

УДК 338.45: 621.31 (470.22)

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ХОЗЯЙСТВА (НА ПРИМЕРЕ КАРЕЛИИ)

Г. А. БОРИСОВ

Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН

По уровню потерь оценивается энергетическая эффективность отдельных элементов, технологических цепочек (переделов) и энергетического хозяйства в целом на примере реальных показателей в Республике Карелия. Показано, что в новых экономических условиях оказываются недостаточными капиталоемкость отдельных элементов хозяйства, а также капиталоемкость приемников энергии, приводящая к низким макроэнергетическим показателям энергетического хозяйства.

G. A. BORISOV. ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS (CASE STUDY OF REPUBLIC OF KARELIA)

The energy efficiency of individual components, process chains (stages) and energy facilities in general is evaluated by losses from them. The analysis is based on factual data collected from Republic of Karelia. It is shown that the capital intensity of individual components of the energy facilities, as well as the capital intensity of energy-using equipment is insufficient for the new economic circumstances, wherefore the macro-energy parameters of the energy facilities are low.

Ключевые слова: энергетическое хозяйство, энергоемкость, потери, к.п.д., мультипликативный эффект.

Введение

Переход России к рыночной экономике привел к образованию в стране новых имущественных прав и рыночных отношений, что кардинально изменило условия управления, функционирования, финансово-экономического обеспечения и развития энергетического хозяйства. За годы перестройки и экономического кризиса энергетическое хозяйство в основном сохранило элементную базу и структуру, так как ввод в действие новых основных производственных фондов был крайне мал (Некрасов и др., 2002). В то же время кардинальное изменение междоэлементных связей в системе (правовых, финансовых, физических), критериев и принципов организации управления отдельными ее отраслями превратило энергетическое хозяйство страны сов-

сем в другую систему, которая из-за изменившихся связей оказалась в глубоком системном кризисе.

С начала перестройки в топливно-энергетическом хозяйстве увеличилась численность работающих, удельные расход первичной энергии и потери в сетях, износ и старение основных фондов, тарифы, резко снизилась надежность энергоснабжения потребителей энергоресурсов при избыточности производственных мощностей (Миренков и др., 1996; Предложения..., 2002; Статистика..., 2002). Тепловое хозяйство пришло в критическое состояние (Миренков и др., 1996). Стала очевидной противоречивость новой системы различным интересам абсолютного большинства потребителей энергоресурсов в настоящем и усиление их негативного воздействия на все народное хозяйство страны в будущем – снижение

конкурентоспособности продукции и уровня и комфорта жизни населения. При этом данная проблема в государстве определяется как организационная, которая может быть решена реорганизационными мерами. Вот уже во второй раз осуществляются реструктуризация электроэнергетики, реорганизация муниципальной теплоэнергетики в рамках реформы ЖКХ.

Основные энергетические проблемы, обострившиеся в стране после 1990 г.:

1. Низкая эффективность использования энергии.
2. Рост топливно-энергетической составляющей себестоимости продукции и жизни.
3. Дефицит инвестиций и старение основных производственных фондов в энергетике.
4. Ужесточение экологических требований.
5. Снижение надежности и качества энергоснабжения.

В энергетическом хозяйстве Карелии имеются те же проблемы, что и в целом по России, но с некоторыми региональными особенностями (Борисов, Сидоренко, 1999). Так, например, за последние 43 года начальный уровень и темпы роста потребления электроэнергии в России и Карелии совпадают. При этом отличительными особенностями Карелии являются отсутствие ископаемых топлив и вследствие этого глубокий дефицит (78–80%) топливного баланса, дефицит электрической энергии (40–60%), обусловленный, скорее всего, предшествующей политикой чрезмерной централизации выработки электроэнергии.

Под энергетическим хозяйством понимается совокупность технологических переделов по заготовке (обогащению), транспорту, распределению, преобразованию энергоносителей от источников природной первичной энергии до преобразования в конечную на выходе приемников.

В качестве показателей эффективности используются энергетические, финансово-экономические, экологические, технические характеристики.

Целью анализа является определение наиболее чувствительных точек и параметров элементов энергетического хозяйства для решения обострившихся проблем.

