

3. Новикова Ю. М. Использование биомассы в производстве энергии в капиталистических странах // Бюллетень иностранной коммерческой информации. — 1990. — № 36. — С. 6, 7.
4. Energy in Sweden / NUTEK (Swedish National Board for Industrial and Technical Development), 1995. — 32 p.
5. Aspung D. Research Director's Review // Bioenergia. — 1996. — № 2. — P. 3, 4.
6. Харари Ф. Теория графов. — М.; Мир, 1973. — 300 с.
7. Кафаров В. В., Винаров А. Ю. Основные направления развития процессов и аппаратов в биотехнологии // Итоги науки и техники. Процессы и аппараты хим. технологии. — 1986. — Т. 14. — С. 108–182.

Представлена кафедрой ЭАВТ

Поступила 20.09.1999

УДК 519. 6

## **ДИНАМИКА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ**

Канд. физ.-мат. наук, доц. СОЛОВЬЕВ А. А.

*Московский государственный университет*

Существуют многочисленные модели описания внутренних связей в различных системах пользователей энергии и взаимоотношений с внешней средой [1, 2]. Прогнозы оказываются зависящими от интуиции специалистов и потому в большинстве случаев не соответствуют действительности. Сложность математических расчетов, необходимость применения численных методов затрудняют проверку результатов и при наличии логических неточностей приводят к быстрой потере прогнозами своей актуальности.

В работе развивается подход для изучения особенностей потребления первичной энергии на основе методов термодинамики и кинетической теории материи с введением характерных для энергетических сообществ параметров состояния — скорости потребления первичной энергии, численности населения и времени использования ресурсов. Потенциальным преимуществом использованных представлений является то, что они оказываются достаточно общими для рассмотрения энергетических потребностей людей.

В модели «энергетика—общество» главным является определение взаимоотношения энергетических характеристик, которые проявляются в процессе создания, превращения и утилизации энергии. Если какой-либо пользователь получает извне некоторое количество энергии, то он использует ее в эквивалентных количествах, совершая ту или иную работу. Аналогом теплоты в предлагаемой модели служит первичная энергия, а механическая работа может трактоваться как энергопотребление. Количество полученной пользователем энергии может им не использоваться полностью. С точки зрения принципа сохранения

энергии разность между ними есть изменение внутренней энергии пользователя [3].

Общие свойства внутренней энергии характеризуются некоторым числом независимых друг от друга показателей, достаточных для однозначного определения состояния системы пользователей энергии. Это — время  $t$  или обратная времени величина  $f = 1/t$ , скорость энергопотребления  $E$  или мощность стока энергии и численность населения  $N$ . Данные величины будем считать параметрами или координатами состояния. При изменении состояния эти параметры претерпевают соответствующие модификации. Внутренняя энергия — функция параметров состояния, энергопотребление и энергообмен — функции процесса.

После наделения внутренней энергии свойствами, связанными с независимыми параметрами состояния, становится очевидным, что между ними должна существовать функциональная связь типа

$$\Phi(E, N, t) = 0, \quad (1)$$

которая является уравнением энергетического состояния. С помощью (1) можно находить любую из трех координат в функции двух остальных. Установим конкретный вид этой функции. В ограниченной области потребления энергии частота ее потребления определяется числом пользователей. Частота каждого отдельного потребления энергии связана с элементарным актом, в результате которого происходит извлечение энергии из потока энергии, генерируемого источником энергии. При одном акте энергопотребления происходит передача и поглощение импульса от извлеченной из ресурсов энергии. Число актов энергопотребления равно скорости  $\xi$  переноса энергии, отнесенной к единице длины области переноса. Импульс  $P_0$ , который при этом пользователь изымает из внешнего потока энергии, равен поглощенному им при одном акте и умноженному на скорость  $\xi$ , с которой эта энергия к нему поступает, т. е.  $P = P_0 \xi$ . Если в системе пользователей находится  $N$  пользователей, одинаково и независимо друг от друга потребляющих энергию из общего источника, то число актов использования и утилизации энергии должно быть в  $N$  раз больше. Величина энергии  $E$ , которая при этих актах изымается и, стало быть, потребляется системой из  $N$  пользователей, равна удвоенному значению импульса и поэтому может быть определена из следующего уравнения:  $E = 2PN = 2P_0 \xi N$ . Поскольку все акты потребления энергии в системе, состоящей из  $N$  пользователей, происходят хаотически, можно считать, что только одна треть общих пользователей способна совершать акты потребления энергии. Поэтому следует учитывать только треть общей доступной для потребления и попадающей к потребителям энергии, которая будет ими извлекаться и утилизироваться:

$$E = \frac{2}{3} P_0 \xi N.$$

Поток извлекаемой энергии по мере истощения ресурсов должен сокращаться, а через определенное время с начала потребления может и вовсе прекратиться. Количество извлеченных и доставленных для по-

требления энергетических ресурсов, следовательно, зависит от времени  $t$  их потребления. И поскольку с ростом времени количество использованной энергии увеличивается, энергопотребление следует принять изменяющимся прямо пропорционально времени. Следовательно,  $\frac{2}{3} P_0 \xi = Rt$ , где  $R = \frac{2}{3} P_0 \xi$ . В результате для энергопотребления получается уравнение энергетического состояния

$$Ef = RN. \quad (2)$$

Установим теперь связь конечности акта пользования с величиной энергии, которая потребляется из доступных энергетических ресурсов. Для этого оценим величину некоторого критического (предельного) времени, отпущенного пользователям на потребление энергии. Используем для данных оценок следующие элементарные рассуждения. При мгновенном акте поглощения энергии отдельным пользователем энергопотребление минимально. Когда же процесс потребления энергии отдельным пользователем осуществляется за конечное время, количество извлеченной из ресурсов энергии становится больше. Таким образом, учет периода длительности самого акта потребления энергии должен привести к изменению величины энергопотребления. Обозначая через  $b$  сокращение частоты самого акта потребления, по сравнению со случаем бесконечно большой частоты (мгновенности акта энергопотребления), получим для увеличения энергопотребления следующее выражение:  $\frac{1}{f-b}$ . Уравнение энергетического состояния (2) тогда следует записать в виде

$$E(f - b) = RN. \quad (3)$$

Формула (3) справедлива при условии, что  $b$  мало по сравнению с  $\frac{1}{t}$ ; для  $\frac{1}{t} = b$  формула дала бы бесконечно большое давление, следовательно,  $\frac{1}{b}$  выражает наименьшее интегральное значение длительности реальных актов энергопотребления.

Для реальных процессов энергопотребления недостаточно в уравнение (2) внести поправки на конечную продолжительность самого акта потребления энергии. Следует принимать во внимание также и величину внутреннего обмена энергией между пользователями. В перерывах между актами поглощения, если есть время до наступления следующего акта, нельзя исключать взаимодействие пользователей, в результате которого они могут передавать друг другу (часть или всю) энергию, получаемую из входящего в систему извне потока. Предположим, что энергообмен пользователей осуществляется по экспоненциальному закону

$E_i e^{-\frac{W(t)}{RN}}$ . Здесь  $W(t)$  — работа, необходимая для того, чтобы получить или передать энергию другим пользователям. Разность между энергией  $E$ , потребленной из внешних источников, и внутренней энергией  $E_i$ ,

которой обладает пользователь, в таком случае можно представить в виде

$$E - E_i = E_i e^{-\frac{W}{RN}} - E_i = E_i (e^{-\frac{W}{RN}} - 1). \quad (4)$$

