Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им.Г.В.Плеханова, 1980, т. 37

УДК 621.5

К ВЫВОДУ ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ ОТКРЫТОЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПРИВОДА

Г.А.ТЕРЕХОВ

В открытых термодинамических системах происходит термическое и механическое взаимодействие рабочего тела с окружающей средой и перенос рабочего тела через контрольную поверхность системы. Обмен веществом между термодинамической системой и окружающей средой представляет собою специфическую форму их энергетического взаимодействия. Особенности этого взаимодействия стимулировали работы по созданию термодинамики тела переменной массы.

Отстаивая необходимость особого теоретического подхода к изучению термодинамических систем с переменным количеством вещества, М.А.Мамонтов отмечает, что термодинамика тела переменной массы – это особый раздел теплофизики, который имеет примерно ту же степень методологической самостоятельности по отношению к классической термодинамике, что и термодинамика необратимых процессов [3]. Основными методологическими посылками этой теории по М.А.Мамонтову являются расширение концепций теплоты, работы и рабочего тела. Расширение понятия теплоты означает, "... что под теплотой понимается не только энергия, переносимая от одного тела к другому посредством соударения молекул с различной кинетической энергией, но также и кинетическая энергия молекул, переносимых потоком от одного тела к другому" [3, с.34]. „Работа тепломеханического тела – это передача энергии в механической форме между телом и внешней средой посредством контурно-механического и миграционно-механического взаимодействий, совершаемых сопряженно с контурной и миграционной деформациями элементов тела" [3, с.36].

Подготовленные Комитетом научно-технической терминологии Академии наук СССР рекомендации определяют теплоту и работу процесса следующим образом: теплота процесса – „энергия, передаваемая одним телом другому при их взаимодействии, зависящая только от температуры этих тел и не связанная с переносом вещества от одного тела к другому"; работа процесса – „энергия, передаваемая одним телом другому при их взаимодействии, не зависящая от температуры этих тел и не связанная с переносом вещества от одного тела к другому" [5, с.7].

Наметившиеся противоречия можно разрешить, если не пытаться формулировать первый закон термодинамики для системы с переменным количеством вещества с позиций классической термодинамики (эквивалентность теплоты и

работы), а ограничиться утверждением, что для открытой термодинамической системы внутренняя энергия является функцией состояния [4, с.70]. В этом случае вывод основного энергетического уравнения термодинамики открытой системы может быть произведен на основе методологических принципов [2].

Равновесное состояние термодинамической системы характеризуется неизменностью некоторого числа физических величин - координат состояния (или обобщенных координат). Обобщенная координата выражает количественно некоторый признак системы, который соответствует определенному взаимодействию системы с окружающей средой. Изменение этой величины рассматривается как проявление взаимодействия системы с окружающей средой. Заданному равновесному состоянию системы соответствует некоторая совокупность численных значений обобщенных координат. Общее число обобщенных координат и их физическая природа определяют число и характер возможных изменений в системе, допускаемых существующими физическими связями системы с окружающей средой. Поэтому число обобщенных координат, определяющих равновесное состояние системы, отождествляется с числом степеней ее свободы. Каждой обобщенной координате соответствует одна степень свободы.

Термины обобщенная координата и степень свободы заимствованы из формального аппарата аналитической механики и отражают некоторые абсолютизированные свойства взаимодействий термодинамической системы с окружающей средой. Но в историческом развитии термодинамики была выдвинута и закрепилась (не всегда обоснованно с позиций современной физической картины мира) другая терминология, основанная на представлениях о взаимодействиях системы с окружающей средой как процессах обмена некоторой вещественной субстанцией. Для сохранения преемственности в терминологии А.И.Вейник [I] называет обобщенные координаты обобщенными зарядами или просто зарядами, а взаимодействие системы с окружающей средой рассматривает как процесс переноса (действительного или условного) обобщенного заряда через контрольную поверхность из области больших значений обобщенного потенциала в область меньших его значений. Обобщенный потенциал является количественной мерой интенсивности взаимодействий определенного рода и играет роль обобщенной силы, под действием которой происходит перенос обобщенного заряда через контрольную поверхность.

Количественной мерой такого взаимодействия можно считать обобщенную работу, которая выражается через величину переносимого заряда и обобщенной координаты:

$$dQ = P dE, \qquad (I$$

где dQ - элементарная обобщенная работа; P - символическое обозначение обобщенного потенциала; dE - элементарная величина переносимого обобщенного заряда.

Для термодинамической системы, обладающей n внешними степенями свободы, уравнение закона сохранения и превращения энергии может быть записано следующим образом:

$$dU = \sum dQ, \qquad (2)$$

где dU – элементарное изменение внутренней энергии системы.

