

## К ТЕОРИИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ПОДОБИЯ ЭНЕРГОПРЕОБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ

Д.т.н., проф. Эткин В.А.

Дано обобщение неравновесной термодинамики на энергопреобразующие системы и установлена универсальная взаимосвязь их экономичности, нагрузки и мощности

**Введение.** Понимание основополагающей роли скорости и производительности реальных процессов как одного из основных показателей их эффективности привело к возникновению в термодинамике XX столетия двух новых направлений, получивших название соответственно термодинамики необратимых процессов (ТНП) [1,2] термодинамики при конечном времени (ТКВ) [3,4]. Первое связано с введением в уравнения термодинамики времени как физического параметра и с созданием на этой основе нового макрофизического метода исследования кинетики взаимосвязанных процессов переноса тепла, вещества, заряда, импульса и т.п. Однако ТНП ограничивалась рассмотрением чисто диссипативных процессов теплопроводности, диффузии, электропроводности вязкости и т.п., не затрагивая процессы полезного преобразования соответствующих видов энергии. Такая ограниченность ТНП явилась следствием того, что основные величины, которыми оперировала эта теория – термодинамические силы и потоки – находились в ней на основе выражения для скорости возникновения энтропии, на которую полезная работа, как известно, не влияет. Нагляднее всего это проявилось в отсутствии в ТНП таких понятий, как КПД, полезная работа и мощность. В результате вне компетенции этой теории оказалась обширнейшая область процессов с КПД выше нуля, которая в основном и интересует инженеров – энергетиков. Поэтому вскоре возникло и другое направление – термодинамика конечновременных процессов (ТКВ), которое, напротив, поставило в качестве первоочередной задачи нахождение условий достижения максимальной экономичности установок с учетом ограниченной длительности контакта рабочего тела энергетических установок с источником и приемником тепла. Именно в рамках этой теории впервые в наиболее общей форме был поставлен вопрос о взаимосвязи мощности (производительности) технических систем с их термодинамической эффективностью, т.е. по существу о предельных возможностях реальных процессов с учетом их необратимости. Однако и эта теория не свободна от существенных недостатков, поскольку в существующем виде пригодна лишь к установкам, работающим в режиме максимальной мощности. В этой связи оказывается весьма актуальной задача построения более общей теории производительности технических систем, которая включала бы оба указанных направления в качестве частных случаев и находилась в таком же отношении к классической теории тепловых машин, как динамика к статике. Для краткости мы назвали такую теорию термокинетикой [5].

**Основное уравнение термокинетики.** Общая теория процессов переноса и преобразования энергии, названная нами термокинетикой, базируется на законе сохранения энергии в форме, предложенной Н. Умовым в 1873 г.:

$$dU/dt = - \int \operatorname{div} \mathbf{J}_u dV \quad (1)$$

где  $U$  – внутренняя (собственная) энергия системы, осуществляющей преобразование энергии,  $\mathbf{J}_u$  – плотность её потока через границы системы объемом  $V$ ;  $t$  – время.

Развернутую форму этого уравнения легко получить, представляя в нем поток энергии  $\mathbf{J}_u$  в виде суммы всех ее  $i$ -х слагаемых  $\psi_i \mathbf{J}_i$ , где  $\psi_i$  – обобщенные потенциалы типа абсолютной температуры  $T$ , абсолютного давления  $P$ , химического потенциала  $k$ -го вещества  $\mu_k$  и т.д.);  $\mathbf{J}_i$  – плотности потока соответствующего энергоносителя  $\theta_i$  (энтропии  $S$ , массы  $k$ -го вещества  $M_k$ , его импульса  $M_k \mathbf{v}_k$ , заряда  $\theta_e$  и т.п.):

$$\mathbf{J}_u = \sum_i \psi_i \mathbf{J}_i. \quad (2)$$

Тогда, представляя  $\text{div} \mathbf{J}_u = \sum_i \text{div}(\psi_i \mathbf{J}_i)$  в виде суммы двух слагаемых  $\sum_i \psi_i \text{div} \mathbf{J}_i + \sum_i \mathbf{J}_i \text{grad} \psi_i$ , вместо (1) имеем:

$$dU/dt = - \sum_i \psi_i \text{div} \mathbf{J}_i + \sum_i \mathbf{X}_i \cdot \mathbf{J}_i, \quad (3)$$

где  $\mathbf{X}_i = -\text{grad} \psi_i$  - движущая сила  $i$  - го процесса, называемая в ТНП процессом «термодинамической силой в ее энергетическом представлении».

