

# ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПАНИЙ С УЧЕТОМ РЫНОЧНОГО ЦЕНООБРАЗОВАНИЯ

Акинфиев В. К.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

akinf.valery@yandex.ru

*Аннотация:* Разработана модель выбора инвестиций в развитие производственных мощностей компаний на конкурентных олигополистических рынках. Рассматривается два типа рынка: рынок с эластичным спросом (рынок Курно) и рынок с неэластичным спросом. В первом случае задача формулируется как совокупность взаимосвязанных квадратичных задач оптимизации. Для ее решения предложен метод сведения исходной задачи к решению смешанной задачи дополнительности (MCP). Во втором случае предложен метод решения задачи, основанный на совместном использовании многоагентного имитационного моделирования и анализа матричных игр. Приводятся результаты практического использования предлагаемого подхода для моделирования конкуренции, анализа и выбора инвестиционных стратегий нефтяных компаний с традиционным и нетрадиционным способом добычи нефти.

Ключевые слова: расширение производства, выбор инвестиций, олигополия, рынок нефти.

## Введение

Различным аспектам олигополистического поведения производственных компаний посвящено большое количество как зарубежной, так и российской литературы, включая исследование классических моделей (Курно, Бертран и др.). Как правило, в этих работах анализируются рыночные стратегии компаний, которые состоят в выборе либо объема производства (поставок продукции на рынок), либо в выборе цены поставки продукции. В этих работах мощность производства компании считается заданной и выступает в качестве ограничения на выбор объема производства.

Последние годы появились работы, в которых мощность производства также рассматривается в качестве управляемой переменной задачи. При этом приращение мощности производства, необходимое для производства оптимальных объемов предложения продукции на рынок, определяется выбором инвестиционных стратегий компании. Исследуемая в работе задача лежит в русле данного научного направления и развивает методы анализа рыночных стратегий компаний в области инвестиционных решений, направленных на повышение их конкурентных преимуществ (увеличение производственных мощностей и сокращения производственных издержек).

## 1 Постановка задачи

Рассматривается локальный рынок, на котором присутствует  $N$  производственных компаний ( $i = \overline{1, N}$ ), производящих однородную продукцию. Прогнозный горизонт равен  $T$  периодам,  $t = \overline{1, T}$ . Пусть  $D(t)$  – рыночный спрос на продукцию,  $P(t)$  – рыночная цена в период  $t$ ,  $S(t)$  – суммарное предложение (объем поставок продукции) со стороны компаний-производителей. В работе рассматривается два типа рынка:

**Рынок с эластичным спросом (рынок Курно).** Рыночная цена продукции описывается линейной обратной функцией спроса  $P(t) = a - b \cdot S(t)$ . Где  $a$  и  $b$  являются константами. В данной модели предполагается, что спрос на продукцию со стороны потребителей  $D(t)$  линейно зависит от ее рыночной цены, которая определяется предложением продукции со стороны компаний-производителей  $S(t)$ .

**Рынок с неэластичным спросом.** Для данного типа рынка характерно, что спрос на продукцию  $D(t)$  в краткосрочной перспективе не зависит от изменения ее рыночной цены и задается в модели экзогенно в виде некоторой наперед заданной функции времени  $D(t)$  или набора таких функций (сценариев).

Таким свойством обладают рынки сырьевых товаров (нефти, газа, металлургического угля и др.), которые находятся в начале производственной цепочки создания конечного продукта. При этом рыночная цена, которая формируется, как правило, с использованием биржевых механизмов, зависит в каждый период  $t$  от баланса спроса и предложения.

В отличие от рынка с эластичным спросом в каждый период времени рыночная цена формируется на основе соотношения спроса на продукцию  $D(t)$  и суммарного предложения со стороны компаний  $S(t)$ . Тогда:

$$(1) P(t) = P(0) \left( 1 + \gamma \frac{D(t) - S(t)}{D(t)} \right)$$

где  $P(0)$  – цена на начало прогнозного периода;  $\gamma$  – эластичность цены по величине превышения спроса над предложением. Предполагается, что  $D(0) = S(0)$ . В том случае если  $D(t) - S(t) \geq 0$  (возникает дефицит предложения на рынке), то рыночная цена растет, в противном случае – избыток предложения и, соответственно, цена падает.

