

УДК 66.011

А. С. Андреев
Череповецкий государственный университет

ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ МАКРОПРОИЗВОДСТВА

В статье изложен подход к моделированию макропроизводства и прогнозированию развития макроэкономики с учетом термодинамической необратимости энергетических взаимодействий в реальных тепловых двигателях. Модель макропроизводства представляется производственной функцией с включением в нее эксергии. Термодинамическая модель развития экономики представляется односекторной макроэкономической моделью роста Солоу, в которую дополнительно включены параметры, определяющие термодинамическую эффективность использования углеводородного топлива.

Энергосбережение, эксергия, труд, капитал, производственная функция, бюджетное уравнение, показатели энерготехнологического производства, эффективность использования капитала, стационарная точка производства, необратимость процессов, тепловой насос, генерация эксергии, стационарное развитие экономической системе, параметры состояния экономики.

The article describes the approach to modeling macro production and forecasting macroeconomics development taking into account the thermodynamic irreversibility of energy interactions in real heat engines. The model of the macro production is described as production function including Exergy in it. Thermodynamic model of economy development is described as macroeconomic single sector Solow growth model, which includes additional parameters defining the thermodynamic efficiency of the use of fossil fuels.

Energy saving, exergy, labor, capital, production function, the budget equation, figures in Energy production, efficient use of capital, fixed point of production, irreversibility of processes, heat pump, Exergy generation, steady development of the economic system, the parameters of the economy.

Введение

Наметившаяся тенденция повышения роли энергосберегающей составляющей в экономике требует уже на стадии макро моделирования оценивать потери и принимаемый уровень энергетических затрат при прогнозировании производства. Для этого необходимо ввести в рассмотрение обобщенный макропоказатель, учитывающий и полезно использованную энергию, и ее потери в реальных тепловых двигателях. В качестве такого показателя целесообразно использовать эксергию E [1].

Основная часть

Традиционно макропроизводство моделируется производственной функцией Кобба-Дугласа:

$$f(K, L) = Y = C \cdot K^{\alpha} \cdot L^{1-\alpha}.$$

Эта модель включает два определяющих параметра: K – капитал и L – труд. Предлагается капитал декомпозировать на две составляющие:

- 1) материальные и финансовые ресурсы (фактор капитал);
 - 2) эксергию E (фактор энергопотребление).
- Тогда модель макропроизводства примет вид:

$$f(K, E, L) = Y = C \cdot K^{\alpha_1} \cdot E^{\alpha_2} \cdot L^{1-\alpha_1-\alpha_2},$$

где α_1, α_2 – эластичности по капиталу и труду.

При этом эксергия, труд и капитал могут измеряться в денежных единицах.

Если в производственной системе используются вторичные энергетические ресурсы или применяются тепловые насосы, то это приводит к генерации эксергии, что, в конечном итоге, повышает энергетическую эффективность производства и уменьшает затраты. Бюджетное уравнение производства имеет следующий вид:

$$B = r \cdot K + v \cdot E \cdot (1 - \beta) + w \cdot L,$$

где r, v, w – соответственно цена капитала, эксергии, труда; β – доля возвращенной эксергии.

В результате модель оптимизации производства с учетом генерации эксергии представляется следующей математической системой:

$$\begin{aligned} Y &= C \cdot K^{\alpha_1} \cdot E^{\alpha_2} \cdot L^{1-\alpha_1-\alpha_2} \rightarrow \max, \\ B &= r \cdot K + v \cdot E \cdot (1 - \beta) + w \cdot L, \\ K > 0; E > 0; L > 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Задача оптимизации заключается в поиске максимума производительности системы и решается методом неопределенных множителей Лагранжа. Для рассматриваемой целевой функции при заданных ограничениях функция Лагранжа имеет вид:

$$Ln(K, L, \lambda) = C \cdot K^{\alpha_1} \cdot E^{\alpha_2} \cdot L^{1-\alpha_1-\alpha_2} + \lambda \cdot (B - r \cdot K - w \cdot L - v \cdot E \cdot (1 - \beta)).$$

Для количественной демонстрации моделирование макропроизводства проведено при следующих условных исходных данных:

$$C = 1,1, \alpha_1 = 0,24, \alpha_2 = 0,3, \\ \beta = 0,1, r = 0,3, \\ w = 0,4, v = 0,49.$$

При моделировании дополнительно учтено требование обеспечения эффективного использования капитала. Критерием оптимального использования является предельная эффективность капитала РЕК при известной банковской ставке i :

$$РЕК = \frac{\partial f(K, L)}{\partial K} \cdot \frac{1}{K} = 1 + i.$$

При моделировании производства банковская ставка принята 14 %.