Первая сумма этого выражения характеризует скорость изменения энергии системы в процессах *переноса* её составляющих через ее границы системы при теплообмене, объемной деформации, диффузии и т.п. Вторая сумма (3), напротив, обязана своим происхождением пространственной неоднородности энергопреобразующей системы, т.е. наличия в ней перепадов или градиентов обобщенных потенциалов  $\psi_i$  и в общем случае описывает *процессы преобразования* одних ( $i$ -х) форм энергии в другие ( $j$ -е) [5].

**Уравнения процесса преобразования энергии.** Для дальнейшего анализа процессов преобразования энергии основной закон термокинетики (3) необходимо дополнить уравнениям, связывающими между собой переменные  $\mathbf{X}_i$  и  $\mathbf{J}_i$  подобно тому, как это делают в термостатике уравнения состояния по отношению к переменным  $\psi_i$  и  $\theta_i$ . В простейшем случае линейных систем эти уравнения имеют вид [5,6]:

$$\mathbf{X}_i = R_{ii} \mathbf{J}_i - R_{ij} \mathbf{J}_j, \quad (4)$$

$$\mathbf{X}_j = R_{ji} \mathbf{J}_i - R_{jj} \mathbf{J}_j, \quad (5)$$

где  $\mathbf{X}_i$ ,  $\mathbf{X}_j$  - движущие силы, вызывающие появление потока энергоносителя соответственно преобразуемой и преобразованной формы энергии, например, потока энтропии и электрической энергии в термоэлектрическом преобразователе энергии (ТЭП);  $\mathbf{J}_i$  и  $\mathbf{J}_j$  - потоки соответственно первичного и вторичного энергоносителя (в данном случае потока энтропии и электрического заряда в ТЭП);  $R_{ii}$ , и  $R_{jj}$  - коэффициенты, характеризующие термическое и электрическое сопротивление цепей ТЭП;  $R_{ij}$  и  $R_{ji}$  - соответственно коэффициенты сопротивления потоку тепла (энтропии) со стороны электрического тока (нагрузки) и электрическому току со стороны теплового потока. Как и в ТНП, эти уравнения учитывают в дополнение к законам Фурье и Ома взаимосвязь процессов теплопроводности и электропроводности в ТЭП. Однако они отличаются от так называемых «феноменологических законов» ТНП отрицательным знаком слагаемых при  $\mathbf{J}_j$ . Так, согласно (4) увеличение тока  $\mathbf{J}_j$  в нагрузке ТЭП при постоянной разности температуры между ее горячим и холодным спаем ( $\mathbf{X}_i$ ) влечет за собой необходимость увеличения потока энтропии  $\mathbf{J}_i$  от источника тепла, что согласно (5) приводит в свою очередь к уменьшению напряжения на выходе преобразователя ( $\mathbf{X}_j$ ). Эта особенность преобразователей энергии находит отражение в условиях антисимметрии матрицы феноменологических коэффициентов [7]

$$R_{ji} = - R_{ij}, \quad (6)$$

называемых в ТНП соотношениями взаимности Онсагера-Казимира [1,2].

**Элементы теории подобия энергопреобразующих систем.** Закон сохранения энергии в форме (3) вкупе с соотношениями взаимности (6) позволяет предложить термодинамическую теорию подобия линейных энергопреобразующих систем, которая

дополняет классическую теорию тепловых машин анализом взаимосвязи термодинамической эффективности (КПД) с производительностью (мощностью  $N$ ) энергетических или технологических установок. Выберем в качестве показателя термодинамической эффективности таких установок их энергетический (мощностной) КПД  $\eta$ , представляющий собой отношение мощности на выходе  $N_j$  и на входе в установку  $N_i$ :

$$\eta \equiv N_j / N_i = \mathbf{X}_j \cdot \mathbf{J}_j / \mathbf{X}_i \cdot \mathbf{J}_i . \quad (7)$$

Этот КПД характеризует степень использования установкой тех принципиальных (потенциальных) возможностей, которые обусловлены отклонением системы от внутреннего равновесия и наличием в ней в связи с этим *инергии* (преобразуемой части ее энергии). Он наиболее полно отражает потери от необратимости реальных процессов преобразования энергии в самой установке. В отличие от термического КПД тепловой машины  $\eta_t$ , он достигает единицы при обратимом характере процессов в установке и в этом отношении отличаются от так называемых относительных внутренних КПД в теории тепловых машин  $\eta_{oi}$  лишь тем, что в них вместо работы  $W_i$  фигурирует мощность  $N_i$ .