Анализ типовых элементов

Наиболее распространены в электроэнергетическом хозяйстве проводящие элементы – провода ЛЭП, обмотки машин и аппаратов. Энергетическая эффективность их определяется потерями энергии. Потери энергии прямо пропорциональны активному сопротивлению проводящих элементов или обратно пропорциональны площади их поперечного сечения. Оптимальное сечение проводов изменяется в зависимости от корня квадратного их величины тарифа. При прогнозируемом четырехкрат-

ном росте тарифа на электроэнергию в соответствии с этой моделью должно происходить удвоение сечения проводника. Снижение потерь и достижение их наименьшего уровня возможно также за счет увеличения напряжения или снижения передаваемых мощностей.

Вследствие этого ранее созданные ЛЭП и другие проводниковые элементы должны снизить тем или иным (определяемым прямым экономическим сравнением) способом потери, так как при новом уровне тарифов их капиталоемкость оказывается недостаточной для снижения потерь вдвое, чтобы достигнуть минимального значения суммы дисконтированных затрат.

Такая же зависимость потерь тепловой энергии от толщины слоя теплоизоляции ограждающих конструкций. Поэтому, рассуждая аналогичным образом, мы получим тот же вывод. С увеличением тарифа в 4 раза этот параметр (толщину слоя теплоизоляции) экономически целесообразно увеличить в 2 раза, чтобы уровень потерь тепловой энергии достиг наименьшей величины.

Из сказанного следует, что увеличение тарифов на энергоносители приводит к необходимости снижения уровня энергетических потерь путем увеличения капиталоемкости элементов энергетического хозяйства. В частности, четырехкратное увеличение тарифов на электроэнергию и тепло приводит к экономически целесообразному увеличению вдвое сечений проводящих элементов в электроэнергетике и теплового сопротивления теплоизоляции в теплоэнергетике.

Анализ единичной технологической линии энергетического хозяйства

Технологическая линия – последовательность технологических элементов и операций для преобразования и транспорта энергии от источников к приемникам конечной. Для анализа мы выбрали наиболее длинную в условиях Карелии: от газового месторождения до преобразования энергии в конечные виды электроприемниками. Количественными оценками энергетической эффективности отдельных технологических переделов являются коэффициенты ее полезного использования, расход энергии на собственные нужды, коэффициент полезного использования передела. Данные для количественных оценок переделов взяты из работ: Эксергические расчеты..., 1991; Борисов, Сидоренко, 1999; Волкова и др., 2000; Некрасов и др., 2002.

Результаты анализа приведены в табл. 1. По этим данным видно, что коэффициент полезного использования первичной энергии технологической линии в среднем около 12% (у механической энергии – 14%, химической – 20%, световой – 5%).

Таблица 1. Таблица оценки энергетической эффективности единичной технологической линии

Переделы Параметры	Ресурс первичной энергии	Добыча газа	Очистка и сушка	Транспорт газа	Преобразование в электро- энергию	Транспорт и распределение электроэнергии	Преобра- зование в конечную
кпд, %		95	95	98	62	84	36,1
ксн, %		10	3	13,5	4,6	2	0
кпи, %		85,5	92,1	84,7	59,1	85,7	36,1
интегр. кпи, %	100	85,5	78,7	66,7	39,4	33,8	12,2
P_1 , кВт	8,2	7,01	6,46	5,47	3,23	2,77	1
ΔP_6 , кВт		1,19	0,55	0,99	2,24	0,46	1,77

Из анализа таблицы следует, что интегральный коэффициент полезного использования первичной энергии по всей технологической цепочке мультипликативен относительно локальных

$$K_{nu6} = \prod_{i=1}^{i=6} K_{nu i} \quad (1)$$

$$K_{nu i} = \eta_i (1 - K_{CHi}) , \quad (2)$$

где $K_{nu i}$ – коэффициент полезного использования i -го передела;

где η_i – к.п.д. i -го передела;

K_{CHi} – коэффициент расхода энергии на собственные нужды i -го передела.

