

О.И. Никонов, проф., д-р физ.-мат. наук

Я.Е. Минуллин

ГОУ УГТУ-УПИ, Екатеринбург

## РАВНОВЕСНЫЕ МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИНФРАСТРУКТУР<sup>1</sup>

**Введение.** Настоящая работа продолжает исследования [1-3] по моделированию энергетических инфраструктур и посвящена экономико-математическому моделированию и анализу рынка природного газа. Особенности подобных рынков и их роль в энергетическом комплексе исследовались многими авторами. В отмеченных работах [1-3] была предложена и развита динамическая модель, сформулированная в терминах математической теории управления и теории игр. Разработанный в указанных работах подход основан на использовании классической модели рыночного механизма ценообразования, описываемой функцией типа Кобба-Дугласа. Апробация модели на данных развивающегося рынка природного газа Турции показала достаточную адекватность и применимость модели. Вместе с тем, использование разработанного инструментария для анализа иных энергетических инфраструктур, развивающихся в специфических, не вполне рыночных условиях, едва ли возможно без серьезной модификации. Сказанное в полной мере относится к рынку природного газа Китая, моделированию которого, в основном, и посвящена настоящая работа.

В работе рассматривается локально равновесная экономико-математическая модель, сочетающая использование рыночного механизма ценообразования с учетом прогнозных значений ключевых параметров. Апробация модели проведена на данных рынка природного газа Китая. Дальнейшее развитие полученных результатов ориентировано на создание инструмента поддержки принятия решений для менеджеров проектов по строительству и поставкам газа – удобного для пользователя программного продукта, позволяющего оценивать экономические перспективы оперирования на рынке природного газа, учитывать изменения финансовых показателей деятельности в зависимости от изменения основных экономических параметров.

В работе использованы элементы теории игр, линейной и нелинейной оптимизации, а также понятия и методы экономической теории. При моделировании учитывался опыт проведенных исследований – общий подход к формализации задачи в теоретико-игровых терминах и ряд элементов модели соответствующих положениям работ [1-3].

В заключительной части статьи представлены результаты симуляций с различными сценариями возможного развития рыночной конъюнктуры, проведенных с помощью программного продукта, являющегося компьютерной реализацией модели.

<sup>1</sup> Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 00-01-00369, 02-01-96419, МО Н00-3.2-2-217.

## 1. Рынок природного газа Китая

По прогнозам специалистов, Китай в ближайшие 10-15 лет станет одним из главных импортеров природного газа, что объясняется, в частности, следующими причинами:

- увеличивающееся потребление энергии;
- желание и необходимость перехода на более «чистые» виды энергии;
- ограниченные запасы природного газа в Китае.

В настоящее время основным источником энергии в Китае служит уголь, его потребление составляет 70 % от общего уровня энергоносителей, 21 % обеспечивает нефть и лишь 2 % приходится природный газ. Вследствие того, что уголь является наиболее загрязняющим атмосферу источником энергии, а индустриальные зоны сконцентрированы в основном на восточном побережье, выбросы в атмосферу попадают (среди прочих стран) в Японию и Южную Корею. Поэтому необходимость замены угля на менее загрязняющий вид сырья обусловлена, в частности, и давлением этих стран. Наконец, еще одним аргументом в пользу выбора природного газа является то обстоятельство, что газ является не только источником энергии, но и промышленным сырьем.

В последнее время были открыты новые месторождения газа на западе Китая. Подтверждением прогнозов об увеличении доли газа в промышленности может служить факт начала строительства трубопровода длиной 4500 км, который соединит группу месторождений на западе страны с индустриальным регионом с центром в Пекине. Однако суммарный разведанный запас, например, в 2020 году будет составлять лишь 50 %, а в 2030 – 35 % от прогнозируемого объема потребления [4]. В первое время спрос на газ будет удовлетворяться путем поставок сжиженного природного газа (LNG).

Таким образом, по прогнозам специалистов, в ближайшее время в Китае появится новый рынок природного газа, на который будут ориентироваться производители и поставщики в соседних странах, в том числе и в России.

Как уже отмечалось, основные зоны промышленного производства расположены на востоке Китая. Их можно сгруппировать в два региона: юго-восточный с центром в Шанхае и северо-восточный с центром в Пекине. Оставшиеся провинции попадают в западный регион, в котором, по прогнозам специалистов, спрос на газ будет значительно меньше. Таким образом, в Китае возникнет не один, а, по меньшей мере, три рынка со своими особенностями. Далее в работе будет рассматриваться рынок северо-восточного региона с характеризующими его данными.