При термических взаимодействиях открытой системы с окружающей средой изменение внутренней энергии системы происходит благодаря теплообмену через контрольную поверхность. Эта величина равна количеству переданной теплоты $dQ_т$, которая может рассматриваться как обобщенная (или термическая) работа

$$dQ_т = TdS, \qquad (3)$$

где T – абсолютная температура, К; S – энтропия, Дж/К.

Таким образом, при термическом взаимодействии системы с окружающей средой роль обобщенного заряда играет энтропия, которая передается через контрольную поверхность системы под действием разности абсолютных температур, играющих роль обобщенного потенциала.

При механическом (деформационном) взаимодействии системы с окружающей средой роль обобщенного заряда приписывается объему системы, который изменяется под действием равномерно распределенного давления, принимаемого в качестве обобщенного потенциала. Элементарная обобщенная работа при механическом взаимодействии по общей формуле (I)

$$dQ_м = -pdV, \qquad (4)$$

где p – давление; dV – приращение объема. Модуль этой величины – механическая работа – обозначается $dL = pdV$.

Открытая термодинамическая система взаимодействует с окружающей средой путем обмена веществом рабочего тела. Обобщенная работа при переносе элементарного заряда вещества

$$dQ_п = \mu dm, \qquad (5)$$

где μ – величина, играющая в процессах переноса вещества роль обобщенного потенциала; dm – элементарная масса рабочего тела, переносимая под действием обобщенного потенциала.

Величина μ имеет различный физический смысл и значение в зависимости от характера обмена веществом. При химических реакциях и процессах диффузии одного вещества в другое величина μ – химический потенциал.

Выражая в уравнении закона сохранения энергии (2) слагаемые правой части через зависимости (3), (4) и (5), получим дифференциальное соотношение

$$dU = TdS - pdV + \mu dm, \qquad (6)$$

которое для открытой фазы сложной системы называют фундаментальным уравнением Гиббса [4]. Это уравнение используется для исследования условий межфазового равновесия сложных систем. При исследовании открытых простых термодинамических систем представляется более удобным называть этой уравнение основным уравнением открытой термодинамической системы.

Прибавим к правой и левой части уравнения (6) величину $d(pV)$. Тогда

$$dJ = dU + d(pV) = TdS + Vdp + \mu dm, \qquad (7)$$

где dJ – изменение энтальпии системы. Величина dJ является полным дифференциалом функции

$$J = J(S, p, m),$$

для которой можно записать

$$dJ = \left(\frac{\partial J}{\partial S}\right)_{p,m} dS + \left(\frac{\partial J}{\partial p}\right)_{S,m} dp + \left(\frac{\partial J}{\partial m}\right)_{S,p} dm. \qquad (8)$$

Сравнив уравнения (7) и (8), получим

$$\left(\frac{\partial J}{\partial m}\right)_{S,p} = i = \mu, \qquad (9)$$

где i – удельная массовая энтальпия. Эта зависимость показывает, что при выбранных переменных химический потенциал μ равен скорости изменения энтальпии открытой системы при изобарическом процессе в адиабатически изолированной системе.

Основное уравнение (7) применительно к задачам исследования пневматического привода объемного типа можно записать в виде

$$dJ = dQ_T + Vdp + \sum_j \mu_j dm_j, \qquad (10)$$

где dQ_T – величина элементарного теплообмена через контрольную поверхность; j – число каналов, по которым происходит приток и истечение воздуха.

Сжатый воздух может рассматриваться как идеальный газ, равновесное состояние которого описывается уравнением

$$pV = mRT,$$

где R – газовая постоянная, Дж/(кг·К).

В небольшом интервале изменения температур, характерном для сжатого воздуха в рабочем объеме пневматической машины, можно считать, что теплоемкость воздуха не зависит от температуры, и тогда величина внутренней энергии системы и энтальпии могут быть выражены соответственно в виде

$$U = \frac{1}{k-1} pV \qquad (11)$$

и

$$J = \frac{k}{k-1} pV. \qquad (12)$$

После подстановки уравнения (I2) в (I0) и преобразований получим

$$dp = \frac{k-1}{V_c}\left(d\mathcal{Q}_T + \sum_j \mu_1 dm_j - \frac{k}{k-1} p dV\right). \qquad (I3)$$

Нетрудно показать, что уравнение (I3) эквивалентно основному закону термодинамики тела переменной массы в форме, предложенной М.А.Мамонтовым [3, например, уравнение (98)].

ЛИТЕРАТУРА

1. Вейник А.И. Термодинамика. Минск, Высшая школа, 1965.

2. Гухман А.А. Об основаниях термодинамики. Алма-Ата, Изд-во АН Каз.ССР, 1947.

3. Мамонтов М.А. Основы термодинамики тела переменной массы. Тула, Приокск. кн. изд-во, 1970.

4. Мюнстер А. Химическая термодинамика. М., Мир, 1971.

5. Термодинамике. Сборник рекомендуемых терминов, вып. 85 / Отв. ред. И.И.Новиков. М., Наука, 1973.