

MPRA

Munich Personal RePEc Archive

Bazhanov, Andrei
Far Eastern National University

08. August 2005

Online at <http://mpra.ub.uni-muenchen.de/1309/>
MPRA Paper No. 1309, posted 07. November 2007 / 01:40

А.В.БАЖАНОВ

Вариационные принципы моделирования в ресурсной экономике

Предлагается методика построения модели исчерпания невозобновляемых ресурсов на основе предположения о выполнении вариационного принципа. Исследуется адекватность модели относительно данных мировой добычи нефти с 1859 по 2005 г. и возможность ее использования при решении задач прогнозирования (в том числе исчерпания нефти). Обсуждается возможность реализации траектории исчерпания нефти, удовлетворяющей принципу равноправия поколений.

Проблемы влияния ограниченности ресурсов планеты на развитие цивилизации экономисты обсуждают со времен Ж.Кондорсе, Т.Мальтуса, А. Смита, Дж. Милла и Д. Рикардо. Многие современные модели роста используют уравнения, описывающие динамику извлечения истощаемых ресурсов (см., например, [3, 10, 17, 19, 24]). Началом отсчета в построении моделей исчерпания невозобновляемых ресурсов считается работа Хотеллинга [14], в которой оптимальная траектория добычи сырья определяется как решение задачи максимизации суммарной полезности, например, прибыли от продажи ресурса, в течение некоторого периода. Теория Хотеллинга и в настоящее время используется как мощный инструмент для анализа задач исчерпания

невозобновляемых ресурсов (см., например, [12, 18, 23]). Неточности и усовершенствования основной модели Хотеллинга, включающие такие факторы как открытие новых месторождений и технологический прогресс можно найти в [18]. Исследования автора по данным за 1968 – 1995 годы по 11 видам ресурсов позволили сделать вывод о том, что «несмотря на то, что модели, которые включают эти другие факторы, улучшили эмпирические качества модели Хотеллинга, они не смогли полностью примирить экономическую теорию невозобновляемых ресурсов с наблюдаемыми данными [18, с. 2102]». На несовершенство модели Хотеллинга указывают и российские авторы [3].

Кроме вопросов адекватности модели Хотеллинга есть и сомнения в правомерности применения утилитарного критерия для распределения невозобновляемых ресурсов между поколениями. Ведь в принципе, максимум такого критерия может быть достигнут, если ресурс будет исчерпан, например, за 10 лет. Будет ли это справедливым распределением с точки зрения будущих поколений? И этично ли занижать полезность ресурса, который мог бы принадлежать нашим правнукам [21]?

В моделях, основанных на методике Хабберта [7, 15, 20. 2000.Vol. 98, N 16, pp. 63–76], темпы добычи описываются колоколообразными кривыми, которые затем используются для решения задач прогнозирования. Успех прогноза о падении темпов добычи нефти в США, начиная с 1970 года, привлек большое внимание к работе Хабберта, однако, модель не учитывает экономические и политические факторы, которые, собственно, и являются причинами того, что ресурс добывается или не добывается. В результате, при резких изменениях экономической и политической ситуации модельная траектория начинает существенно отличаться от реальных темпов добычи, как это было во времена нефтяных кризисов 1973 и 1979-1980 годов (см. рис. 3) или в России в период с 1988 по 2000 год.

Необходимость, случайность и принцип наименьшего действия

Предлагаемый (и не противоречащий существующим) в данной работе подход – построение модели в виде квадратичного сплайна¹ и исследование ее свойств – попытка по-иному взглянуть на причинно-следственные связи в области невозобновляемых ресурсов. Методика основана на предположении о том, что различные формы существования материи, и, в том числе социальная, имеют общие законы развития [6]. В частности, предполагается, что для происходящих изменений выполняются некоторые вариационные принципы, из которых могут быть выведены законы изменения интересующих нас величин, подобно тому, как из принципа Гамильтона выводятся законы Ньютона и закон сохранения энергии в механике [4].

Изменения экономически значимого количества ресурса, могут быть как случайными, которые могут происходить, а могут не происходить, так и необходимыми, отражающими саму суть процесса, и происходящими обязательно. При построении модели важно отразить именно необходимые изменения, а случайные можно затем добавлять или не добавлять в зависимости от рассматриваемого сценария или требований к точности модели.

К необходимым изменениям ресурса относится постоянное уменьшение его количества со временем в силу использования в производстве. К случайным изменениям относятся скачкообразные увеличения запасов ресурса: а) за счет открытия новых месторождений; б) за счет переоценки уже имеющихся запасов.

