{W} = -\dot{m}\Delta h.$$

Этим же уравнением описывается работа газового компрессора в адиабатическом режиме (т.е. без внешнего охлаждения сжимаемой смеси); в этом случае электрическая или механическая работа расходуется на повышение энтальпии сжимаемого газа: $\dot{W} < 0; \Delta h > 0$.

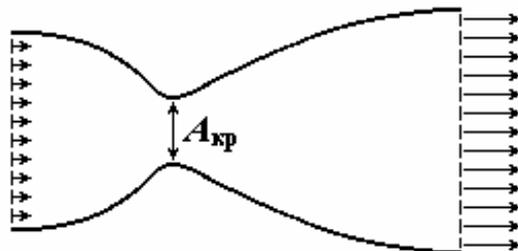


Рис. 1.8. Схема сопла сверхзвукового реактивного двигателя;
 $A_{кр}$ – критическое сечение перехода через скорость звука.

Реактивный двигатель. В реактивном двигателе раскаленные газы из камеры сгорания топлива направляются в сопло – сужающийся и затем расширяющийся канал рассчитанной конфигурации (рис. 1.8). В сужающейся части сопла газовая струя адиабатически расширяется и разгоняется до скорости, равной скорости звука, а в расширяющейся части ускоряется выше скорости звука. Газы приобретают высокую кинетическую энергию (и соответствующий импульс, который с противоположным знаком передается летательному аппарату) за счет результирующего уменьшения энтальпии исходной смеси топлива и окислителя:

$$v^2/2 = -\Delta h.$$

Реакторы с внешним охлаждением или обогревом. В системах этого типа теплота, выделяемая в проточном реакторе в ходе экзотермической реакции, используется для нагревания внешнего теплоносителя, либо фазового превращения последнего. Например, промышленный реактор каталитического окисления аммиака включает в себя встроенный котел-утилизатор, в котором основная часть теплоты реакции утилизируется путем производства водяного пара. В противоположном случае проведения экзотермической реакции теплота подводится внешним теплоносителем. Преобразование химической и тепловой формы энергии в данных системах описывается тем же уравнением (1.13), что и обычный теплообмен.

К системам типа реактор-теплообменник по существу должны быть отнесены и многочисленные аппараты, в которых нагревание, фазовое или химическое превращение вещества производится за счет теплоты, выделяемой при сжигании в том же аппарате газообразного или жидкого топлива, как-то разного рода печи, паровые котлы, выпарные аппараты и т.п. (окисление топлива – наиболее широко используемая в технике и технологии химическая реакция).

Электронагревательные устройства. Нагревание рабочего вещества за счет джоулевой теплоты, выделяемой электронагревательными элементами, можно квалифицировать как потери электрической работы; баланс энергии в этом случае можно представить как

$$-\dot{W} = \dot{m}\Delta h.$$

Электрохимический реактор. В электрохимических процессах происходит преобразование электрической, химической и тепловой форм энергии. В топливных элементах часть химической энергии исходных реагентов идет на выработку электрической энергии, а другая часть должна отводиться в виде теплоты внешним теплоносителем. Уравнение баланса энергии, суммарным образом характеризующее катодный и анодный процессы, может быть представлено в виде

$$\dot{W} = \dot{m}'(h_1' - h_2') - \dot{m}''(h_4'' - h_3''), \quad (1.14)$$

где \dot{m}' – совокупный массовый расход исходных реагентов; h_1' – удельная энтальпия исходных реагентов; h_2' – удельная энтальпия продуктов реакции; \dot{m}'' – массовый расход вспомогательного теплоносителя; h_3'' и h_4'' удельные энтальпии теплоносителя соответственно на входе и выходе. В электролизере, с целью снижения затрат электроэнергии на получение целевых продуктов, часть необходимой энергии подводят в виде теплоты от внешнего теплоносителя. В этом случае каждое из слагаемых уравнения (1.14) изменяет знак на противоположный.

Во всех перечисленных выше примерах частные формы уравнений баланса потоков энергии выполняются с точностью до неучтенных в этих уравнениях и трудно измеряемых экспериментально *потерь энергоресурсов*. К последним относится рассеяние теплоты (также и холода) в окружающую среду через стенки аппаратуры и потери механической энергии на трение. Полноту целевого преобразования одной формы энергии в другую характеризует коэффициент преобразования энергии η , равный отношению производства или увеличения потока конечной формы энергии к уменьшению потока или расходу первичной формы энергии. Например, для гидротурбины $\eta = \dot{W}/(-\dot{m}g\Delta z)$ и для гидронасоса $\eta = \dot{m}g\Delta z/(-\dot{W})$; для теплообменного аппарата $\eta = \dot{m}'(h_2' - h_1')/[\dot{m}''(h_3'' - h_4'')]$; для газовой турбины $\eta = \dot{W}/(-\dot{m}\Delta h)$ и т.д. Отклонение η от 1 (или от 100%, если отношение выражено в процентах) количественно характеризует относительную величину потерь энергоресурсов.

По поводу предпочтительности использования термина «коэффициент преобразования энергии» вместо традиционного термина «коэффициент полезного действия» (к.п.д.) см. книгу В.М.Бродянского, В.Фратшера и К.Михалека [4]. Употребление термина к.п.д. более оправдано применительно к техническим и технологическим устройствам, в которых происходит трансформация эквивалентных по качеству форм энергии, либо низшая по качеству форма энергии преобразуется в более квалифицированную форму энергии (см. следующий раздел).

Коэффициент преобразования энергии, хотя и является важным количественным показателем эффективности функционирования технологической

системы, не позволяет охарактеризовать процесс преобразования энергии с качественной стороны. *На уровне балансов потоков энергии остается в стороне первостепенной важности вопрос о самой целесообразности перевода энергии из одной формы в другую. Этот вопрос может быть поставлен и решен лишь с привлечением второго начала термодинамики.*