Искомые переменные:  $x_i(t)$  – объем поставок (производство) продукции компанией  $i$ . Тогда суммарный объем поставок на рынок  $S(t) = x_i(t) + x_{-i}(t)$ , где  $x_{-i}(t)$  – суммарный объем поставок другими компаниями. Производственные издержки компании  $i$  зависят от объема производства и поставок продукции и равны  $c_i(t) \cdot x_i(t)$ , где  $c_i(t)$  – удельные производственные издержки.

Пусть рыночная цена продукции описывается линейной обратной функцией спроса, а именно:  $P(t) = a - b \cdot (x_i(t) + x_{-i}(t))$ . Где  $a$  и  $b$  являются константами.

Инвестиционная стратегия:  $y_i(t)$  – прирост производственной мощности компании  $i$  в период  $t$ , связанный с инвестициями в расширение производства. Тогда:  $I_i(t) = k_i \cdot y_i(t + \tau_i)$  – объем инвестиций в период  $t$ , необходимый для увеличения мощности производства, где  $\tau_i$  – временной лаг между периодом инвестирования и периодом прироста мощности производства.

Каждая компания стремится максимизировать свой суммарный чистый денежный поток за прогнозный период  $t = \overline{1, T}$ , который равен чистой прибыли, полученной за этот период, за вычетом средств, направленных на инвестиции. Задача выбора искомых переменных стратегического поведения компании  $i$  сводится к поиску решения следующей задачи оптимизации:

$$(2) \max_{x_i(t), y_i(t)} \sum_{t=1}^T (a - b(t) \cdot (x_i(t) + x_{-i}(t))) \cdot x_i(t) - c_i(t) \cdot x_i(t) - k_i \cdot y_i(t + \tau_i)$$

$$(3) x_i(t) \leq C_i(0) + \sum_{t=1}^t y_i(t) \quad \forall t$$

$$(4) y_i(t) \leq y_i^{\max}(t) \quad \forall t$$

$$(5) x_i(t) \geq 0, y_i(t) \geq 0 \quad \forall t$$

Где  $C_i(0)$  – мощность производства на начало прогнозного периода. Неравенство (3) задает технологическое ограничение на объем поставки (производства) продукции, а неравенство (4) – на прирост мощности производства. Здесь  $y_i^{\max}(t)$  – максимально возможный прирост мощности производства в период  $t$ . Заметим, что, как правило,  $y_i^{\max}(t)$  зависит также и от наличия финансовых ресурсов у компании, которое, в свою очередь, определяется величиной накопленного денежного потока компании к периоду  $t$ . При этом должно выполняться следующее условие:

$$(6) y_i(t + \tau) \leq \frac{1}{k_i} \sum_{t=1}^t (a - b(t) \cdot (x_i(t) + x_{-i}(t))) \cdot x_i(t) - c_i(t) \cdot x_i(t) - \sum_{t=1}^{t-1} k_i \cdot y_i(t + \tau_i)$$

Выполнение неравенства (6) гарантирует финансовую реализуемость инвестиционной стратегии компании, то есть все необходимые инвестиции для принятой стратегии расширения производства будут профинансированы компанией из накопленных денежных средств.

## 2 Методы решения

Совместное решение задач (2)-(6) для всех компаний  $i = \overline{1, N}$  сводится к выбору искомых переменных  $x_i(t)$  и  $y_i(t)$ , удовлетворяющих некоторым условиям равновесия. Для поиска

рыночного равновесия используется концепция равновесия Нэша. Решение называется равновесным, если ни одна из компаний не может увеличить выигрыш (2), изменив свое решение в одностороннем порядке, не вызвав при этом реакцию других игроков. Проблема поиска равновесных точек Нэша в такой постановке сводится к совместному решению совокупности нелинейных задач оптимизации (2)-(6) которая относится к классу задач математического программирования с равновесными ограничениями (МРЕС)).