В механике необходимым изменением падающего под действием гравитации тела является потеря высоты, но оно, аналогично количеству исчерпаемого ресурса, может временно замедлить свое падение или даже увеличить высоту над землей за счет случайных факторов (порывы ветра, восходящие потоки). Поскольку законы Ньютона вытекают из принципа Гамильтона или принципа наименьшего действия, то, пользуясь аналогией, запишем, следуя Лагранжу, вариационный принцип для системы независимых друг от друга ресурсов в форме

¹ Предлагаемая в работе модель в виде квадратичного сплайна – непрерывная функция, «склеенная» из кусочков парабол с разными коэффициентами.

Гамильтона. Затем проверим адекватность получившейся модели исчерпания ресурса на данных о мировой добыче нефти [9, 20].

С экономической точки зрения система невозобновляемых ресурсов однозначно описывается значениями величин этих ресурсов Q и скоростями их убывания, или темпами добычи с обратным знаком, $\dot{Q} = -Y$. Предположим, что изменения в системе действительно подчиняются аналогу принципа наименьшего действия. А именно, пусть система описывается некоторой функцией $L(Q, \dot{Q}, t)$, называемой действием, такой, что для малого промежутка времени $\Delta t = t_2 - t_1$ изменения в системе происходят так, что L минимизирует функционал суммарного (интегрального) действия на промежутке Δt .

Вид функции Лагранжа L может быть однозначно найден из необходимого условия Эйлера-Лагранжа с использованием условий $Q_1 = Q(t_1)$ и $\dot{Q}_1 = \dot{Q}(t_1)$, то есть задания (Q, \dot{Q}) достаточно для описания изменений в системе.

Пусть $Q \in R^1$ (только один ресурс), и пространство изменения количества ресурса изотропно и однородно, то есть при отсутствии причин изменения темпов добычи уменьшение и увеличение ресурса происходят по одним и тем же законам в любой момент времени. Тогда L не зависит явно от времени, от количества ресурса и от знака изменения ресурса, то есть $L(Q, \dot{Q}, t) = a\dot{Q}^2$, где $a > 0$ (в силу условия достижения минимума суммарного действия).

В более общем случае (при наличии причины, изменяющей темпы добычи ресурса) из методики Лагранжа следует, что L определяется не только с точностью до множителя, но и с точностью до прибавления к ней полной производной по времени функции от величины ресурса Q и времени t , то есть $L(Q, \dot{Q}, t) = a\dot{Q}^2 - U(Q, t)$. В механике L является разностью между кинетической и потенциальной энергиями. Слагаемое $U(Q, t)$ ассоциируется с силами, являющимися «причинами» изменения траектории движения тела или, для ресурса, изменения темпов добычи. Причем, эта причина существует, только если

$Q \neq 0$, то есть высота падающего тела не равна нулю или запас ресурса является экономически значимым.

Так как ресурсы могут добываться круглосуточно, а события, существенно изменяющие темпы добычи происходят лишь в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_n , в промежутках между которыми обобщенную причину можно считать постоянной, то $U(Q, t)$ на промежутках $[t_i, t_{i+1})$ можно считать независимой от времени. Тогда $\partial L / \partial t = 0$, и из полной производной L , используя условие Эйлера-Лагранжа, получим, что $\frac{dL}{dQ} - L = aQ^2 + U(Q) = E = const$ на промежутках $[t_i, t_{i+1})$, $i = \overline{1, n}$. В однородном силовом поле U является линейной функцией координат [4, с. 20] на каждом из промежутков $[t_i, t_{i+1})$. Тогда закон сохранения можно записать в виде

$$aQ^2 + \tilde{A}_i Q = E = const. \quad (1)$$

Джон Хартвик [13, с. 339] трактует потенциальную и кинетическую энергии как «излишки» (surpluses), подобно прибавочной прибыли производителя или излишкам потребителя в экономике, а функцию Лагранжа, или «действие», как чистый излишек (net surplus).

Решая дифференциальное уравнение (1), получаем

$$Q(t) = \frac{a_i t^2}{2} + b_i t + g_i, \quad (2)$$

где $t \in [t_i, t_{i+1})$, а a_i, b_i, g_i зависят от $A_i = \tilde{A}_i / a$. Зададим функции $Q^i(t)$:

$$Q^i(t) = \begin{cases} \frac{a_i t^2}{2} + b_i t + g_i, & t \in [t_i, t_{i+1}], \\ 0, & t \notin [t_i, t_{i+1}]. \end{cases} \quad (3)$$

Тогда закон изменения ресурса имеет вид квадратичного сплайна:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^n Q^i(t) \quad (4)$$

с условиями

$$Q^i(t_{i+1}) = Q^{i+1}(t_{i+1}) = Q_{i+1}, \quad i = \overline{1, n-1}, \quad Q^n(t_{n+1}) = Q_{n+1}. \quad (5)$$