## 2. Экономико-математическая модель. Основные предположения

В целях получения аналитических решений и упрощения теоретико-игровых построений число участников ограничим двумя игроками. Каждый игрок ассоциируется с менеджером (инвестором) проекта строительства газопровода, соответствующий проект и все его характеристики обозначаются индексом  $i$ ,  $i=1,2$ .

Время в модели,  $t$ , дискретно, шаг – 1 год (это объясняется нормами, принятыми в данной области, в частности, значения нормативов и прочие статистические данные определяются в расчете на 1 год).

Стоимость  $C_i$  строительства трубопровода фиксирована и определяется экспертным путем. Время строительства –  $\Delta t$  также фиксировано и определяется согласно нормативной продолжительности строительства:

$$\Delta t_i = t_i - t_i^0,$$

где  $t_i^0$  – момент начала строительства;  $t_i$  – момент коммерциализации проекта (пуска трубопровода).

Оперирование на рынке подразумевает управление объемом  $y_i$  поставок газа игрока в течение рассматриваемого временного промежутка.

**Механизм ценообразования.** В современной экономико-математической литературе при моделировании рыночных механизмов часто используются равновесные модели рыночного спроса. Наиболее распространенной является форма зависимости спроса от цены и дохода типа Кобба-Дугласа:

$$d(t) = A \cdot GDP^{e_g} \cdot p^{e_p}, \quad (2.1)$$

где  $d(t)$  – спрос на ресурс (в данном случае – газ);  $A$  – параметр масштабирования;  $GDP$  – ВВП страны (доход);  $p$  – цена на ресурс;  $e_g, e_p$  – коэффициенты эластичности спроса по ВВП и цене соответственно.

В соответствии с (2.1) и условием равновесия цена на газ моделируется следующим образом:

$$p(t) = \left( \frac{A \cdot GDP^{e_g}}{y(t)} \right)^{\frac{1}{e_p}}, \quad (2.2)$$

где  $y(t) = d(t)$  – предложение (объем поставок газа).

Однако особенности китайского рынка – слабая корреляция ВВП и спроса, трудности, связанные с получением статистических данных, и иные обстоятельства – вынуждают использовать иные формы зависимости.

В настоящей работе мы будем использовать локально равновесную модель, построенную на основе прогнозов изменения ключевых показателей. А именно, мы предполагаем, что заданная прогнозом функция спроса (далее  $d_0(t)$ ) и цены (далее  $p_0(t)$ ) в каждый момент времени  $t$  принимает значения равновесного спроса и цены при соответствующем значении  $e_p(t)$  эластичности спроса по цене.

Далее мы работаем в окрестности заданных равновесных значений  $d_0$  и  $p_0$ . Учитывая, что эластичность спроса по цене есть отношение относительного изменения спроса к относительному изменению цены (время фиксировано), имеем:

$$e = \frac{d - d_0}{\frac{d_0}{p - p_0} \cdot p_0} \quad (2.3)$$

Принимая во внимание, что  $e < 0$ , заменим  $e_p = -e$  и выразим  $d$  из (2.3):

$$d = d_0 \cdot \left( 1 - e_p \left( \frac{p}{p_0} - 1 \right) \right) \quad (2.4)$$

Приравнявая объем поставок газа  $y$  на рынок требуемому объему  $d$ , приходим к следующему выражению для цены:

$$p = \frac{p_0}{e_p} \cdot \left( 1 + e_p - \frac{y}{d_0} \right) \quad (2.5)$$

Зависимость (2.5) позволяет определить, какой будет цена на газ, если объем поставок на рынке будет равен  $y$  при сложившейся конъюнктуре, определяющей значениями  $d_0$ ,  $p_0$  и  $e_p$ , в любой момент времени в заданном интервале.