Полагаем работу, необходимую для передачи энергии от пользователя назад к внешнему источнику, пропорциональной времени  $W = at = \frac{a}{f}$ . Учитываем, согласно (2), что  $E_i = \frac{RN}{f}$ , тогда после разложения правой части (4) в ряд при  $a \ll f^2$  находим:  $E - E_i = -at^2$ . Таким образом, в (3) величину потребленной пользователями энергии следует увеличить на  $at^2$ . В итоге уравнение энергетического состояния принимает вид

$$(E + at^2) = \frac{RN}{\left(\frac{1}{t} - b\right)}. \quad (5)$$

По внешнему виду (5) соответствует уравнению Ван дер Ваальса. Его можно представить в записи через приведенные параметры. В нашем случае в качестве таких величин следует использовать приведенные значения времени  $\tau = t_k/t$ , энергопотребления  $e = E/E_k$  и численности населения  $n = N_k/N$ . Индекс  $k$  обозначает соответствующие величины, для которых уравнение третьей степени (5) имеет одинаковые корни. Из него можно найти связь критических параметров  $f_k$ ,  $E_k$ ,  $N_k$  с константами  $a, b$ :

$$f_k = 3b; \quad E_k = a/27b^2; \quad N_k = 8a/27bR. \quad (6)$$

Уравнение энергетического состояния в приведенной форме записи имеет вид

$$\left(e + \frac{3}{\tau^2}\right)(3\tau - 1) = 8n. \quad (7)$$

Из (7) вытекает, что

$$\frac{RN_k t_k}{E_k} = K_k = \frac{8}{3} = 2,67. \quad (8)$$

Для уравнения состояния (3) это отношение должно быть равно единице. Из (5) следует, что энергетическое сообщество в критическом состоянии должно потреблять в 2,67 раза больше энергии, чем в нормальных условиях.

Оценим параметр  $R$  на основе данных мирового потребления энергии. По смыслу введения величина  $R$ , которую мы условно назовем энергетической постоянной, должна характеризовать уровень энергетиче-

ческих запасов. Примем величину мировых энергетических запасов равной  $5 \cdot 10^{12}$  т у.т. Выберем в качестве базового, например, 1935 г., в котором на земле проживало  $2,5 \cdot 10^9$  человек. Тогда из (8) для энергетической постоянной имеем

$$R = \frac{5 \cdot 10^{12}}{2,5 \cdot 10^9 \cdot 1935^2} = 0,5 \cdot 10^{-3}, \text{ т у.т./}(\text{чел.} \cdot \text{год}).$$

Энергетическая постоянная определяет тот энергетический ресурс, который один человек может израсходовать в виде единицы условного топлива за единицу времени.

Рассмотрим результаты оценок темпов мирового и регионального энергопотребления на основе полученного нами уравнения энергетического состояния (5). Для расчетов временной динамики энергопотребления  $E = f(t)$  в различных регионах мира использованы параметры  $a$  и  $b$ , вычисленные по (7). Значения критических параметров для различных энергетических сообществ сведены в табл. 1.

Таблица 1

Регион	$T_k$ , год	$E_k$ , млн. т у.т./год	$N_k$ , млн. чел.	$b$ , $10^{-4}$ год $^{-1}$	$a$ , т у.т./год $^3$	$K_{kr} = \frac{RN_k T_k}{E_k}$
Китай	1400	22	124	2,77	33	2,67
Индия	1200	18	69	2,77	38	2,70
Россия, СССР	1200	3,4	13	2,77	7,2	2,67
Африка	800	4,4	24	4,16	20,7	2,67
Юго-Восточная Азия	1800	11,1	28	1,85	10,3	2,67
Остальная Азия	800	3,2	18	4,16	14,9	2,66
Европа	800	4,4	25	4,16	20,7	2,68
Северная Америка	1750	1,16	3	1,9	1,13	2,67
Южная и Центральная Америка	1700	3,8	10	1,96	3,9	2,64
Океания	1850	0,87	2	1,80	0,72	2,51
Мир	1200	106	400	2,77	185	2,67

Критический коэффициент  $K_{kr}$  при этом практически для всех случаев одинаков. Совпадение (рис. 1) расчетов динамики мирового и регионального потребления энергии по уравнению энергетического состояния (5) с официальными данными [1, 4] показывает, что это уравнение в пределах проведенных расчетов отличается достаточной точностью и позволяет проводить предварительное вычисление пер-