Из выражений для a_i, b_i, g_i и условий (5) можно выразить A_i , $i = \overline{1, n}$:

$$A_i = 4 \frac{Q_i + Q_i(t_{i+1} - t_i) - Q_{i+1}}{(t_{i+1} - t_i)^2}. \quad (6)$$

Пользуясь разложением в ряд Тейлора квадратичной функции $Q(t)$ в узле t_{i+1} , получаем $A_i = -2\ddot{Q}_i = 2\ddot{Q}_i$, то есть, A_i пропорциональны ускорениям изменений

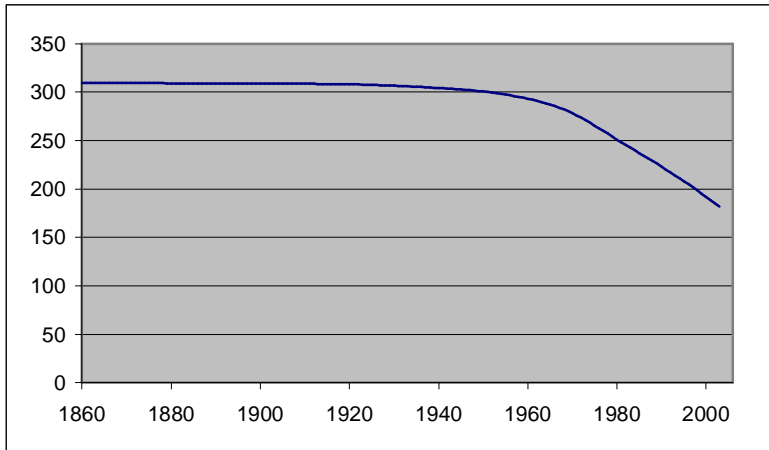


Рис. 1. Динамика количества оставшегося мирового извлекаемого запаса нефти (млрд. т.)

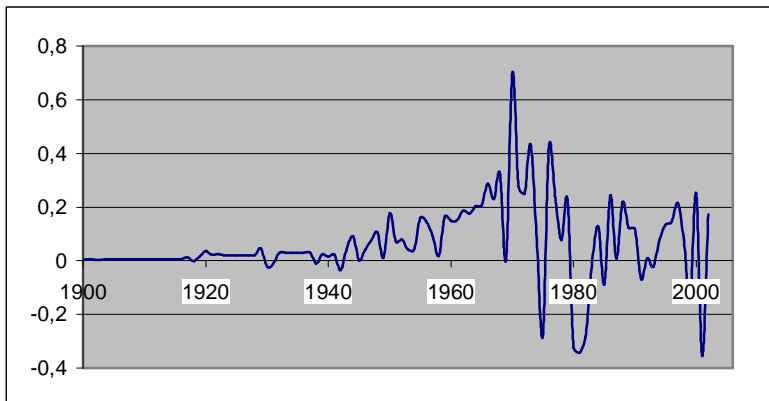


Рис. 2. Индекс конъюнктуры мировой нефтедобычи

будем называть значениями *индекса рыночной конъюнктуры ресурса*.

Графики изменения количества оставшегося извлекаемого мирового запаса нефти и индекса конъюнктуры мировой нефтедобычи приведены на рисунках 1 и 2. Из графиков видно, насколько сильна инерция у процесса мировой добычи нефти. Если при переходе к вариационному принципу использовалась аналогия с падающим телом, то из рисунков 1 и 2 видно, что даже воздействие на этот процесс самых значительных для человечества событий, таких как мировые войны, Великая Депрессия и нефтяное эмбарго 1973 года, можно скорее сравнить

количества ресурса Q . В механике ускорение материальной точки пропорционально прикладываемой к точке силе. Для процесса исчерпания ресурса этой обобщенной «силой» является совокупность экономических,

политических, геологических и других причин, определяющих конъюнктуру или рыночную ситуацию в добывающей отрасли. Поэтому величины A_i , отражающие характер изменения темпов добычи,

с влиянием порывов ветра на падающий кирпич. Даже самым влиятельным силам, включая картель ОПЕК, не удалось изменить траекторию истощения ресурса в короткие сроки.

Адекватность описания исторических данных

Для анализа адекватности модели (3)-(5) рассмотрим график темпов мировой добычи нефти (рис. 3) и разобьем его условно на три периода:

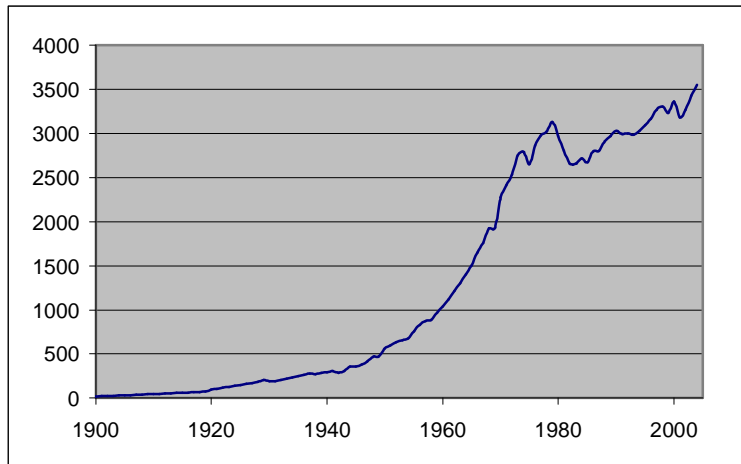


Рис. 3. Динамика темпов мировой добычи нефти

1. 1859 – 1973;
2. 1974 – 1983;
3. 1984 – настоящее время.

Первый период – время успехов в открытии месторождений и расширения рынка потребления нефти. Технический прогресс опирался на дешевое горючее и сырье для химической

промышленности, а нефтедобывающая отрасль ориентировалась на растущий спрос. Это время создания «углеводородного человека» подробно описано в книге Д. Ергина [2]. Поскольку инвестиции в «нефтяные» производства были одними из самых выгодных, то прибыль, полученная в этих отраслях, как правило, вкладывалась в расширение производства. Тогда (при количестве добываемой нефти в реальных ценах) рост темпов добычи $Y(t) = -Q(t)$ должен был увеличиваться по закону сложного процента, который при небольшом периоде инвестирования лучше всего приближается экспонентой. И действительно, темпы добычи в этот период почти удваивались каждые десять лет, а данные о добыче за 1880-1973 годы хорошо приближаются моделью $\ln Y = -122,943 + 0,066318t$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,995$. Заметим, что и исследователи Римского клуба [5] в своих расчетах до 1972 года использовали именно экспоненциальную модель.

Однако, с другой стороны, сложный процент – это частный случай линейного сплайна, интегрируя который, получаем квадратичный сплайн или модель (3)-(5) для закона зависимости количества ресурса от времени.

Второй период – время стабилизации нефтяных рынков, является следствием как кризисов 1973 и 1979-80 гг., так и геологических событий, связанных с истощением месторождений США. Сильные и нерегулярные изменения темпов добычи в этот период очень сложно описать одним аналитическим выражением, поскольку в разные моменты времени основной вклад в обобщенную причину изменения темпов добычи вносили совершенно разные факторы. При резком увеличении спроса главной силой был рынок. В периоды стабилизации спроса основными становились антирыночные силы – геологические, политические (программы энергетической безопасности) и экономические (спад производства). События второго периода качественно изменили рынок, и сложный процент перестал быть адекватной моделью.

Лучшей техникой описания подобных нерегулярных зависимостей является именно сплайн, и поэтому, в силу природы происходивших в это время процессов, только сплайн, то есть зависимость вида (4), может достаточно точно отражать моделируемые явления.

Основная черта *третьего периода* – сбалансированность сил, действующих на добывающую отрасль с преобладанием рынка над антирыночными тенденциями. То есть, все отрасли, связанные с нефтью, по-прежнему дают прибыль, и рынок растет. Но этот рост уже не имеет ничего общего с законом сложного процента. Добыча (или скорость убывания ресурса) увеличивается линейно. Регрессионная модель по данным о добыче в третьем периоде

$$Y_{\text{reg}} = 36,2636t - 69224,78 \quad (7)$$

(коэффициент детерминации $R^2 = 0,916$), почти совпадает с зависимостью, которая получается из вариационного принципа:

$$Y = 37,3072t - 71328,9 \quad (8)$$

($R^2 = 0,905$). Соответственно, количество ресурса меняется по закону:

$$Q(t) = -18,65359t^2 + 71328,9t - 67851423,0, \quad (9)$$

а модель, полученная интегрированием (7) с определением константы из данных о мировых запасах нефти на конец 2004 г. [20. 2004, Vol. 102, N 47, p. 22, 23],

$$Q_{\text{reg}}(t) = -18,1318t^2 + 69224,78t - 65730338,4. \quad (10)$$

Поскольку модель (3)-(5), выведенная из предположения о выполнении вариационного принципа, не противоречит имеющимся историческим данным о мировой добыче нефти, то интересно исследовать ее эффективность при решении различных видов задач прогнозирования и получить варианты прогнозов с ее помощью.

Использование сплайновой модели при прогнозировании в задачах позитивного анализа

Одним из простейших способов прогнозирования является экстраполяция устойчивых тенденций. Так, в предположении сохранения тенденции последних 20 лет, по модели (9) время t^* окончания ресурса, определяется как $t^* \approx 2042,30$ или середина апреля 2042 г., а регрессионная модель (10) дает $t_{\text{reg}}^* \approx 2041,64$, то есть, погрешность составляет чуть более полугода.