**Издержки поставщиков.** Издержки, как известно, подразделяются на два вида: постоянные и переменные. Постоянные издержки  $c_i^{fix}$  определяются расходами на эксплуатацию и амортизационными отчислениями (млрд. долл./1000 м<sup>3</sup>/год), переменные  $c_i^{var}$  расходами на добычу и транспортировку газа (млрд. долл./1000 м<sup>3</sup>). Совокупные удельные издержки определяем по формуле:

$$c_i = c_i^{var} + \frac{c_i^{fix} \cdot M_i}{y_i} \quad (2.6)$$

где  $i$  – индекс участника поставок на рынке;  $M_i$  – максимальная пропускная способность трубопровода  $I$ ;  $y_i$  – объем поставок газа участника  $i$ . Совокупные издержки при фиксированном объеме поставок  $y_i$  составят  $C_i = y_i c_i = c_i^{var} y_i + c_i^{fix} M_i$ .

**Ограничения.** В модели отражены два вида ограничений: ограничения участников и ограничения рынка. В первом случае это максимальная пропускная способность трубопровода. Предполагается, что игрок не может поставлять газ по трубопроводу в объеме, превосходящем заданную величину  $M_i$ . Таким образом, с учетом неотрицательности  $y_i$  имеем:

$$0 \leq y_i \leq M_i, \quad i=1,2. \quad (2.7)$$

Во втором случае речь идет об экономических ограничениях, которые физически могут быть нарушены. Основное ограничение данного типа, учитываемое в модели, состоит в том, что рыночная цена природного газа не может превышать величины  $p_{LNG}$  – цены на сжиженный природный газ, в противном

случае потребители будут покупать последний, а газ на рынке приобретать не будут.

Таким образом, второе ограничение имеет вид:

$$\frac{p_0}{e_p} \cdot \left( 1 + e_p - \frac{y}{d_0} \right) \leq p_{LNG}, \quad (2.8)$$

где  $y=y_1+y_2$  - общий объем поставок газа на рынке.

### 3. Определение плана поставок газа

Будем предполагать, что в каждый момент времени игроки управляют объемом поставок таким образом, чтобы получить максимальную выгоду

$$\pi_i(y, y_i) \xrightarrow{y_i} \max. \quad (3.1)$$

Здесь  $\pi_i(y, y_i)$  - норма прибыли игрока  $i$  при общем объеме поставок  $y$  и поставках данного игрока объема  $y_i$ .

Явное выражение для величины  $\pi_i(y, y_i)$  можем получить как разность между доходом и издержками. С учетом (2.5) и (2.6) имеем:

$$\begin{aligned} \pi_i(y, y_i) &= [p(y) - c_i(y_i)]y_i = \\ &= -\frac{p_0}{e_p \cdot d_0} \cdot y_i^2 + \left( \frac{p_0}{e_p} + p_0 - c_i^{\text{var}} - \frac{p_0}{e_p \cdot d_0} \cdot y_{-i} \right) \cdot y_i - c_i^{\text{fix}} \cdot M_i, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где  $-i$  - индекс конкурента.

Оставляя в стороне тривиальный случай, когда игрок  $i$  оперирует на рынке один, рассмотрим вариант, когда на рынке оперируют два участника. В этом случае выбор объема поставок для каждого участника не столь очевиден, возникает игровая ситуация.

Используя терминологию теории игр, введем следующие понятия. Предполагая фиксированным момент времени  $t$  и прочие параметры задачи, стратегией игрока  $i$  будем называть выбор объема поставок газа. Выбор игроком  $i$  объема поставок с учетом стратегии игрока-конкурента  $-i$  будет называться ответом игрока  $i$ . Лучшим ответом игрока  $i$  будет называться решение оптимизационной задачи (3.1) при фиксированной стратегии игрока  $-i$ .

Фиксируя каждую из возможных стратегий игрока 2 и находя лучший ответ, игрок 1 может построить функцию лучших ответов  $y_1=y_1(y_2)$ . Таким же образом игрок 2 получает функцию лучших ответов  $y_2=y_2(y_1)$ . В данной задаче (без учета ограничений) эти функции линейны, их графики приведены на рис. 1, где по оси абсцисс отложен объем поставок игрока 1, по оси ординат - игрока 2.