При составлении математической модели энергоустановки наряду с уравнениями процесса (4) и (5) и соотношениями взаимности (6) используем, как обычно, условия однозначности, включающие в себя свойства системы (сопротивления  $R_{ii}$ ,  $R_{ij}$ ,  $R_{ji}$  и  $R_{jj}$ ), граничные условия, задаваемые величиной потоков  $\mathbf{J}_i$  и  $\mathbf{J}_j$  в режиме «короткого замыкания»  $\mathbf{J}_{ik}$  и  $\mathbf{J}_{jk}$  (когда  $\mathbf{X}_j = 0$ ) и начальные условия, задаваемые величиной движущих сил  $\mathbf{X}_{jx}$  и  $\mathbf{X}_{ix}$  на «холостом ходу» установки (когда  $\mathbf{J}_j = 0$ ). Тогда после несложных преобразований уравнения (4) и (5) можно привести к безразмерной (обобщенной) форме, представив искомую взаимосвязь критериальным уравнением [6]:

$$\eta = (1 - B)/(1 + 1/B\Phi), \quad (8)$$

где  $B \equiv \mathbf{J}_j / \mathbf{J}_{jk} = 1 - \mathbf{X}_j / \mathbf{X}_{jx}$ ,  $\Phi \equiv R_{ij}R_{jj} / R_{ii}R_{jj}$  – безразмерные величины, названные нами соответственно «критерием относительной нагрузки» и «критерием качества» установки. Первый из них характеризует режим работы установки, изменяясь от 0 до 1 при переходе от холостого хода к режиму короткого замыкания, второй – ее конструктивные характеристики, зависящие в случае ТЭП от длины и сечения термоэлектродов и их удельного сопротивления (т.е. от так называемой «добротности» ТЭП). При этом величина  $\Phi$  может колебаться от нуля до бесконечности.

Таким образом, обнаруживается возможность построения своего рода теории подобия процессов преобразования энергии, напоминающей теорию подобия процессов тепло-массопереноса. Эта теория базируется на единстве математической модели процессов преобразования любых форм энергии в тепловых и нетепловых, циклических и нециклических, прямых и обратных машинах [5]. Она открывает возможность переноса результатов исследования одних энергетических или технологических установок на другие (малоисследованные). Независимость предложенной линейной математической модели от аппаратного оформления установки позволяет при этом построить универсальные нагрузочные характеристики таких систем [5,6]. Эти характеристики особенно наглядно показывают, что при квазистатическом характере процессов преобразования энергии (их бесконечно малой скорости) и в отсутствие потерь при переносе энергоносителя ( $B = 0$ ,  $\Phi = \infty$ ) мощностной КПД установки достигает единицы, что соответствует выводам классической термодинамики для случая полностью (внешне и внутренне) обратимых тепловых машин ( $\eta_{oi} = 1$ ). Однако, как следует из (8), даже в этом случае мощностной КПД падает до нуля по мере приближения установки к режиму короткого замыкания. Таким образом, КПД  $\eta$  любой машины зависит от режима ее работы. Более того, для реальных установок ( $\Phi < \infty$ ) КПД  $\eta$  обращается в нуль дважды: на

холостом ходу ( $B = 0$ ) и в режиме короткого замыкания ( $B = 1$ ). Это обстоятельство вскрывает недостаточность традиционного учета потерь в процессах преобразования энергии с помощью постоянных (не зависящих от скорости процесса) относительных КПД [8].

Обращение КПД в нуль дважды свидетельствует о существовании режимов с максимальной термодинамической эффективностью. Общеизвестный факт существования таких режимов, принимаемых обычно за номинальные, свидетельствует о том, что предложенная математическая модель энергоустановки, опирающаяся на энергодинамику, является следующим шагом на пути приближения теории тепловых машин к реальности. Чтобы найти номинальные нагрузки  $B_n$ , приравняем нулю производную от  $\eta$  (8) по  $B$ . После некоторых преобразований найдем:

$$B_n = [(1 + \Phi)^{0,5} - 1]/\Phi \quad (9)$$

Согласно этому выражению, максимумы КПД установок с различным качеством («добротностью») лежат на одной прямой, соединяющей точки с  $\eta = 1$  и  $B = 0,5$ , т.е. по мере снижения  $\Phi$  приближается к 0,5. Эта величина знакома специалистам, имеющим дело с самыми различными преобразователями энергии – от приемо-передающих антенн и волноводов до ступеней паровых и газовых турбин.