По модели (9) при окончании ресурса темпы добычи будут $-\dot{Q}(2042,3) = Y = 5,046$ млрд.т./год. Тогда величина A_T в последующий период, длиной, например, в год, определяется как $A_T = 4(-5,046) = -20,185$. Подобно тому, как в механике ускорение тела позволяет найти силу воздействия на него, так и величина индекса конъюнктуры позволяет оценить степень кризиса, связанного с исчезновением экономически значимого ресурса. Для сравнения можно упомянуть, что при самом сильном в истории отрицательном воздействии на добычу (иранский кризис) величина индекса была $A_{1981} = -0,315$, во время Второй мировой войны $A_{1942} = -0,034$ и для Великой Депрессии $A_{1930} = -0,022$. Конечно, описать кризис одним числом невозможно, и значение индекса является скорее эмоциональной, чем количественной оценкой того, что будет происходить, когда

закончится ресурс, от которого зависит любое предприятие и, следовательно, каждый человек на планете.

Однако, ресурс не может закончиться мгновенно. Неизбежно наступит момент, когда растущий спрос невозможно будет удовлетворить за счет более интенсивной эксплуатации истощающихся месторождений, что приведет к росту цены ресурса, инфляции и спаду производства. Рассмотрим возможности модели для решения задач прогнозирования, предусматривающих сценарии постепенного снижения темпов добычи. Пусть сценарий изменения темпов добычи задан в виде последовательностей индексов A_j и величин r_j – скачкообразных уменьшений мгновенных скоростей в узлах сплайна (в процентах). Тогда, обозначив Φ_j прогнозируемые величины мгновенных скоростей в узлах и q_j – количество оставшегося ресурса, получим для случая, когда все временные промежутки равны единице, например, году:

$$\begin{aligned}\Phi_j &= \tilde{\Phi}_{j_0} \cdot \prod_{k=j_0}^j (1-r_k) - \frac{1}{2} \sum_{k=j_0}^{j-1} A_k \prod_{l=k+1}^j (1-r_l), \quad j = \overline{j_0+1, J}, \\ q_j &= q_{j_0} + \tilde{\Phi}_{j_0} \sum_{s=j_0}^{j-1} \prod_{k=j_0}^s (1-r_k) - \frac{1}{2} \sum_{s=j_0+1}^{j-1} \sum_{k=j_0}^{s-1} A_k \prod_{l=k+1}^s (1-r_l) - 4 \sum_{s=j_0}^{j-1} A_s, \quad (11)\end{aligned}$$

где j_0 – год начала снижения темпов, J – последний год прогнозного периода.

Если предположить, что все $A_j \equiv A$ и $r_j \equiv r$, то (11) имеет более простой вид:

$$\begin{aligned}q_j &= (1-r)^{j-j_0} \left[- \left(\frac{1}{r} - 1 \right) \left(\tilde{\Phi}_{j_0} + \frac{A}{2r} \right) \right] + (j-j_0) \left[-A \left(4 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} - 1 \right) \right) \right] + \\ &+ q_{j_0} + \left(\frac{1}{r} - 1 \right) \left(\tilde{\Phi}_{j_0} + \frac{A}{2r} \right)\end{aligned} \quad (12)$$

Формула (12) позволяет прогнозировать значение величины оставшегося экономически значимого запаса в любой год $j > j_0$. Кроме того, можно оценить время окончания ресурса. Для этого положим $q_j = 0$ и разделим (12) на множитель при $(1-r)^{j-j_0}$, который не равен нулю, так как $r \ll 1$:

$$a^{j-j_0} = b(j-j_0) + c, \quad (13)$$

$$\text{где } a = 1 - r, \quad b = -\frac{A \left[4 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} - 1 \right) \right]}{\left(\frac{1}{r} - 1 \right) \left(\tilde{q}_{j_0} + \frac{A}{2r} \right)}, \quad c = \frac{q_{j_0}}{\left(\frac{1}{r} - 1 \right) \left(\tilde{q}_{j_0} + \frac{A}{2r} \right)} + 1.$$

В качестве примера предположим, что мировая добыча начнет уменьшаться с 2030 года примерно так, как это происходило в России, начиная с 1988 года (средний годовой индекс $A \approx -0,05$ и $r \approx 0,02$). Тогда мировой запас нефти закончится в 2047 году при темпах добычи $-Q_{2047} \approx 2,583$ млрд.т./год. Следующий за этим кризис будет иметь индекс $A_T = 4Q_T \approx -10,33$.