Пусть графики функций  $y_1(y_2)$  и  $y_2(y_1)$  пересекаются в области, определяемой ограничениями (2.7)-(2.8). Тогда точка пересечения  $(y_1^*, y_2^*)$  обладает следующим свойством: стратегия  $y_1^*$  игрока 1 является лучшим ответом на фиксированную стратегию  $y_2^*$  игрока 2 и стратегия  $y_2^*$  игрока 2 является лучшим ответом на стратегию  $y_1^*$  игрока 1, то есть:

$$\begin{cases} y_1^* \in \{y_1 \mid \pi_1(y_1 + y_2^*, y_1) = \max_{y_1}\} \\ y_2^* \in \{y_2 \mid \pi_2(y_1^* + y_2, y_2) = \max_{y_2}\} \end{cases} \quad (3.3)$$

Это есть ни что иное, как определение равновесия по Нэшу. Если выполняется условие (3.3), оба игрока получают равновесную точку  $(y_1^*, y_2^*)$ , каждая координата которой представляет оптимальный уровень поставок, такой, что если один из игроков отклонится от стратегии  $y_i^*$ , он получит меньшую выгоду.

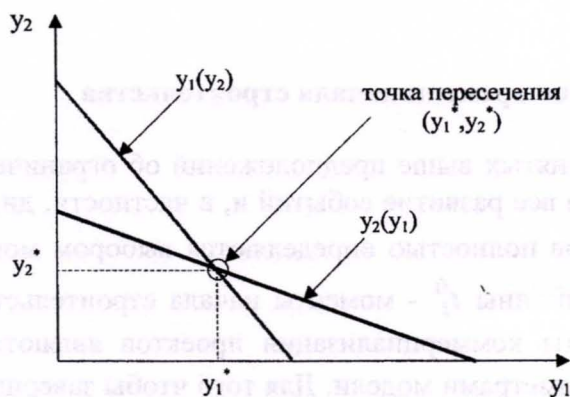


Рис. 1. Функции лучших ответов и равновесная точка

Координаты пересечения функций лучших ответов (без учета ограничений) находятся из решения уравнения  $y_1(y_2) = y_2(y_1)$ :

$$\begin{aligned} y_1^* &= \frac{4}{3}k_1 - \frac{2}{3}k_2, & k_1 &= \frac{d_0 + e_p \cdot d_0 - c_1^{\text{var}} \cdot \frac{e_p}{d_0}}{2}, \\ y_2^* &= \frac{4}{3}k_2 - \frac{2}{3}k_1, & k_2 &= \frac{d_0 + e_p \cdot d_0 - c_2^{\text{var}} \cdot \frac{e_p}{d_0}}{2}. \end{aligned} \quad (3.4)$$

С учетом ограничений (2.7) решение задачи выглядит следующим образом:

$$y_{i2} = \begin{cases} y_i^*, & (0 \leq y_i^* \leq M_i) \wedge (0 \leq y_{-i}^* \leq M_{-i}) \\ k_i - \frac{1}{2} \cdot M_{-i}, & (0 \leq y_i^* \leq M_i) \wedge (y_{-i}^* > M_{-i}) \\ M_i, & y_i^* > M_i \\ 0, & y_i^* < 0. \end{cases} \quad (3.5)$$

Подставляя оптимальное значение объема поставок газа, определенное по формуле (3.5), участник  $i$  получает максимальное значение прибыли при учете ограничений (2.7). Это значение будем обозначать символом  $b_{i2}$  и называть *нижней нормой дохода*.

В случае когда участник оперирует на рынке один, он получает верхнюю норму дохода, - величину  $b_{i1}$  - значение задачи (3.1) при  $y_{-i} = 0$ . Таким образом, с учетом времени коммерциализации конкурента норма доходности участника  $i$  выглядит следующим образом:

$$b_i(t, t_{-i}) = \begin{cases} b_{i1}, & t < t_{-i} \\ b_{i2}, & t \geq t_{-i}. \end{cases} \quad (3.6)$$

#### 4. Определение времени начала строительства

В рамках принятых выше предположений об ограничениях задачи и поведении участников все развитие событий и, в частности, динамика доходов от реализации проектов полностью определяются выбором моментов  $t_i^0$ ,  $i=1,2$ . Таким образом, величины  $t_i^0$  - моменты начала строительства или, что то же самое,  $t_i$  - моменты коммерциализации проектов являются единственными управляющими параметрами модели. Для того чтобы завершить постановку задачи, надлежит выбрать цель управления или, иными словами, критерий оптимальности принимаемых решений по выбору моментов  $t_i^0$ .

Известно, что критериями оценки инвестиционных проектов могут быть различные показатели эффективности: совокупный доход, получаемый от реализации проекта за определенный промежуток времени, время окупаемости и др. В настоящей работе принят следующий подход к определению критерия оптимальности.

