

ОБ ЭКОНОФИЗИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТИ СТРАНЫ В СРЕДНЕСРОЧНОЙ ПЕРСПЕКТИВЕ

А. А. Михалевич, С. П. Фисенко, А. И. Шнип

Институт тепло- и массообмена им А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси.

Энергобезопасность страны исследована при помощи математического моделирования. Состояние страны характеризуется такими параметрами как: численность населения, валовый внутренний продукт (ВВП) и потребляемая энергия E . Показана возможность использования открытой статистической информации для моделирования эволюции энергобезопасности страны на период до 15 лет. Математическая модель включает три обыкновенных дифференциальных уравнения. Введен безразмерный критерий энергобезопасности, зависящий от цены на топливо на внешнем рынке. Обсуждаются перспективы развития модели.

Наряду с традиционными подходами [1], в настоящее время интенсивно развивается такой метод моделирования как экономических систем, как эконофизика (“econophysics”) [2]. Эконофизика практически включает в себя балансовые модели деятельности и модели взаимодействия производственных объектов. С теоретической точки зрения основное предположение заключается в том, что основные переменные, описывающие проблему, считаются непрерывными функциями времени. Затем записываются обыкновенные дифференциальные уравнения для описания эволюции всех переменных. Каждое дифференциальное уравнение представляет собой закон сохранения определенной величины (энергии, трудовых ресурсов, валового внутреннего продукта и т. д.), отражающей состояние моделируемого объекта (предприятия, отрасли, страны и т. п.).

Цель нашего исследования – разработать с помощью эконофизики математическую модель для прогнозирования энергобезопасности страны на основе общедоступной статистической информации.

Как показал анализ отечественных и зарубежных источников, общепринятое определение энергобезопасности страны носят качественный характер. Действительно, оно существенно зависит от временного и пространственного масштаба рассмотрения процессов. В этом состоит интересная близость теоретической задачи об обеспечении энергобезопасности страны со многими проблемами неравновесной статистической физики и термодинамики [3].

Простейший критерий энергобезопасности, используемый в нашем подходе, базируется на минимальном наборе параметров, включающем в себя следующие: GDP – валовой внутренний продукт в течение года; E – энергия, потребляемая страной в течение года; P_r – среднегодовая цена единицы энергии на внешнем рынке. Параметр GDP общепринят в настоящее время для характеристики объема национальной экономики.

Введем безразмерный параметр ε [4], равный

$$\varepsilon = \text{GDP}/(EP_r). \quad (1)$$

Этот параметр можно рассматривать как количественную характеристику уровня энергобезопасности страны с точки зрения экономического аспекта этой проблемы. Параметр ε должен быть всегда существенно больше единицы для обеспечения достаточного уровня энергобезопасности страны.

Наша минималистская динамическая модель энергобезопасности основана на том, что в рассмотрение вводится некоторый достаточно ограниченный набор параметров состояния страны. Эволюционные дифференциальные уравнения для данного набора параметров строятся на основе балансных соотношений. Одним из основных параметров модели является численность населения N страны. Изменение численности населения описывается хорошо известным дифференциальным уравнением первого порядка, в которое входят два эмпирических коэффициента k_b и k_d (соответственно коэффициенты рождаемости и смертности населения), известные из данных многолетних эмпирических статистических исследований.

$$\frac{dN}{dt} = N(k_b - k_d). \quad (1)$$

Эволюционные уравнения для двух других параметров модели – внутреннего валового продукта GDP и потребляемой страной энергии E – также строятся как уравнения баланса и содержат еще два эмпирических коэффициента. К ним относятся: k_{pr} – производительность труда на одного человека в год, долл. США, k_{egnp} – энергоемкость единицы внутреннего валового продукта (ВВП). Имеем:

$$\frac{dGDP}{dt} = \frac{dk_{pr}}{dt} N + k_{pr} \frac{dN}{dt}, \quad (2)$$

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{d(k_{egnp} GDP)}{dt}. \quad (3)$$

Начальными условиями для системы эволюционных уравнений (1-3) являются значения основных переменных модели N , GDP и E , для данной страны и некоторого года, принятого за начальную точку отсчета. В частности, k_{pr} как функцию времени t можно представить как:

$$k_{pr}(t) = k_0(1 + a_{pr})^t,$$

где k_0 – реперное значение производительности труда, известное из статистических данных; a_{pr} – темп роста производительности труда. Если производительность труда растет на 5 % ежегодно, то $a_{pr} = 0.05$. Аналогично энергию, потребляемую на производство единицы валового внутреннего продукта, представим в виде:

$$k_{egnp}(t) = k_1(1 + a_{egnp})^t,$$

где a_{egnp} – темп роста потребления энергии на единицу валового внутреннего продукта, k_1 – реперное значение, a_{egnp} меньше нуля, если происходит снижение потребления энергии.