Стационарные точки в виде вектора показателей макропроизводства приведены в таблице. Как следует из таблицы, при снижении доли возвращенной эксергии стационарная точка производства сдвигается в сторону уменьшения производительности системы.

Таблица

Оптимальные показатели энерготехнологического макропроизводства при различных долях возвращенной эксергии β

Показатели производства	$\beta = 0,1$	$\beta = 0$
Y	0,49	0,42
B	0,50	0,44
K	0,40	0,35
E	0,32	0,27
L	0,57	0,51
РЕК	1,14	1,14

Производственная функция на практике может быть представлена и в других известных формах, например, производственной функцией с постоянной эластичностью замещения факторов производства CES. Изложенный подход позволяет при наличии настроенной производственной функции провести моделирование стационарных макропроизводств для количественной оценки и сравнения их энергетической эффективности.

Для количественной оценки последствий принимаемых решений и оптимального управления экономикой необходимо использовать динамическую модель макропроизводства. В качестве базовой концеп-

туальной модели развития экономики часто используют односекторную нелинейную макроэкономическую модель роста Солоу. Воспользуемся модификацией этой модели, приведенной в [2].

$$Y(t) = F[K(t), L(t)], \\ Y(t) = I(t) + C(t), \\ \frac{dK(t)}{dt} = -\mu \cdot K(t) - C(t) + Y(t), \\ \frac{dL(t)}{dt} = v \cdot L(t),$$

где $Y(t)$ – валовой внутренний продукт; $K(t)$ – основные производственные фонды; $L(t)$ – число занятых в производстве; $I(t)$ – инвестиции; $C(t)$ – фонд потребления.

Моделирование производится в пределах временного горизонта $t \in [0, T]$ с начальными условиями $K(0) = K_0, L(0) = L_0$. Модель позволяет в агрегированном виде изучать *распределение произведенного валового продукта между потреблением и инвестированием* (накоплением) при варьировании коэффициентом выбытия основных производственных фондов μ и темпом прироста занятых в производстве v .

Вместе с тем, данная модель не позволяет учесть обоснованность расходов, связанных с производственными процессами превращения энергии, которые непосредственно влияют на соотношение «потребление – накопление». Так, основную долю тепловой энергии, используемой в реальной экономике, традиционно получают путем сжигания добываемого углеводородного топлива. Термодинамическая необратимость, характеризующая любые реальные тепловые двигатели, в экономической системе проявляется в виде необратимых энергетических потерь.

Если уровень этих потерь не учитывать и без предварительной оценки возможностей их снижения автоматически включать в издержки производства, то это приводит к перманентному росту цен на углеводородное топливо. Последнее, в свою очередь, ведет к повышению цен на коммерческую продукцию либо к снижению ее экологической безопасности и, в конечном итоге, к негуманному блокированию социальной составляющей в развитии экономики.

Необходимо иметь в виду еще и тот факт, что, как правило, создание энерготехнологических и экологически безопасных систем требует больших инвестиционных вложений в разработку и внедрения специальных технических устройств и их комплексов с повышенной термодинамической эффективностью. Поэтому на практике такие системы банально считаются дорогостоящими и в должной мере не реализуются.

В этой связи прогнозирование развития макроэкономики с учетом термодинамической необратимости процессов должно сопровождаться поиском и количественной оценкой системных источников, увеличивающих инвестиционную составляющую ВВП в новации, определяющие научно-технический прогресс, но требующие больших первоначальных

затрат со значительными сроками окупаемости. Моделирование при этом является едва ли не единственным средством оперативного анализа.

Для дальнейшей конкретизации модели Солоу рассмотрим ее на уровне термодинамики. Представление экономики как термодинамической системы позволяет учесть наличие необратимости энергетических взаимодействий в реальных тепловых двигателях. Любая необратимость всегда связана с потерями эксергии тепла, т. е. с потерей его работоспособности. При этом стоимость эксергии целесообразно отождествить с коммерческой стоимостью электроэнергии. Количественное выражение для эксергии тепла E можно представить в виде:

$$E = G_0 \cdot q_0 \cdot \eta \cdot \eta_e, \quad (3)$$

где G_0 – валовой расход условного топлива; q_0 – теплотворная способность условного топлива; η – термодинамический КПД преобразования тепла в работу для идеального теплосилового двигателя; η_e – достигнутый в экономической системе эксергетический КПД на стадии производства электроэнергии.