Предполагается, что целью инвестора является *минимизация времени, пройденного от момента начала наблюдения до момента возврата инвестиций*. Моментом начала наблюдения может являться, например, текущий год. Типичный график зависимости прибыли проекта от времени представлен на рис. 2, где на оси абсцисс отмечены фигурирующие в данных построениях точки.

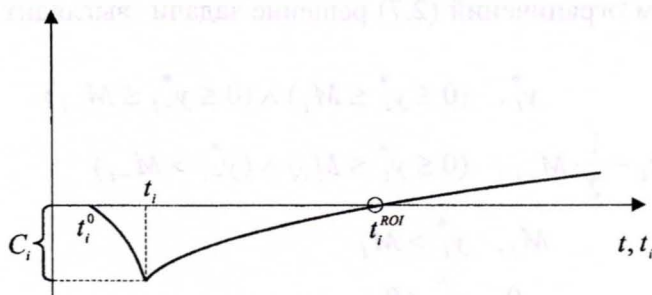


Рис. 2. Жизненный цикл проекта

Фиксируя время начала строительства конкурента и управляя своим временем начала строительства, участник  $i$  получает представление для точки возврата инвестиций  $t_i^{ROI}(t_i^0, t_{-i}^0)$ :

$$t_i^{ROI}(t_i^0, t_{-i}^0) = \{s \mid \int_{t_i^0 + \Delta t}^{\infty} e^{-\lambda \cdot (t + \Delta t)} \cdot b_i(t, t_{-i}^0 + \Delta t) dt - C_i = 0\}, \quad (4.1)$$

где  $e^{-\lambda \cdot (t + \Delta t)}$  - дисконтирующий коэффициент, учитывающий временную стоимость денег, начиная с момента строительства.

Экономическая интерпретация точки возврата инвестиций в рамках данной задачи достаточно очевидна: это такой момент времени, когда интегральный доход, полученный от оперирования, начиная с момента коммерциализации, будет эквивалентен стоимости строительства трубопровода.

Аналитически критерий оптимальности, которым руководствуется участник  $i$  при принятии решений, определяется условием

$$[t_i^{ROI}(t_i^0, t_{-i}^0) - t_0] \xrightarrow{t_i^0} \min. \quad (4.2)$$

Учитывая тот факт, что условие оптимальности зависит от выбора стратегии конкурента, для обеспечения оптимальности решения для обоих участников следует выбирать те комбинации моментов начала строительства  $(t_1^{0*}, t_2^{0*})$ , которые доставляют решения задачи (4.2) для обоих участников одновременно:

$$\begin{cases} [t_1^{ROI}(t_1^0, t_2^0) - t_0] \xrightarrow{t_1^0} \min \\ [(t_2^{ROI}(t_1^0, t_2^0) - t_0)] \xrightarrow{t_2^0} \min \end{cases} \quad (4.3)$$

По терминологии теории игр такие пары моментов начала строительства являются равновесными по Нэшу решениями в игре двух лиц с указанными функциями выигрыша.

Для нахождения равновесных точек использовался разработанный численный алгоритм.

## 5. Апробация модели

Симуляции модели проводились на данных рынка северо-восточного региона Китая [4], по времени охватывающие период с 2002 по 2060 год. В качестве участников были выбраны проекты, осуществление которых, по мнению экспертов, наиболее вероятно – игрок 1: проект «Иркутск», месторождение Ковытка, игрок 2: проект «Сахалин», месторождение Сахалин. В качестве базового был принят сценарий развития рынка [4], отраженный в табл. 1.



Базовый вариант развития рынка природного газа  
северо-восточного региона Китая

Год	2000	2010	2015	2020	2025	2030
Спрос, млрд. м <sup>3</sup> /год	-	50	65	85	115	142
Производство, млрд. м <sup>3</sup> /год	-	5	5	5	4	3
Дефицит, млрд. м <sup>3</sup> /год		45	60	80	111	139
Цена, USD/1000м <sup>3</sup>	135	150	160	165	165	165
Цена LNG, USD/1000м <sup>3</sup>	145	155	160	165	170	175
Эластичность, электростанции	-	-0.7	-0.68	-0.65	-0.63	-0.6
Эластичность, промышл.	-	-0.4	-0.4	-0.35	-0.35	-0.3

Иллюстрация результатов симуляции по базовому сценарию приведена на рис. 3. Точки начала кривых соответствуют моментам начала строительства, точки минимума – моментам коммерциализации, точки пересечения с осью абсцисс – моментам возврата инвестиций проектов. На оси абсцисс отображено время в годах, прошедших с 2000 года, на оси ординат – объем прибыли проектов нарастающим итогом.