Также мультипликативны и мощности от конца к началу цепочки:

$$P_1 = P_6 \cdot \prod_{i=6}^{i=1} \frac{1}{K_{nu i}} \quad \text{или} \quad P_6 = P_1 \cdot \prod_{i=1}^{i=6} K_{nu i} , \quad (3)$$

где P_i – расход мощности на i -м переделе.

В технологической цепочке от источников первичной энергии к используемой конечной мультипликативно (ф. 1, 2) снижается полезная энергия пропорционально коэффициенту полезного использования ее, и, соответственно, растут суммарные потери энергии.

В технологической цепочке есть и другие сложные системные эффекты, определяемые свойствами межэлементных связей. Они оказывают как положительное действие (от неодновременности максимумов частей системы, от снижения величины резервных мощностей), так и отрицательное (от эффектов дискретности, вытеснения и сетевого) (Браилов и др., 1999). В упомянутой работе системные эффекты от ввода АЭС и крупных тепловых конденсационных электростанций оценены дополнительными затратами в пределах от 5 до 25%. Кроме того, в технологической цепочке выявляются аккумуляционные эффекты. Они обусловлены односторонностью связей энергии в цепочке и проявляются в интегральных потерях энергии и мощностей описываемой технологии.

При нарушении баланса мощностей, вызванном ростом требующейся конечной мощности на величину ΔP_6 , восстановление баланса может быть достигнуто двумя путями. При первом, традиционном пути в период непрерывного и опережающего роста энергетических мощностей до 1990 г. прирост потребления сопровождался приростом потребления производственных мощностей по всем переделам

технологической цепочки. Рост потребления на конечном переделе давал увеличение мощностей на каждом, кратное мультипликативным эффектам:

$$\Delta P_1 = \Delta P_6 \prod_{i=1}^{i=6} \frac{1}{K_{nu i}}$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_6 \prod_{i=2}^{i=6} \frac{1}{K_{nu i}} \quad (4)$$

.....

$$\Delta P_5 = \Delta P_6 \cdot \frac{1}{K_{nu 6}}$$

Наибольшее увеличение мощности будет у первого передела – заготовки (добычи) ископаемого топлива. Чтобы получить дополнительную мощность в конце цепочки, необходимо на всех переделах ее увеличить путем инвестирования ее строительства. Общее увеличение инвестиций будет составлять величину

$$\begin{aligned} \Delta I = & I_6 \cdot \Delta P_6 + I_5 \cdot \frac{\Delta P_6}{K_{nu 6}} + I_4 \cdot \frac{\Delta P_6}{K_{nu 6} \cdot K_{nu 5}} + \\ & + I_3 \cdot \frac{\Delta P_6}{K_{nu 6} \cdot K_{nu 5} \cdot K_{nu 4}} + \\ & + I_2 \cdot \frac{\Delta P_6}{K_{nu 6} \cdot K_{nu 5} \cdot K_{nu 4} \cdot K_{nu 3}} + \\ & + I_1 \cdot \frac{\Delta P_6}{K_{nu 6} \cdot K_{nu 5} \cdot K_{nu 4} \cdot K_{nu 3} \cdot K_{nu 2}} , \end{aligned} \quad (5)$$

где I_i – удельные инвестиции на единицу мощности на i -м переделе.

Другой путь восстановления баланса – снижение потерь на технологических переделах, каждое из которых дает возможность увеличения полезной мощности в конце цепочки. Естественно при этом, что самый выгодный передел для снижения потерь – последний, где увеличение коэффициента полезного использования энергии не потребует увеличения мощности предыдущих переделов. Самый невыгодный – первый передел, на котором, несмотря на снижение потерь, потребуются инвестиции в увеличение мощности последующих переделов. Увеличение инвестиций в каждый передел пропорционально росту мощностей от конца к началу цепочки, а в целом по цепочке инвестиции по переделам суммируются.