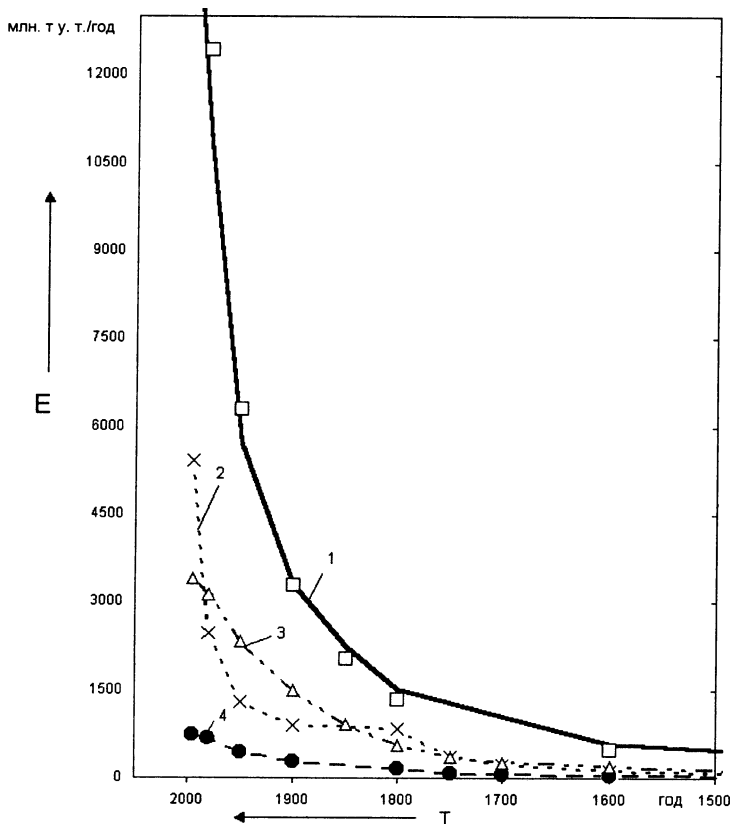


Рис. 1. Динамика энергопотребления, по данным [1, 4], по сравнению с расчетом по уравнению энергетического состояния (5) для различных регионов: 1 — мир; 2 — Китай; 3 — Европа; 4 — Россия, СССР.

спективного энергопотребления. Из табл. 1 убеждаемся, что целый ряд регионов имеет низкое значение критического времени по отношению к текущему моменту. Следовательно, в наше время энергетическое потребление в этих зонах земного шара находится в области, лежащей выше критической изотермы. Воспользовавшись приведенным уравнением состояния (7), можно построить на  $(e - \tau)$ -диаграмме изотермы (рис. 2), соответствующие различным приведенным численностям населения. Для энергетически подобных систем они в координатах  $(e - \tau)$  оказываются одинаковыми. Критерием энергетического подобия различных государств является равенство их критических коэффициентов. Государственные объединения, имеющие одинаковые критические коэффициенты, образуют группу энергетически подобных стран. Общие закономерности позволяют по известным свойствам одного из входящих в данную группу энергетически подобных государственных образований определять те же свойства других энергетических сообществ этой группы при наличии одинаковых условий, т. е. при равных значениях приведенных параметров.

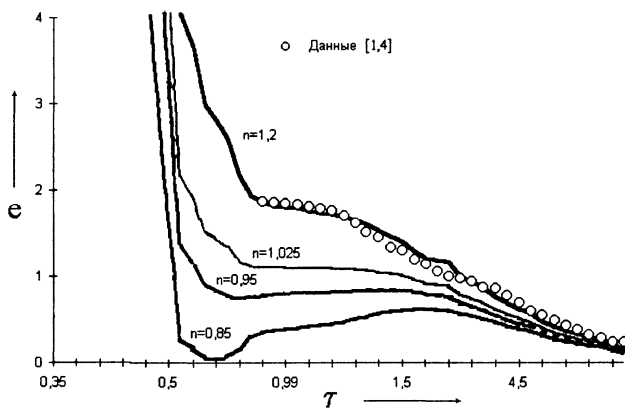


Рис. 2. Диаграмма приведенного уравнения энергетического состояния (7) по сравнению с данными мирового потребления первичной энергии

На основании полученных результатов можно заключить: если два или несколько регионов, удовлетворяющих одному и тому же приведенному уравнению состояния, имеют два одинаковых приведенных параметра, то и третий будет также одинаков, т. е. такие сообщества находятся в соответственных энергетических состояниях. Это утверждение эквивалентно закону соответственных состояний.