Критериальная зависимость (8) позволяет также установить связь производительности (выходной мощности) установки от величины ее относительной нагрузки  $B$ :

$$N_j/N_j^{\max} = B(1 - B), \quad (10)$$

$N_j^{\max} = 0,25 J_{jk} X_{jk}$  – теоретический предел мощности (производительности) установки. Это выражение показывает, что по мере повышения качества установки (ценой, например, дополнительных капиталовложений в поверхности теплообменных или массообменных аппаратов) режимы с максимальной экономичностью  $B_n$  все более удаляются от режимов с максимальной выходной мощностью (т.е. с наименьшими удельными капиталовложениями). Это обстоятельство подтверждает необходимость поиска компромисса между экономичностью и производительностью энергетических и технологических установок, т.е. их технико-экономической оптимизации [8].

**Обсуждение результатов.** Теория производительности технических систем и лежащая в ее основе теория подобия процессов преобразования энергии могут быть весьма полезными при проектировании и оценке перспективности новых энергетических и технологических установок. В частности, применение теории подобия к ракетно-космическим двигателям облегчает поиск оптимального удельного импульса тяги и скорости полета РКД [9]. Она может быть также весьма полезна при распределении нагрузок между действующими энергетическими или технологическими установками, при нахождении экономически наивыгоднейших режимов их эксплуатации, при выяснении условий достижения в них максимальной производительности и т.п. В особенности это необходимо для установок, экономичность которых существенно понижается с ростом нагрузки (например, для преобразователей солнечной энергии), и для установок, эксплуатирующихся на частичных нагрузках.

Вместе с тем термодинамическая теория производительности проливает новый свет на явления «сопряжения» разнородных процессов и на происхождение так называемых «эффектов наложения» типа эффектов Пельтье, Зеебека, Эттинсгаузена-Нернста, Холла и т.п. Эти эффекты объясняются в ТНП «наложением» («увлечением») потоков  $J_i$  и  $J_j$  при одновременном протекании разнородных необратимых процессов. Между тем известно, что указанные эффекты достигают максимума в так называемых

«стационарных состояниях», когда один из потоков обращается в нуль и потому попросту не может налагаться на другие (оставшиеся) потоки. Иная трактовка вытекает из предлагаемой теории, согласно которой указанные эффекты возникают вследствие протекания процессов преобразования энергии из одной ( $i$ -й) формы энергии в другую ( $j$ -ю), так что эти стационарные состояния суть не что иное как режимы «холостого хода» соответствующих энергопреобразующих систем [10]. Последнее очень важно для понимания природы процессов переноса веществ в область их повышенной концентрации (так называемой «восходящей диффузии»), явлений «самоорганизации» биологических систем и других «антидиссипативных» явлений, происходящих в ряде областей Вселенной.

### **Литература.**

1. Грот С.Р., Мазур П. Неравновесная термодинамика, М.: Мир, 1964.
2. Хаазе Р. Термодинамика необратимых процессов, М.: Мир, 1967.
3. Андерсен В. и др. Thermodynamics in finite time. //Phys. Rev., A., **215**, N.5; **216**, N 4.
4. Barrer M. Revue General de Thermique. //J. Appl. Phys., 1982, **253**, N1.
5. Эткин В.А. Термокинетика (термодинамика неравновесных процессов переноса и преобразования энергии). Тольятти, 1999.
6. Эткин В.А. К термодинамической теории производительности технических систем. //Изв. АН СССР. Энергетика, 2000.- №1.-С.99 -106.
7. Эткин В.А. Соотношения взаимности обратимых процессов. //Сиб. Физ.-техн. Журнал, 1993. Вып.1. С. 2117-2121.
8. Андриященко А.И. Основы технической термодинамики реальных процессов. М. : Высш. школа, 1975.
9. Эткин В.А. К оптимизации удельного импульса тяги ракетных двигателей. //Изв. Вузов. Авиационная техника, 1999. -№ 1, С.76-77.
10. Эткин В.А. Синтез и новые приложения теорий переноса и преобразования энергии: Дисс. ...д-ра техн. наук. М., 1998. - 213 с.