Таблица 2. Таблица оценок себестоимости и удельных инвестиций на единичной технологической линии

	Добыча	Обеспечение	Транспорт	Преобразование в электро-энергию	Транспорт и распределение	Преобразование в конечную	Конечная энергия	
							механическая	световая
Себестоимость, ц/к Втч	0,184–0,368		0,736	2,2–2,4	6,6		18,9	132,0
Требуемая мощность, кВт	8,2	7,01	6,96	5,47	3,23	2,77	1	1
Удельные инвестиции, долл/кВт		773–1034		АЭС 1373-1872 ТЭЦ 928-1068 ГЭС-2000	300–560		80–100	140
Общие инвестиции, долл		5086–6803		5066–10920	969–1808		400	818
Итого инвестиций, долл			От 11121	до 19531			400	840

Приближенная оценка такого мультипликативно-аккумуляционного увеличения мощностей потребует инвестиций в соответствии с имеющимися данными по удельным капиталовложениям (табл. 2).

Использовавшийся в предшествующие десятилетия метод оценки эффективности капиталовложений и новой техники по величине приведенных затрат через отраслевой коэффициент экономической эффективности капиталовложений давал различную капиталоемкость. Так, для промышленности он устанавливался $E = 0,16$, для строительства $E = 0,22$, для сельского хозяйства $E = 0,07$, для транспорта $E = 0,05$, для энергетики $E = 0,12$ (Эффективность..., 1983; Браилов и др., 1999), торговля, ЖКХ $E = 0,25$. Вследствие этого методически был обусловлен еще один закономерный дефицит капиталовложений в конце единичной технологической линии на последнем переделе в отраслях, потребляющих энергетические ресурсы, – промышленности, строительстве, сельском хозяйстве и сфере услуг.

В целом технологические переделы рассмотренной технологической цепочки имеют повышенные, экономически нецелесообразные уровни потерь в каждом элементе, обусловленные былым низким уровнем тарифов, и повышенный уровень потерь в конце технологической цепочки – у потребителей энергии, вызванный большими значениями коэффициентов экономической эффективности капиталовложений и новой техники в энергопотребляющих отраслях народного хозяйства – промышленности, строительстве, сельском хозяйстве, социальной сфере (Эффективность..., 1983).

В дополнение к сказанному следует отметить еще один системный эффект или взаимосвязь в цепочке, кроме мультипликативного, – неэквивалентность инвестиционных затрат в производственной и потребляющей части технологической цепочки. Вследствие того, что для получения и доставки потребителю требуется шесть переделов с мультипликационным эффектом возрастания на каждом переделе, на удельные капитальные вложения в производственную часть энергетического хозяйства приходится в 12–50 раз больше, чем в потребляющую (табл. 2).

Таким образом, рассмотренная единичная технологическая линия в целом обладает сильным мультипликативным эффектом, усиливающимся в зависимости от числа переделов (преобразований) энергии. Мультипликативный эффект проявляется в потерях мощности переделов, расходе энергоносителей, величине инвестиций и топливных составляющих себестоимости. Он максимален для конечных переделов цепочки.

Макроанализ энергетического хозяйства

Макроанализ эффективности энергетического хозяйства как сложной системы осуществляется сравнением его интегральных критериев, среди которых общепризнанными являются удельная энергоемкость ВВП, душевое энергопотребление, удельные выбросы вредных веществ (Конторович и др., 1999; Вайцеккер и др., 2000; Статистика..., 2002).

По интегральной характеристике эффективности использования энергии Карелия отстает от России. В 1997 г. в Карелии на 1 кг у.т. производилось 55 центов внутреннего регионального продукта, в России – 80 центов. Для сравнения с соседними регионами имеются данные за 2000 г. и по эффективности использования энергии, и по душевому потреблению (табл. 3).

В сравнении со среднероссийскими данными и с соседними регионами (не говоря уже про авангардные страны) главный вопрос по энергетическому хозяйству Карелии – почему, потребляя топлива и электроэнергии больше на душу населения и единицу ВВП, чем большинство сравниваемых потребителей, мы имеем одну из самых низких эффективностей использования?

В литературе (Статистика..., 2002) определяются три основные причины низкой энергоэффективности экономики России:

1. Структура экономики, где высок вес энергоемкой промышленности и низок вес услуг;
2. Суровые природно-климатические условия;
3. Высокая энергетическая затратность производств.