Задача (2)-(5) для каждого агента  $i$  представляет собой квадратичную задачу оптимизации относительно переменных  $x_i(t)$  и линейную относительно переменных  $y_i$ . Вместо прямого использования целевой функции (2) в данном случае используется метод сведения задачи к смешанной задаче дополнителности (МСП), которая состоит из условий первого порядка для максимизации суммарного денежного потока каждой компании. Любое решение указанной выше задачи оптимизации должно удовлетворять условиям Каруша-Куна-Таккера (ККТ), записанным для каждой переменной. Назовем условия ККТ для переменных  $x_i(t)$  краткосрочными, а для переменных  $y_i$  долгосрочными. В искомой точке равновесия Нэша все условия ККТ должны выполняться одновременно. В данном случае существование и единственность решения гарантируется благодаря выпуклости целевых функций и ограничений задачи. Таким образом, полученные ККТ-условия необходимы и достаточны для существования решения. Запишем эти условия.

Краткосрочные условия ККТ должны выполняться для всех  $i, t$ :

$$0 \leq c_i - (a - b \cdot (x_i(t) + x_{-i}(t))) + \lambda_i(t) \perp x_i(t) \geq 0$$

$$0 \leq C_i(0) + y_i - x_i(t) \perp \lambda_i(t) \geq 0$$

Долгосрочные условия ККТ должны выполняться для всех  $i$ :

$$0 \leq k_i - \sum_{t \in T} \lambda_i(t) + \theta_i \perp y_i \geq 0$$

$$0 \leq y_i^{\max} - y_i \perp \theta_i \geq 0$$

Где под записью  $\perp$  понимается условие дополняющей нежёсткости, которое означает, что, по крайней мере, одно из неравенств в каждой строке условий ККТ должно быть выполнено как равенство,  $\lambda_i(t)$  и  $\theta_i$  являются множителями Лагранжа.

Чтобы решить исходную задачу (2)-(5) необходимо объединить все выписанные условия ККТ в одной МСП. Ее численное решение может быть получено, например, с использованием пакета PATH Solver, входящего в систему моделирования GAMS [3]. Алгоритмы решения задач в PATH Solver основаны на обобщении классического метода Ньютона и его модификациях.

Задача расширения производства для рынка с неэластичным спросом содержит существенные нелинейности, и ее решение не удастся свести к методам, рассмотренным выше. Предлагается использовать подход к решению задачи, основанный на методологии многоагентного имитационного моделирования. Модели данного типа позволяют описывать динамику систем посредством имитации поведения ее компонентов - агентов. Агенты взаимодействуют между собой, пользуясь ограниченным набором правил, которые определяют их индивидуальное поведение. Глобальное поведение возникает как результат деятельности многих агентов.

Метод решения задачи сводится к совместному использованию при моделировании моделей поведения агентов и модели рынка (рис 1). Модель агента  $i$  представляет собой сочетание модели выбора инвестиционных решений в зависимости от прогноза динамики спроса и предложения на рынке и производственно-финансовой модели, которая позволяет оценить финансовые результаты тех или иных вариантов его инвестиционных решений.

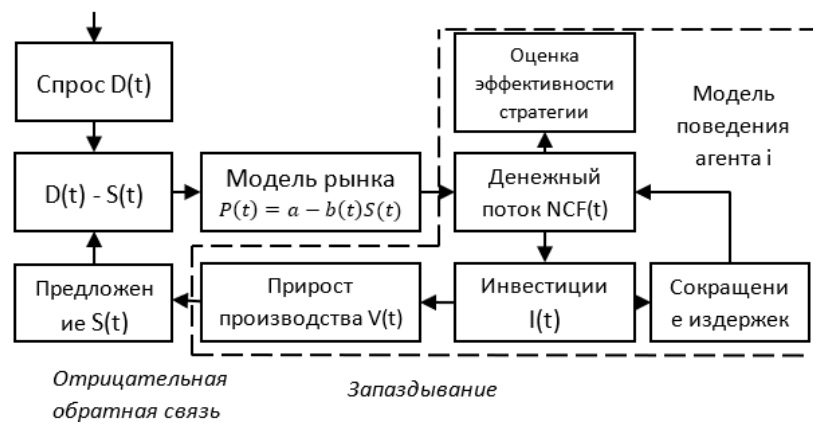


Рис. 1. Схема моделирования.

Предложенный подход успешно использован для решения ряда практических задач, в частности, задачи выбора инвестиционных стратегий металлургических компаний на рынке стального проката, а также задачи анализа стратегического поведения нефтяных компаний на глобальном рынке.