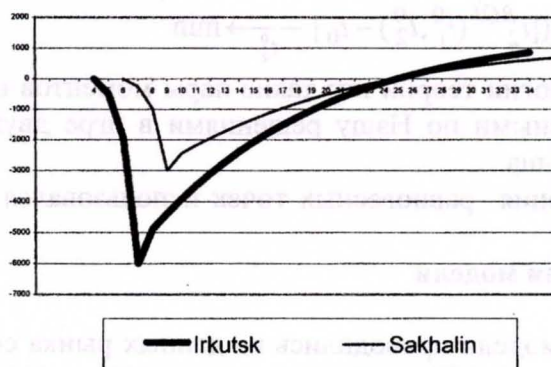


Рис. 3. Кривые финансовых потоков для проектов  
«Иркутск» и «Сахалин», сценарий - базовый

В качестве вариаций рассматривались различные сценария изменения рыночных показателей. «Меньший» – использовалась нижняя граница для динамики спроса в заданном интервале прогнозных значений, динамика цен на газ и LNG – как в базовом сценарии. «Импорт LNG» и «Цена LNG» – предполагалось, что фиксированную долю рынка будут занимать поставщики LNG, динамика поставок LNG определялась в соответствии с заданными сценариями. «8 участников» – спрос на рынке определялся как базовый спрос минус фикси-

рованная фракция рынка, занимаемая остальными 6 потенциальными поставщиками газа в северо-восточный регион.

Для всех случаев значение коэффициента эластичности в каждый момент времени определялось как средневзвешенное между промышленным сектором и электростанциями в соответствии с их долей. Численные результаты симуляций приведены в табл. 2.

Таблица 2

Численные результаты симуляций

Сценарии/показатели	Базовый	Меньший	Импорт LNG	Цена LNG	8 участников
Начало строительства, год	2004	2008	2012	2012	2011
	2006	2006	2006	2010	2018
Момент коммерциализации, год	2007	2011	2015	2015	2014
	2009	2009	2009	2013	2021
Возврат инвестиций, год	2025	2026	2028	2025	2029
	2025	2025	2025	2023	2030

**Заключение.** В работе рассмотрена локально равновесная экономико-математическая модель развития рынка природного газа, основанная на функции типа Кобба-Дугласа специального вида. Модель предусматривает сочетание рыночного механизма ценообразования с использованием прогнозных значений ключевых параметров. Апробация модели проведена на данных рынка природного газа Китая. Полученные результаты могут служить основой для создания инструмента поддержки принятия решений по строительству и поставкам газа для менеджеров проектов, позволяющего оценивать экономические перспективы оперирования на рынке природного газа, учитывать изменения финансовых показателей деятельности в зависимости от изменения основных макроэкономических параметров.

#### Библиографический список

1. Klaassen G., Roehrl R.A., Tarasyev A.M. The Great Caspian Pipeline Game, Proceedings of IIASA Workshops, December 2000, May 2001.
2. Klaassen G., Kryazhimskii A., Tarasyev A., 2001, Competition of Gas Pipeline projects: Game of Timing, IR-01-037, IIASA, Laxenburg, Austria.
3. On a Game of Gas Pipeline Projects Competition, ICM2002GTA Proceedings Volume, Quindao, China, Quindao Publishing House. / Klaassen, G., Kryazhimskii, A., Nikonov, O., Minullin, Y., 2002.
4. Кононов Ю.Д. Влияние цен на возможный и рациональный экспорт природного газа из России в страны АТР // Известия РАН. Энергетика. 2001. № 2.
5. Nikonov O., Minullin Ya. Competition of gas pipeline projects: Software, simulations, sensitivity analysis and generalized equilibrium // Intern.symp. on Dynamic games and appls (10; 2002; St. Petersburg, Russia)/ISDG; SPb SU:Proc. St. Petersburg, 2002. Vol.2. P.657-663. Bibliogr.: 11 ref.
6. Arrow K.J., Kurz M., 1970, Public Investment, the Rate of Return and Optimal Fiscal Policy, Baltimore, Johns Hopkins University Press.