Можно поставить задачу о том, с какого года должны снижаться темпы добычи с заданными A и r для того, чтобы в момент окончания ресурса скорость добычи стала нулевой, то есть, зависимость от нефти исчезла бы постепенно. Для этого нужно решить систему уравнений, состоящую из равенства (12) с $q = 0$, уравнения $\tilde{q} = 0$, (условие независимости от ресурса) и соотношений, связывающих величины q_{j_0} и \tilde{q}_{j_0} с моментом времени t_0 (соответствующего номеру года j_0) согласно квадратичной модели вида (2) последнего промежутка времени, для которого имеются данные о добыче. Обозначив $x = j - j_0$, получим систему четырех уравнений относительно t_0 , x , q_{j_0} и \tilde{q}_{j_0} , из которой можно найти

$$t_0 = \left[A \left(z - \frac{1}{2r} \right) - b \right] / a, \quad \text{где } z \text{ является бóльшим корнем уравнения}$$

$p_3 \ln z = p_2 z^2 + p_1 z + p_0$, коэффициенты которого задаются следующим образом

$$p_3 = -\left[4 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} - 1 \right) \right] / \ln(1 - r), \quad p_2 = \frac{A}{2a},$$

$$p_1 = \frac{1}{r} - \frac{A}{2ar} - 1 = \frac{1}{r}(1 - p_2) - 1, \quad p_0 = -p_3 \left(1 - \ln \left\{ \frac{p_3 r}{1 - r} \right\} \right) - \frac{b^2}{2aA} + \frac{A}{8ar^2} + \frac{g}{A}.$$

Если рассмотреть сценарий близкий к российскому 1988-2000 г.г. с $A \equiv -0,05$ и $r \equiv 0,02$, то получим, что для того, чтобы темпы стали нулевыми к моменту окончания ресурса, их снижение должно начаться с $t_0 \approx 2020,52$ или, примерно, с

июля 2020 года. Но, как известно, в России это был период сильнейшего кризиса, который имел непосредственное влияние на добычу нефти. Если же рассмотреть сценарий более «мягкого» и, соответственно, более продолжительного кризиса, например, с $A \equiv -0,02$ и $r \equiv 0,01$, то окажется, что темпы добычи должны были начать снижаться еще с 2000 года. Это означает, что при таком сценарии полностью избавиться от нефтяной зависимости в течение периода исчерпания экономически значимого запаса не удастся, и можно лишь пытаться «смягчить» последующий за моментом исчерпания кризис.

Задачи прогнозирования и принцип равноправия поколений

Свободный рынок неоднократно доказывал свою несостоятельность в решении важнейших проблем (кризисы перепроизводства, загрязнение окружающей среды), поэтому возникают задачи нормативного анализа о построении оптимальной траектории исчерпания ресурса. Так, например, в [11, 22, 24] оптимальная траектория исчерпания ресурса определяется исходя из принципа равноправия поколений, вытекающего из применения максиминного правила Ролза (см. русский перевод [8]) к задаче о справедливом распределении ресурсов между поколениями. Согласно правилу Хартвика [11], постоянный во времени уровень потребления (в расчете на душу населения) $C(t)$ достигается путем инвестирования прибыли (ренты), полученной от невозобновляемого ресурса в капитал, производящий то же самое количество товаров и услуг при уменьшающемся количестве ресурса.

В модели предполагается, что ресурс, как и другие факторы производства в функции Кобба-Дугласа, является существенным для экономики. Поэтому запас ресурса не должен обнуляться, что и достигается за счет его асимптотического приближения к нулю. Траектория асимптотического убывания определяется из условия известных темпов добычи в начальный момент времени $Y(t_0) = -\dot{Q}(t_0) = Y_0$ и требования о расходовании конечного запаса ресурса Q_0 в течение бесконечного периода времени $Q_0 = \int_{t_0}^{\infty} Y(t) dt$. Этим условиям может удовлетворять любая кривая, проходящая через точку (t_0, Y_0) , площадь под

которой на интервале $[t_0, \infty)$ равна Q_0 . Важно то, что в силу предположения о существенности нефти для экономики, для устойчивого экономического развития необходимо (но не достаточно) чтобы эти кривые асимптотически стремились к нулю, что, пока, противоречит мировой практике нефтедобычи (рис. 3).

Если предположить, что нашлись бы политические и экономические силы, способные реализовать траекторию убывания темпов добычи, например в виде $-Q_0 e^{-bt}$, где $b = Q_0 / Q_0$ (или, точнее, в виде убывающего сложного процента), начиная с 2005 г., где $t = (\text{номер года} - 2005)$, то темпы должны были бы снижаться в два раза примерно каждые 30 лет. При этом значения индекса конъюнктуры в течение ближайших 15 лет изменялись бы примерно от $A_{2004} \approx -0,15$ до $A_{2020} \approx -0,106$. Близкие по модулю (но положительные) значения индекса были с начала 50-х до середины 60-х годов XX века, в период роста рынков потребления нефти по закону сложного процента.