Рассматриваются результаты практического использования предлагаемого подхода для моделирования конкуренции, анализа и выбора инвестиционных стратегий нефтяных компаний с традиционным и нетрадиционным способом добычи нефти. Приведенные расчеты показывают, что во многих случаях существуют решения исследуемой задачи (равновесные точки Нэша) в чистых стратегиях, анализ которых позволяет сделать ряд интересных для практики выводов. В частности, на основе проведенных расчетов на реальных данных нефтяного рынка дан прогноз динамики нефтяных цен на среднесрочную перспективу.

### 3 Моделирование конкуренции на рынке нефти

В последние годы наблюдается существенная ценовая нестабильность на мировом нефтяном рынке. Шок на нефтяном рынке, который произошел во второй половине 2014 года, связан с появлением новых технологий добычи трудно извлекаемых залежей нефти (сланцевой нефти). Как следствие этого, страны с традиционной добычей нефти, для удержания собственной доли рынка, начали наращивать добычу и, соответственно, предложение на рынке. Это привело к переизбытку предложения и резкому падению цен на нефть. Падение нефтяных цен ниже определенного уровня делает нерентабельным инвестиции в добычу сланцевой нефти, что приводит к сокращению ее добычи, снижению давления на рынок и к повышению цен.

В свою очередь цена нефти на рынке существенно влияет на уровень рентабельности (прибыльности) нефтедобывающих компаний и, соответственно, на возможность инвестировать необходимые средства в развитие и поддержание уровня добычи нефти. В этой связи важной характеристикой, влияющей на поведение игроков на рынке при изменении его конъюнктуры, является показатель «Точка безубыточности». Точка безубыточности — это уровень цены нефти, при которой прибыль компаний с определенной технологией добычи, равна нулю.

Другим важным фактором является временной лаг между периодами инвестирования и прироста добычи. Причем компании с традиционной технологией добычи обладают в этом смысле большей инерционностью по сравнению с компаниями, добывающими сланцевую нефть. Все эти факторы объясняют большой интерес к исследованиям направленным на разработку различных количественных методов моделирования нефтяных рынков и анализа поведения его участников с учетом различных вариантов развития событий и сценариев [4-7].

Далее приводится описание основных элементов модели, позволяющей анализировать связь между выбором нефтедобывающими компаниями своих инвестиционных стратегий и рыночной ценой нефти, которая определяется соотношением спроса и предложения, и, возможными сценариями динамики мирового потребления нефти. Нас будет интересовать, прежде всего, исследование поведения цены на нефть в среднесрочной перспективе с учетом нового возмущающего фактора – появления на рынке нефтедобывающих компания, использующих технологию добычи сланцевой нефти.

Рассматривается рынок, на котором присутствует  $N$  агентов (производителей нефти).  $D(t)$  - динамика рыночного спроса на нефть.  $D(t)$  - экзогенная переменная, график, изменения которой задается заранее для различных внешних по отношению к модели макроэкономических сценариев.

В дальнейшем при моделировании зависимости цены нефти от динамики соотношения спроса и предложения на рынке будет использоваться формула (7), которая является модификацией формулы (1), учитывающей особенности рынка нефти. Формула (7) была предложена в [2] и позволяет учесть поведение участников рынка в зависимости от динамики соотношения спроса и предложения. В каждый период времени рыночная цена  $P(t)$  рассчитывается на основе соотношения спроса  $D(t)$  и суммарного предложения со стороны агентов  $S(t)$ .

$$(7) P(t) = P(0) \cdot (1 + \gamma(t) \cdot \left( \frac{\sum_{t-2}^t D(t) - \sum_{t-2}^t S(t)}{\sum_{t-2}^t D(t)} \right))$$

Значение параметра  $\gamma$  оценено в результате анализа реальных данных о динамике мировой добычи и потребления нефти и динамики ее цены за период с 1 кв. 2013 года по 4 кв. 2016 года. В модели при формировании прогнозной цены используется информация о динамике спроса и предложения за два предшествующих периода.

### 3.1 Модель поведения агентов

В соответствии с предложенной технологией анализа инвестиционных решений (рис. 1) определим основные элементы модели агента  $i$ .