Снижение потерь эксергии тепла в экономической системе можно рассматривать как генерацию в ней эксергии, ΔE . Генерацию эксергии будем учитывать аддитивно в производственной функции. Выражение для валового продукта в исходной модели Солоу при этом примет вид:

$$Y(t) = F[K(t), L(t)] + \Delta E.$$

При использовании тепла для целей теплофикации эксергия потребляемого тепла теряется полностью. Генерация эксергии в системе обеспечивается за счет внедрения в практику тепловых двигателей (тепловых насосов), способных осуществлять возврат в процессы теплофикации части рассеянного тепла окружающей среды. Таким образом, в экономической системе экономится топливо, которое в соответствии с (3) тождественно генерируемой эксергии.

При использовании тепловых насосов сгенерированная в системе эксергия описывается следующим уравнением:

$$\Delta E = G_0 \cdot q_0 \cdot \eta \cdot \eta_e \cdot \psi \cdot (\varepsilon - 1),$$

где ψ – доля тепловой энергии, потребляемая в тепловых насосах; ε – отопительный коэффициент. Введем в рассмотрение обобщенный показатель *термодинамической эффективности* использования тепловой энергии, получаемой в экономической системе для целей теплофикации, ω .

$$\omega = \eta \cdot \eta_e \cdot \psi \cdot (\varepsilon - 1).$$

Произведение $G_0 \cdot q_0$ представляет собой валовое производство тепловой энергии в экономической системе Q_T . С учетом сказанного модель генерируемой в системе эксергии представляется итоговым уравнением:

$$\Delta E = \omega \cdot Q_T.$$

Исходная модель Солоу (2) с учетом генерации эксергии в системе представляется в виде:

$$\begin{aligned} \omega &= \eta \cdot \eta_e \cdot \psi \cdot (\varepsilon - 1), \\ \Delta E &= \omega \cdot Q_T, \\ Y(t) &= F[K(t), L(t)] + \Delta E, \\ Y(t) &= I(t) + C(t), \\ \frac{dK(t)}{dt} &= -\mu \cdot K(t) - C(t) + Y(t), \\ \frac{dL(t)}{dt} &= \nu \cdot L(t). \end{aligned} \quad (4)$$

Обычно для удобства анализа динамики в рассмотрение вводят относительные переменные (в расчете на одного занятого в производстве):

$$\begin{aligned} y &= \frac{Y}{L} \quad \text{– валовой продукт в расчете на одного занятого,} \\ k &= \frac{K}{L} \quad \text{– фондовооруженность,} \\ c &= \frac{C}{L} \quad \text{– непроизводственное потребление на одного занятого.} \end{aligned}$$

В рассматриваемом случае добавляется еще одна удельная переменная – производство тепла на одного занятого q :

$$q = \frac{Q_T}{L}.$$

С учетом поправки на генерацию эксергии производственная функция в новых переменных имеет вид:

$$y(t) = b \cdot k(t)^{\alpha_1} + \omega \cdot q.$$

Преобразуем дифференциальное уравнение для капитала модели (4), представив его в удельных переменных:

$$\frac{dk(t)}{dt} = -(\mu + \nu) \cdot k(t) - c(t) + b \cdot k(t)^{\alpha_1} + \omega \cdot q.$$

Для оценки распределения произведенного валового продукта между потреблением и инвестированием (накоплением) традиционно используют такие

показатели как *норма накопления* $s = \frac{I}{Y}$ и *норма потребления* $u = \frac{C}{Y}$. Выразим удельное потребление $c(t)$ через накопления

$$c(t) = (1 - s) \cdot (b \cdot k(t)^{\alpha_1} + \omega \cdot q).$$

Окончательно рабочая модель, описывающая процесс развития экономики с учетом генерации эксергии в системе, имеет вид:

$$\omega = \eta \cdot \eta_e \cdot \psi \cdot (\varepsilon - 1),$$

$$\begin{aligned}\frac{dk(t)}{dt} &= -(\mu + \nu) \cdot k(t) + s \cdot (b \cdot k(t)^{\alpha_1} + \omega \cdot q), \\ L(t) &= L(0) \cdot \exp(\nu \cdot t), \\ Q_T &= L(t) \cdot q, \\ \Delta E &= \omega \cdot Q_T, \\ K(t) &= k(t) \cdot L(t), \\ Y(t) &= (b \cdot k(t)^{\alpha_1} + \omega \cdot q) \cdot L(t), \\ I(t) &= s \cdot Y(t), \\ C(t) &= (1 - s) \cdot Y(t).\end{aligned}\quad (5)$$