С помощью нашей модели величина энергобезопасности страны ε в любой момент времени t определяется соотношением:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{k_{egnp}(t) Pr(t)}. \quad (4)$$

После разложения в ряд правой части выражения (4), на относительно малых временах мы имеем линейное во времени поведение параметра ε (при постоянной цене энергии на внешнем рынке)

$$\varepsilon(t) \approx \varepsilon_0 [1 - a_{\text{egnp}} t]. \quad (5)$$

Таким образом, на небольшом временном интервале, порядка несколько лет, энергобезопасность страны, выраженная через параметр ε , определяется её исторически начальным значением ε_0 , и темпом изменения энергоёмкости единицы продукции в стране. Если $a_{\text{egnp}} = 0$, то $\varepsilon = \varepsilon_0 = \text{const}$, если $a_{\text{egnp}} < 0$ (энергоёмкость производства снижается), то ε растёт, что подтверждают приведенные ниже результаты численного анализа. В рамках принятого описания важна средняя за год цена единицы энергии на внешнем рынке, так что влиянием кратковременных колебаний цены можно пренебречь.

Для Республики Беларусь возможны различные сценарии развития страны с точки зрения энергобезопасности. На рис.1 показано изменение параметра ε для двух различных сценариев развития технологического уровня страны. По сценарию 1 производительность труда стабильно растёт на 5% в год и с таким же темпом уменьшается потребление энергии на единицу ВВП (кривая 1); в сценарии 2 производительность труда растёт на 5% в год, а потребление энергии на единицу ВВП уменьшается на 1% (кривая 2). Цена энергии в расчетах принята такой, что цена тонну нефтяного эквивалента равна 350 долларов США. Обратим внимание, что линейная модель (5) справедлива только в течение примерно 6 лет для первого сценария. В обоих сценариях принято, что население страны убывает согласно многолетним демографическим трендам. Отметим, что в первом сценарии через пятнадцать лет потребление энергии на единицу ВВП падает почти в два раза по сравнению с 2005 годом.

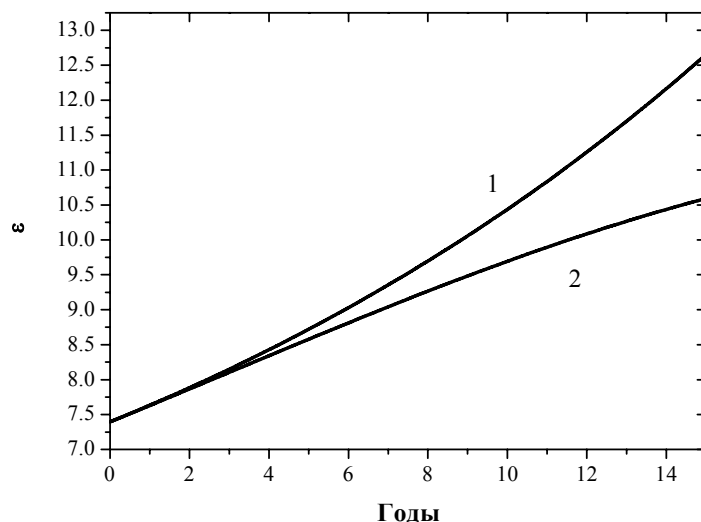


Рис.1 Изменение энергобезопасности страны для двух сценариев развития страны
1 – $a_{pr} = 0.05$, $a_{egnp} = -0.05$; 2 – $a_{pr} = 0.05$, $a_{egnp} = -0.01$

На рис.2 показано изменение потребления энергии в стране для указанных выше двух сценариев развития отнормированное на величину энергии, потребленной в Беларуси в 2005 году. Видно, что во втором сценарии развития страны потребление энергии возрастает примерно на 14% за 15 лет. Снижение потребления энергии на начальном участке связано с двумя факторами: уменьшением численности населения и снижением потребления энергии на единицу продукции. Теоретический и практический интерес представляет нахождение такого сценария развития страны, при котором не происходит существенного роста потребления энергии.