**Производственная мощность агентов.** Производственная мощность агента рассчитывается с помощью рекуррентного соотношения  $S_i(t) = S_i(t-1) + V_i(t)$ ,  $t = \overline{1, T}$ . Где  $V_i(t)$  - изменение производственной мощности агента  $i$  в период  $t$ , который зависит от объема сделанных инвестиций в развитие производства.  $S_i(0)$  - начальная производственная мощность агента.

$$(8) V_i(t) = F_i(I_i(t - \tau_i) - I_i^*)$$

Предполагается, что  $F$  является выпуклой функцией. Экономический смысл  $F_i$  состоит в следующем: если объем инвестиций агента  $I_i(t - \tau_i)$  в период  $t$  равен  $I_i^*$  то прирост производственных мощностей агента  $V_i(t)$  в период  $t$  равен нулю.

**Инвестиционные стратегии агентов.** Пусть  $P_i^*$  - точка безубыточности агента  $i$ . Если в период  $t$  прибыль от операционной деятельности у агента  $i$  положительна, и он имеет возможность инвестировать в развитие производственных мощностей и, соответственно, в поддержание или увеличение уровня добычи нефти. В противном случае у агента возникают операционные убытки и, соответственно, инвестиции равны нулю. Таким образом, в каждый период времени возможность агента инвестировать в развитие производственных мощностей зависит от складывающейся на рынке цены на нефть.

$$(9) I_i(t) = \omega_i(P(t) - P_i^*)$$

Подставим выражение (9) в (8), получим:

$$(10) V_i(t) = F_i(\omega_i(P(t - \tau_i) - P_i^*) - I_i^*)$$

Заметим, что в выражении (10) переменной величиной является только  $P(t)$ , остальные параметры являются константами. Далее, заменим функции  $F_i$  и  $\omega_i$  на функцию  $\mu_i$ , которая является суперпозицией функций  $F_i$  и  $\omega_i$ , тогда:

$$(11) V_i(t) = \mu_i((P(t) - P_i^*), I_i^*, \tau_i)$$

Предлагаемый подход состоит в построении функциональной зависимости  $\mu_i$  на основе анализа рыночного поведения агентов, различий в технологии добычи нефти и некоторых допущений. Функциональная зависимость  $\mu_i$  описывает поведение агентов на рынке в зависимости от динамики цены нефти, которая, в свою очередь, зависит от выбора агентами инвестиционных стратегий и динамики мирового спроса на нефть  $P(t)$ .

Далее будем предполагать, что функциональная зависимость  $\mu_i$  задает максимально возможный прирост производственных мощностей агента в зависимости от  $P(t)$ . Агенты могут сознательно выбирать уровень своей инвестиционной активности по периодам  $t$  и, соответственно, прирост производственной мощности, и объем предложения нефти на рынке, прогнозируя влияние своего выбора на баланс спроса и предложения. Пусть параметр  $\alpha_i(t)$  характеризует

инвестиционную активность агента  $i$  ( $0 \leq \alpha_i(t) \leq 1$ ). Функции  $\alpha_i(t)$  являются параметрами модели, которые могут выбираться агентами.

$$(12) V_i(t) = \alpha_i(t) \mu_i((P(t) - P_i^*), I_i^*, \tau_i)$$

Если  $\alpha_i(t) = 1$ , то это означает, что агент выбирает максимально агрессивную инвестиционную стратегию и, наоборот, если  $\alpha_i(t) = 0$ , то инвестиции равны нулю.

Заметим, что в случае рынка типа дуополия множество возможных сочетаний инвестиционных стратегий агентов в каждый период времени  $t$  совпадает с множеством точек единичного квадрата на плоскости. Без потери общности можно рассматривать конечный набор стратегий, используя, например, сеточные методы. Далее, для большей наглядности и простоты изложения, будем предполагать, что агенты используют несколько базовых инвестиционных стратегий.

### 3.2 Метод решения задачи

Модель (7-12) являются замкнутой, и позволяет, задавая на входе параметры модели и сценарии динамики спроса  $D(t)$ , рассчитать динамику предложения со стороны агентов, изменение их рыночной доли и динамику нефтяных цен.

Поскольку агенты принимают инвестиционные решения в условиях неопределенности и независимо друг от друга (не знают заранее выбор конкурента), то их выбор с некоторым временным лагом влияет на соотношение спроса и предложения на рынке и, в соответствии с формулой (7), на рыночную цену нефти.