Если говорить о практических механизмах реализации убывающей траектории, то, как показывает предыдущий анализ, основными силами, влияющими на вид кривой исчерпания ресурса, являются геологические, политические факторы и рынок потребления нефти. Поэтому, для того, чтобы выйти на асимптотически убывающую траекторию без экономического кризиса, связанного с дефицитом ресурса, нужно создать систему развития альтернативного, «антинефтяного рынка», в стоимость товаров которого не будут включены расходы на нефтепродукты. Если такой рынок будет действительно расти по закону сложного процента, то можно добиваться того, что спрос на нефть будет убывать в соответствии с заданной программной траекторией. То есть, если согласно правилу Хартвика направлять ресурсную ренту на развитие капитала в виде технологий, не использующих нефть, то увеличение рынка таких товаров будет вытеснять «нефтяные» товары и реализовывать убывающую траекторию для темпов добычи нефти. Стимулирование исследований, субсидирование «антинефтяных» производств приблизит точки вытеснения нефтепродуктов возобновляемыми заменителями.

Продолжая сравнение периодических движений в механике с устойчивостью в экономике, следуя [13], можно сказать, что аналогом механического трения является «диссипация» природных ресурсов в экономике. Так, по данным Энергетического Информационного Агентства США [16, табл. 3] больше половины нефти в мире сгорает в двигателях транспортных средств, и, кроме того, нефтепродукты сжигаются в обогревательных системах и электростанциях, то есть эта часть ресурса теряется для дальнейшего производства. Предположим,

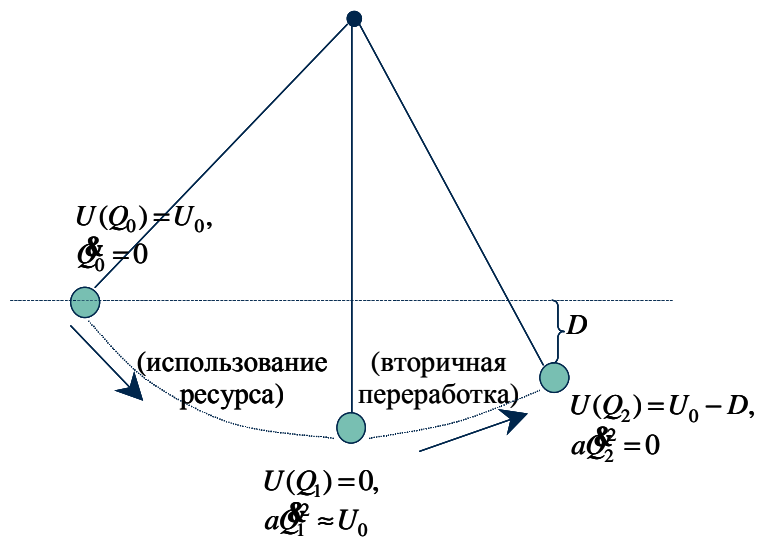


Рис. 4. Маятниковая модель использования невозобновляемого ресурса

что нефть, подобно металлам, использовалась бы только в производствах, допускающих вторичную переработку. Тогда такое производство можно представить в виде периодического движения, например, математического маятника (Рис. 4), где начальный прямой ход соответствует использованию

стартовой «потенциальной энергии» ресурса, добытого из земли. Прибыль вкладывается в воспроизводимый, в том числе, человеческий капитал (кинетическая энергия), с помощью которого организуется вторичная переработка (восстановление потенциальной энергии) – обратный ход маятника.

В реальности такие процессы сопровождаются неизбежными (но меньшими, чем при сжигании) потерями ресурса – «диссипацией» $D(t)$. И тогда условием консервативности данной системы (устойчивого производства) является равенство $\int_{t_0}^{\infty} D(t) dt = \int_{t_0}^{\infty} Y(t) dt = Q_0$, то есть, экономически значимого ресурса в земле Q_0 должно хватить на бесконечный период времени для компенсации потерь ресурса в производстве. При этом, в силу конечности Q_0 , функция $D(t)$

соответствует использованию

должна асимптотически стремиться к нулю за счет совершенствования технологий, уменьшающих потери ресурса.

Остаются проблемы, во-первых, межгосударственных согласований шагов в направлении внедрений «возобновляемых» технологий, поскольку переход только одной страны к прогрессивному, но более дорогому способу производства уменьшит конкурентоспособность ее продукции; а во-вторых, задача определения и перераспределения природной ренты. О сложности решения последней проблемы написано, например, в работах В.И. Данилова-Данильяна (см., например, [1]). Предполагается, что перераспределение ресурсной ренты должно быть совместной функцией различных составляющих финансово-экономической системы, а из-за высокой степени неоднородности ресурсов и, как следствие, невозможности предсказать влияние юридических и экономических решений в долгосрочной перспективе, законодательные изменения в этой области должны быть ограничены, во-первых, по силе воздействия на природно-ресурсную экономику, а во-вторых, законы не должны меняться слишком часто. Последнее условие эквивалентно существованию длительных периодов (не менее года [1]), в течение которых не должны радикально меняться условия функционирования рынка, являющегося одной из причин изменения темпов добычи. А это означает, что траектория исчерпания ресурса должна на разных промежутках определяться разными комбинациями причин, действующих на изменение темпов добычи или, другими словами, иметь вид сплайна.