Уравнение энергетического состояния  $f = 1/t$  показывает, что каждой паре значений  $E, N$  отвечают три значения переменной  $f$ . Кубическое уравнение может иметь из трех корней либо все действительные, либо один действительный и два мнимых. Энергетическое истолкование этих корней состоит в том, что соответственно энергопотреблению и численности сообщество может существовать или в трех различных состояниях в определенные моменты времени, или только в одном (мнимые корни не имеют смысла). В первом случае наименьшая величина времени  $t$  отвечает, по-видимому, примитивному использованию энергии, которое целиком было связано с воспроизводством жизни, наибольшая — высокой организации общественных отношений и эффективному использованию энергии. Точная интерпретация средней величины затруднительна. Но, видимо, так же, как и в случае уравнения состояния газов, это состояние неустойчивости [5]. Второй случай, когда имеется лишь одно действительное значение  $f$ , может быть отнесен к энергетическому состоянию общества выше его критической численности населения.

По внешнему виду изотерм (рис. 2) можно утверждать, что в зависимости от времени условия и структура потребления энергии пользователями должны сильно изменяться. В начальном периоде имеет место монотонное нарастание энергопотребления со временем по закону, мало отличающемуся от гиперболического. При дальнейшем развитии сообщества пользователей на некоторых кривых  $E=E(t)$  с более низкой численностью намечаются искривления изотерм. А для некоторой критической численности населения  $N_k$  искривление сводится к точке пе-

региба на кривой  $E = E(t)$ . Для всех изотерм, расположенных ниже этого критического значения численности, существует изгиб, который выражен тем резче, чем ниже численность. Изгиб имеет вид S-образной петли, что коррелирует с выводами работы [6].

Амплитуда колебаний изотермической кривой волнообразного типа по мере снижения численности увеличивается, и энергопотребление может принимать нулевые и даже отрицательные значения. Такого рода ситуации в сообществе пользователей энергии могут возникать, когда их численность по каким-либо причинам начинает снижаться до определенных значений. При малой численности населения в сообществе утрачивается необходимость в использовании энергии, и с энергетической точки зрения состояние такого общества является катастрофическим.

В заключение отметим, что в рамках предложенной модели удается учесть общие закономерности, определяющие динамику изменения потребления энергии в различных структурных образованиях. В частности, показано, что объективные экономические и социологические факторы совмещаются в законе соответственных энергетических состояний. Критические показатели энергетического развития, вычисленные на основе уравнения состояния, указывают на неблагоприятные тенденции эволюции общественных отношений, приводящих к нарушению устойчивости мировой и региональных систем. Одновременно следует указать, что при использовании предложенных физических показателей энергетического состояния общества необходимо соотносить их с гуманитарными принципами, дистанцируясь от буквального переноса естественно научных принципов на социологические.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Макаров А. А. Мировая энергетика и Евразийское энергетическое пространство. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 280 с.
2. Алексеев В. В. Экология и экономика энергетики. — М.: Знание, 1990. — 64 с.
3. Соловьев А. А. Гидромеханика. — М.: Корина, 1998. — 264 с.
4. Система статистических показателей энергетики мира / Под ред Ю. Н. Руденко. — М.: МТЭА и ИНЭН РАН, 1993. — 236 с.
5. Алексеев В. В., Рустамов Н. А. Три пути развития энергетики и их воздействие на окружающую среду // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). — 1997. — № 3—4. — С. 57—61.
6. Медведева Е. А. Технологические уклады и энергопотребление. — Иркутск: СЭИ СО РАН, 1994. — 154 с.

Представлена лабораторией  
возобновляемых источников  
энергии

Поступила 4.07.1999