Эти причины для Карелии не совсем справедливы. Первая для республики обусловлена

Таблица 3. Удельное душевое потребление и эффективность использования энергии в 2000 г.

Регион, страна	Расход ТЭР на душу населения, тут	Расход э/эн на душу, тыс. кВт · ч	Эффективность ТЭР, долл/кг ут
Республика Карелия	6,5	8,3	0,79
С.-Петербург	3,1	3,6	1,93
Архангельская обл.	5,3	5,0	1,04
Мурманская обл.	8,0	13,2	0,75
Северо-Западный Федеральный округ	5,9	4,6	0,96
Россия	6,3	6,2	1,06
США	11,3	11,3	2,98
ФРГ	5,7	5,6	4,35
Япония	5,8	5,7	4,34
Финляндия	≈ 8,8	12,6	3,2

определяющей ролью в ней всего четырех предприятий-гигантов – двух ЦБК, одного ГОКа и одного алюминиевого завода, потребляющих до 70% электроэнергии и 55% топлива (Борисов, Сидоренко, 1999).

Вторая причина – высокая энергетическая затратность потребителей тепловой энергии. Отапливаемые жилые, производственные и общественные здания, производства целлюлозы и бумаги имеют потребление в 2–2,5 раза больше, чем в Финляндии.

Высоки и удельные затраты электроэнергии, превышающие показатели развитых стран в алюминиевой промышленности, электроприводе, источниках света. Это досталось в наследство от старого технологического уровня.

Влияние сурового климата ограничивается прибавкой в расходах первичной энергии в балансе от отопительных систем в 4–6% относительно центра России, поэтому этот фактор энергетике можно считать преувеличенным.

И, наконец, рассмотрим ранее повышенный относительно наивыгоднейшего уровень потерь у приемников-преобразователей энергии, обусловленный в предшествующее время низким уровнем тарифов на энергоносители и мультипликативно-аккумуляционным эффектом.

В целом экономика Республики Карелия еще в большей степени, чем федеральная, «перекормлена» энергоносителями. Дальнейшее продолжение энергетической политики с доминантой на рост потребления энергетических ресурсов и дальнейший прогнозируемый рост тарифов на энергоносители приведут к новым неразрешимым проблемам:

- невозможности при имеющейся энергоёмкости удвоить ВВП (ВРП);
- обеспечить конкурентоспособность карельской продукции на внешнем и внутреннем рынке;
- найти инвестиции на обеспечение роста производства энергии.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Карелия имеет высокий уровень душевого потребления первичных энергетических ресурсов и крайне низкую эффективность их использования.

2. Это обусловлено, в порядке значимости,

– структурой экономики, где высока доля энергоемких производств и незначительна доля услуг;

– высоким уровнем потерь и удельных расходов энергии различными элементами энергетического хозяйства;

– суровостью природно-климатических условий.

3. Элементная база существующего энергетического хозяйства, созданная в доперестроечные времена при низком уровне тарифов на энергоносители, при наблюдаемом и прогнозируемом росте тарифов выходит из зоны наивыгоднейших численных значений и в новых условиях требует повсеместного повышения энергетической эффективности элементов и снижения уровня потерь путем увеличения капиталовложений до величины, пропорциональной корню квадратному от кратности роста тарифов.

4. В технологических цепочках энергетического хозяйства имеются мультипликативные эффекты, которые многократно усиливают потребность в первичной энергии и капиталовложениях при росте подведенной или конечной энергии сверх располагаемой.

Вследствие мультипликативно-аккумуляционного эффекта в технологических цепочках у приемников подведенной энергии должен быть большой потенциал энергосберегающих модернизаций и реконструкций, обладающих абсолютной экономической эффективностью в сравнении с вводом новых мощностей, т. е. когда у нового варианта $K_2 < K_1$ и $C_2 < C_1$ (Эффективность..., 1983; Методические рекомендации..., 1994).

Это положение легко проверяется на практике.

5. Второй причиной высокого удельного потребления является низкая капиталоемкость приемников энергии в промышленности, сельском и жилищном хозяйстве, обусловленная пониженными в сравнении с производственной частью энергетического хозяйства сроками окупаемости капиталовложений.