Таким образом, показано, что модель исчерпания ресурсов в виде сплайна хорошо согласуется с данными мировой нефтедобычи и может использоваться в задачах прогнозирования. Причем, периоды, в течение которых $Q(t)$ можно считать параболой достаточно велики (от года до 20 лет). Практическое подтверждение гипотезы о выполнении принципа наименьшего действия в ресурсной экономике позволяет надеяться на успешное применение аналогов законов механики в данной области, с учетом принятых предположений и при корректной интерпретации соответствующих величин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов-Данильян В.И. Природная рента и управление использованием природных ресурсов. – http://www.opes.ru/analyze_doc.asp?d_no=47000 (май 2006).
2. Ергин Д. Добыча. Всемирная история борьбы за нефть, деньги и власть. М.: «ДеНово», 2001. 888 с.
3. Китайгородский В.И., Котов В.В. Моделирование экономического развития с учетом замещения невозобновляемых энергетических ресурсов. М.: Наука, 1990. 166 с.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. М.: Наука, 1973. 208 с.
5. Медоуз Д.Х., Медоуз Д.Л., Рандерс Й. За пределами роста. М.: Изд. группа «Прогресс», 1994. 304 с.
6. Моисеев Н.Н. Алгоритмы развития. М.: Наука, 1987. 304 с.
7. Поляков Г.А., Полякова Т.В. Модели и прогнозные оценки перспектив добычи нефти. М.: РОССПЭН, 2004. 152 с.
8. Ролз Дж. Теория справедливости. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1995. 536 с.
9. Щелкачев В.Н. Отечественная и мировая нефтедобыча. М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ Нефти и газа, 2001. 128 с.
10. Эйсмонт О.А. Экономический рост при непостоянных издержках добычи природных ресурсов // Экономика и математические методы. 1995. Т. 31, Вып. 3. С. 116 – 122.
11. Hartwick J.M. Intergenerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources // The American Economic Review. 1977. Vol. 67, N 5. P. 972 – 974.
12. Hartwick J.M., Long N.V., Tian H. On the Peaking of Consumption with Exhaustible Resources and Zero Net Investment // Environmental and Resource Economics. 2003. Vol. 24. P. 235 – 244.
13. Hartwick J.M. Sustaining periodic motion and maintaining capital in classical mechanics // Japan and the World Economy. 2004. Vol. 16. P. 337 – 358.

14. Hotelling H. The Economics of Exhaustible Resources // The Journal of Political Economy. 1931. Vol. 39, N 2. P. 137 – 175.
15. Hubbert M.K. Nuclear Energy and the Fossil Fuels // Amer. Petrol. Inst. Drilling & Production Practice. 1956. Proc. Spring Meeting, San Antonio, Texas. P.7 – 25.
16. International Energy Outlook 2005. – <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/enduse.html> (май 2006).
17. Kamien M., Schwartz N. Optimal Exhaustible Resource Depletion with Endogenous Technical Change // The Review of Economic Studies. 1978. Vol. 45, N 1. P. 179 – 196.
18. Krautkraemer J.A. Nonrenewable Resource Scarcity // Journal of Economic Literature. 1998. Vol. 36, N 4. P. 2065 – 2107.
19. Mitra T. Efficient Growth with Exhaustible Resources in Neoclassical Model // Journal of Economic Theory. 1978. Vol. 17, N 1. P. 114 – 129.
20. Oil & Gas Journal. 1930 – 2005.
21. Peterson F.M., Fisher A.C. The Exploitation of Extractive Resources A Survey // The Economic Journal. 1977. Vol. 87, N 348. P. 681 – 721.
22. Phelps E.S., Riley J.G. Rawlsian Growth: Dynamic Programming of Capital and Wealth for Intergeneration “Maximin” Justice // The Review of Economic Studies. 1978. Vol. 45, N 1. P. 103 – 120.
23. Solow R.M. Intergenerational Equity and Exhaustible Resources // The Review of Economic Studies. 1974. Vol. 41. Symposium on the Economics of Exhaustible Resources. P. 29 – 45.
24. Stiglitz J.E. Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths // The Review of Economic Studies. 1974. Vol. 41. Symposium on the Economics of Exhaustible Resources. P. 123 – 137.