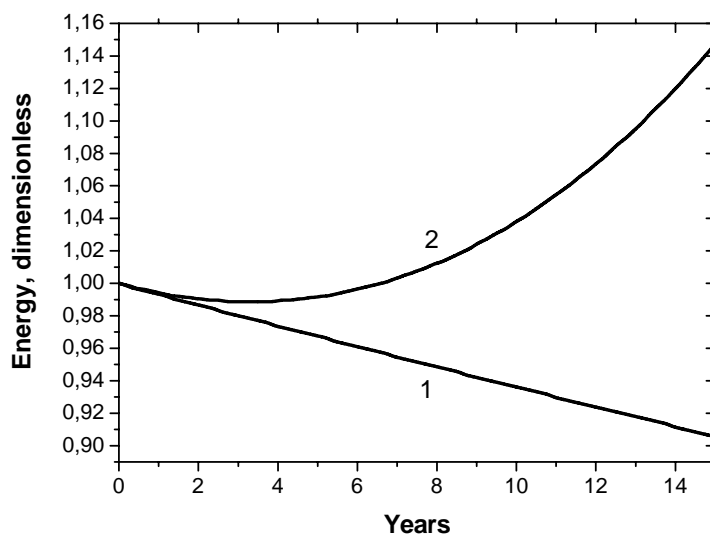


Рис.2 Потребление энергии (отнормированное) для двух сценариев развития страны

1 – $a_{pr} = 0.05$, $a_{egnp} = -0.05$; 2 – $a_{pr} = 0.05$, $a_{egnp} = -0.01$.

Численные результаты, полученные с помощью разработанной математической модели, могут служить эффективным инструментом экспресс-оценки прогнозов уровня энергобезопасности страны по указанному выше критерию. На рис.3 показаны результаты моделирования оптимистического сценария развития страны, когда темп роста GDP равен 10%, цена энергии на внешнем рынке постоянна, но темпы энергосбережения различны.

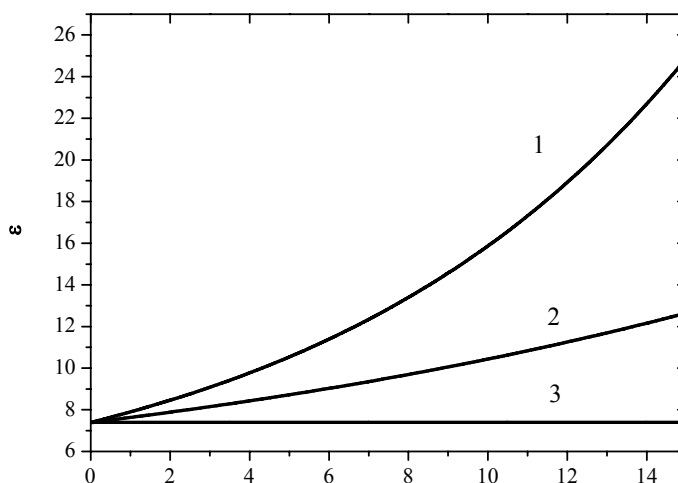


Рис.3 Эволюция энергобезопасности во времени (оптимистичный сценарий развития)

$$1 - a_{егп} = -0.1; 2 - a_{егп} = -0.05; 3 - a_{егп} = 0.0.$$

В рамках нашей модели теоретический и практический интерес имеет задача о времени перехода из состояния $(GDP, E)_0$ в заданное состояние $(GDP, E)_1$, о возможности такого перехода, а также об оптимальной траектории такого перехода [5].

Для иллюстрации на рис.4 показаны траектории развития страны на период до 15 лет для двух сценариев: в первом, оптимистическом, темп роста производительности труда равен 10%, а во втором 5%. Темп снижения энергоемкости единицы ВВП в обоих случаях равен 5%.

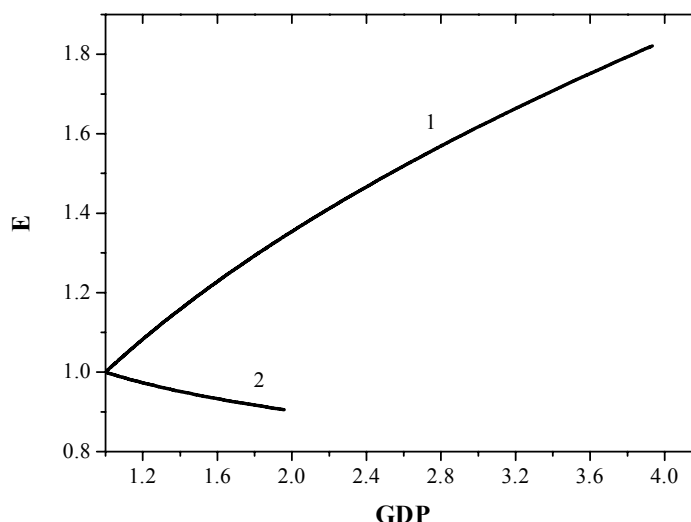


Рис.4 Траектории развития страны
 $a_{egnp} = -0.05$; 1 – $a_{pr} = 0.1$ 2 – $a_{pr} = 0.05$.

Математическая модель, описанная выше, дает огрубленное описание состояния страны и её энергобезопасности с точки зрения взаимодействия с внешним миром и внутренней социально-экономической структуры. В действительности, можно построить иерархию моделей примерно такой же математической структуры, которые, тем не менее, дают более точное описание. В частности, вместо полного числа жителей можно ввести параметры, учитывающие возрастную структуру населения, т.е. вместо одного параметра $N(t)$ – число жителей – ввести число работающих и число неработающих граждан (детей, пенсионеров и инвалидов). Для некоторых эмпирических коэффициентов (или для всех) можно построить эволюционные уравнения, определяющих их динамику в зависимости от динамических переменных модели, при этом они сами становятся динамическими переменными. Однако надо иметь в виду, что в этом случае в модели появляются новые эмпирические коэффициенты и для них встает проблема идентификации, которой не было в нашей минималистской модели.