6. Третьей причиной высокого удельного потребления является неучтенность мультипликативного и аккумулирующего эффекта в производственной части энергетического хозяйства, из-за чего доминантой энергетической политики страны было и фактически остается

наращивание производства энергетических ресурсов, а не их эффективное использование.

В рамках традиционной политики не удастся решить и ранее сформировавшиеся в стране энергетические проблемы, перечисленные во введении.

Приведенные оценки являются несколько заниженными, так как брались максимальные значения к.п.д. элементов и нижние границы оценки энергетических потерь. Они не носят обобщенного характера, ввиду того что получены на самой длинной технологической цепочке энергетического хозяйства промышленного потребления.

Поэтому основными задачами дальнейших исследований являются:

- получение количественных оценок по всем основным технологическим цепочкам энергетического хозяйства Карелии;

- разработка теоретических основ повышения энергетической эффективности используемых в республике топливно-энергетических ресурсов и реконструкции топливно-энергетического хозяйства.

Литература

- Борисов Г. А., Сидоренко Г. И., 1999. Энергетика Карелии. Современное состояние, ресурсы и перспективы развития. СПб.: Наука. 303 с.
- Браилов В. П., Волкова Е. А., Урванцева Л. В., Шульгин Л. С., 1999. Методический подход к прогнозированию развития атомных и тепловых электростанций на перспективу до 2030 года // Изв. РАН. Энергетика. № 5. С. 54–67.
- Бродянский В. М., 2001. Классическая термодинамика к началу XXI века: состояние и перспективы развития // Изв. РАН. Энергетика. № 5. С. 17–43.
- Вайцеккер Э., Ловинс Э, Ловинс Л., 2000. Фактор четыре. Затрат – половина, отдача – двойная. М.: Academia. 400 с.
- Волкова Е. А., Макарова А. С., Веселов Ф. В. и др., 2000. Сценарии развития электроэнергетики // Изв. РАН. Энергетика. № 5. С. 41–54.
- Гуд Г. Х. Макол Р. Э., 1962. Системотехника. Введение в проектирование больших систем. М.: Сов. радио. 383 с.
- Конторович А. Э., Добрецов Н. Л., Лаверов Н. П. и др., 1999. Энергетическая стратегия России в XXI веке // Вестник РАН. Т. 69, № 9. С. 771–784.
- Макаров А. А., Макарова Т. Е., Шевчук Л. М., 2003. Приоритеты развития газовой отрасли России // Изв. РАН. Энергетика. № 2. С. 21–28.
- Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования, 1994. М. 80 с.
- Миренков А. П., Сеннова Е. В., Стенников В. А. и др., 1996. Современные проблемы преобразования теплового хозяйства страны // Изв. РАН. Энергетика. № 3. С. 70–77.
- Некрасов А. С., Синяк Ю. В., 2001. Проблемы и перспективы российской энергетики на пороге XXI века // Проблемы прогнозирования. № 1. С. 86–101.
- Некрасов А. С., Синяк Ю. В., Узяков М. Н., 2002. Электроэнергетика России: экономика и реформирование // Проблемы прогнозирования. № 5. С. 12–48.
- Предложения по вопросам реформирования электроэнергетики Российской Федерации, выработанные на основании совместного рассмотрения проблемы на расширенном заседании ученых отделений физико-технических проблем энергетики, геологии, геофизики, геохимии и горных наук и экономики Российской Академии наук, 2002 // Там же. С. 70–76.
- Синяк Ю. В., 1999. Энергосбережение и экономический рост // Проблемы прогнозирования. № 3. С. 49–62.
- Статистика пространственного развития, 2002. Т. II: Проблемы энергетики Северо-Запада России / Под рук. Ю. А. Перельгина. СПб.: Изд. Дом «Corvus». 112 с.
- Эксергические расчеты технических систем: Справочное пособие, 1991. Киев: Наук. думка.
- Эффективность капитальных вложений: Сб. утвержденных методик, 1983. М.: Экономика. 128 с. (АН СССР. Науч. совет по эффективности основных фондов, капитальных вложений и новой техники.)