Переменные Y, K, L, I, C, Q_T в модели (5) являются параметрами состояния системы, характеризующие уровень экономики в текущий момент времени t . Фазовой переменной, определяющей траекторию развития экономики, является фондовооруженность $k(t)$. В качестве параметра управления системой принята норма накопления S .

Для примера проведено моделирование стационарного развития условной экономики для двух вариантов: без генерации эксергии в системе и с генерацией эксергии в системе. Результаты моделирования динамики параметров состояния Y, I и C в условных единицах представлены на рисунке.

Из сравнения совмещенных на рисунке графиков следует, что при реализации генерации эксергии в экономической системе ее развитие при прочих равных условиях происходит на более высоком уровне как по потреблению C , так и по накоплению I .

Выводы

Изложенное в статье можно обобщить в виде следующих выводов и рекомендаций:

1. Для уточнения оценки адекватности моделей (1) и (5) требуется внедрение в практику эксергии как технико-экономического параметра анализа и набор соответствующей статистики.
2. Представление макропроизводства производственной функцией (1) с включением в нее эксергии потребляемой тепловой энергии позволяет количественно оценивать и сравнивать энергетическую эффективность экономических систем.

УДК 004.89

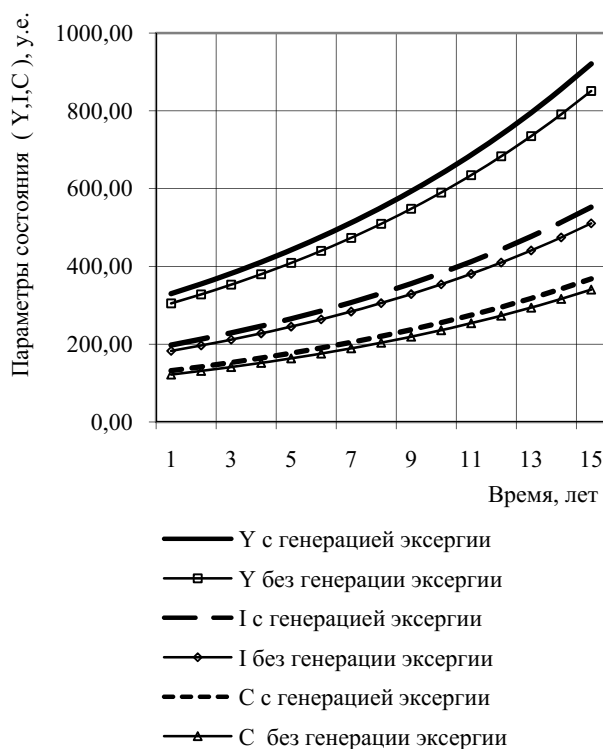


Рисунок. Траектории стационарного развития экономики

Разработанную модель динамики макропроизводства (5) предлагается использовать в качестве инструмента для оперативной количественной оценки последствий внедрения в экономическую систему энергосберегающих тепловых насосов.

Литература

1. Андреев, А. С. К вопросу выбора эколого-экономического показателя эффективности энергопотребляющих систем / А. С. Андреев, Н. Н. Силицын // Ученые записки Череповецкого государственного университета. — 2011. — №1. — С. 80–81.
2. Колмаев, В. А. Экономико-математическое моделирование. Моделирование макроэкономических процессов и систем / В. А. Колмаев. — М., 2005.

С. В. Ендияров
ОАО «Уралмашзавод»,
С. Ю. Петрушенко
ООО «S.Yu.E» (г. Екатеринбург)

КАЧЕСТВЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МЕТОДОВ СТАБИЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ СРЕДСТВ ВОЗДУШНОЙ РАЗВЕДКИ

В статье проводится качественное исследование методов стабилизации изображений — необходимость, в которой определяются требования к функциям, реализуемым современными программно-аналитическими комплексами для средств воздушной разведки. Такие системы, как правило, должны выполнять функции обнаружения, распознавания движущиеся объекты их последующее сопровождение, а также оценку поведения этих объектов в динамике.