Сравнительный анализ энергобезопасности различных стран по величине параметра ε возможен, но требует осторожности, так фактическая доля GDP используемая на энергообеспечение сильно зависит от её климата, структуры экономики и целого ряда других параметров. Нужно подчеркнуть, что динамика изменения во времени параметра ε передается нашей моделью с достаточной точностью. В таблице собраны некоторые показатели, необходимые для расчета параметра ε для ряда стран. Мы также приводим расчет с учетом паритета

покупательной способности ε (ППС). Расчет проводился при следующих предположениях:

- Стоимость топлива определялась по средним ценам на мировом рынке в пересчете на тонну нефтяного эквивалента, которая для угля, природного газа и нефти составляла, соответственно, 120, 320 и 515 долларов США соответственно;
- Доля каждого вида топлива принималась, исходя из средней пропорции мирового потребления в 2005 году (35% - нефть, 25,3% - уголь, 20,7% - природный газ), что цена 1 тонны нефтяного эквивалента равна 350 долларов США;

Таблица Статистические данные, связанные с энергобезопасностью стран

Страна, регион	Население,	ВВП	ВВП	Энерго-	ε	ε (ППС)
	млн. чел.	тыс.\$/чел	(ППС), тыс.\$/чел	потребление, т н.э./чел.		
В мире	6432	5,64	8,49	1,78	9,05	13,63
ОЭСР	1172	24,2	25,9	4,74	14,59	15,61
Бывшие страны СССР	285	1,84	7,36	3,44	1,528	6,11
Латинская Америка	449	3,61	7,11	1,11	9,29	18,30
Австрия	8,23	25,3	30	4,17	17,33	20,55
Беларусь	9,78	1,867	7,04	2,72	1,961	7,4
Болгария	7,74	2,07	8,07	2,59	2,284	8,90
Чехия	10,23	6,63	17,8	4,42	4,286	11,51
Дания	5,42	34,56	30,3	3,62	27,28	23,91
Израиль	6,92	18,38	23	2,82	18,62	23,30
Япония	127,76	39,09	27,2	4,15	26,91	18,73
Литва	3,41	4,85	12,9	2,52	5,499	14,63
Швейцария	7,5	34,61	30,8	3,62	27,32	24,31

Следует отметить, что для стран в основном импортирующих энергоресурсы показатель энергобезопасности ε следует исчислять по обменному курсу национальной валюты, так как практические расчеты проводятся именно по такой схеме. Для стран, имеющих большие собственные энергоресурсы, допустимо использовать расчет ВВП

по паритету покупательной способности. Как правило, такие страны устанавливают цены на энергоресурсы на внутреннем рынке ниже мировых цен.

Если покупать энергоносители по мировым ценам, то критическая ситуация очевидна для Болгарии, Беларуси и большинства республик Советского Союза. Заметно лучшая ситуация у европейских стран, не входящих в ОЭСР, то есть бывших социалистических стран. Для экономически развитых стран показатель ε на порядок выше чем в Беларуси, если рассчитывать ВВП по обменному курсу; и в несколько раз выше, если рассчитывать по паритету покупательной способности.

Верификация модели по доступным официальным данным Республики Беларусь за 2000-2005 гг, показала, что модель с двумя определяемыми параметрами (темпом роста производительности труда и энергоемкости единицы ВВП), рассчитанному по паритету цен, описывает рост ВВП с относительной точностью 0.1%, а потребление энергии с относительной точностью 2% .

Литература

1. Дилигенский Н. В., Гаврилова А. А., Цапенко М. В. Построение и идентификация математических моделей производственных систем. Самара, 2005.
2. Чернавский Д. С., Старков Н. И., Щербаков А. В. О проблемах физической экономики // Успехи физ. наук, 2002, т. 172, вып. 9. С. 1045–1068.
3. Stauffer D. Introduction to statistical physics outside physics // Physica A. 2004. Vol. 336A. Pp. 1–5.
4. Михалевич А. А., Фисенко С. П., Шнип А. И. Прогнозирование энергобезопасности в среднесрочной перспективе, в "Тепло – и массоперенос – 2007", Сб. Трудов ИТМО НАНБ, под. ред. В.Л. Драгуна, Сс.15-19.
5. Арнольд В. И. Теория катастроф, М; Наука, 1990.
6. Key World Energy Statistics, 2006 Edition, International Energy Agency. Paris, 2006.