Каждый стремится выбрать такую стратегию, которая обеспечит ему максимальный выигрыш в соответствии с заданными критериями. Предполагается, что агенты знают множество возможных решений друг друга. Агенты, выбирая инвестиционные стратегии, стремятся, например, максимизировать свою рыночную долю в определенном периоде. В случае конечного набора возможных стратегий агентов задача сводится к анализу матричной антагонистической игры с нулевой суммой. Другим важным критерием эффективности стратегий агентов является общая стоимость поставок нефти за прогнозный период, которая вычисляется следующим образом:  $Inc_i = \sum_{t=1}^{t=T} P(t) B_i(t)$ .

Далее рассматривается рынок типа дуополия, на котором представлены два агента. Первый агент использует традиционную технологию добычи нефти, второй – добывает сланцевую нефть. Пусть множество инвестиционных стратегий агента 1 ( $k = \overline{1, K}$ ) и агента 2 ( $j = \overline{1, J}$ ). По результатам проведения серии расчетов на модели (7) – (12) для каждого сценария динамики рыночного спроса  $D(t)$  можно построить матрицы выигрышей агентов  $Inc_{k,j}^1, Inc_{k,j}^2$  по выбранному критерию. В этом случае решение задачи сводится к анализу биматричной игры с платежными матрицами  $Inc_{k,j}^1, Inc_{k,j}^2$ .

Предполагается, что агенты выбирают инвестиционные стратегии, которые соответствуют точке равновесия Нэша в описанной биматричной игре. Возможность получения решения (равновесных точек Нэша) биматричной игры в чистых стратегиях в общем случае не гарантировано и зависит от свойств матрицы  $NPV_{k,j}^1, NPV_{k,j}^2$ . Метод решения данной задачи включает проведение серии численных расчетов на имитационной модели, построение платежной матрицы, ее анализ и поиск решения.

Исследуемая задача моделирования конкуренции на рынке нефти в данной постановке включает два этапа. На первом этапе ищется решение описанной биматричной игры. На втором этапе для найденных оптимальных стратегий агентов рассчитывается динамика рыночной цены нефти, динамика производственных мощностей агентов и их рыночная доля.

Исследуемая задача сводится к анализу многошаговой (динамической) матричной игры и в силу специфики рассмотренных сценариев спроса на нефть, оптимальные решения будут иметь «кусочно-постоянный» вид. Алгоритм решения задачи состоит в следующем. Последовательно генерируются комбинации инвестиционных стратегий (путей на многодольных графах агентов). Для каждой комбинации проводится моделирование и расчет параметров (динамики рыночной цены нефти, динамики производственной мощности агентов, их рыночной доли и значение выбранного критерия оптимальности инвестиционной стратегии) с использованием модели (7) – (12).

На основе проведенных итеративных расчетов формируются матрицы выигрышей агентов. Далее стандартным методом осуществляется анализ сформированной матрицы и поиск

равновесных точек Нэша, которые и являются искомым решением задачи. Для полученного решения строятся графики прогноза цены на рынке, графики динамики соотношения спроса и предложения, анализируются выбранные инвестиционные стратегии агентов. Описанный алгоритм решения задачи реализован в среде MS Excel.

### 3.3 Результаты моделирования

Далее приводятся результаты практического использования предлагаемого подхода для анализа и выбора инвестиционных стратегий нефтяных компаний с традиционным и нетрадиционным способом добычи. Расчеты показывают, что во многих случаях существуют решения исследуемой задачи (равновесные точки Нэша) в чистых стратегиях, анализ которых позволяет сделать ряд интересных для практики выводов.

Рассматривается прогнозный период с 2016 года по 2031 год (15 периодов). Предполагается, что в начальный период спрос и предложение на рынке сбалансированы, то есть  $D(0)=S(0)$ , и равны 90 млн. барр. в сутки.  $P(0)$  – равновесная рыночная цена нефти, равная 45 долл. США за баррель.

$S_i(0)$  (начальные производственные мощности агентов по добыче нефти) приняты на следующих уровнях. Агент 1 (традиционная технология добычи нефти) – 86,4 млн. барр. в сутки (или 96% мирового рынка). Агент 2 (технологии добычи сланцевой нефти) – 3,6 млн. барр. в сутки (4% мирового рынка). Эти данные соответствуют фактическому соотношению мировой добычи между производителями традиционной и сланцевой нефти в начале 2016 года.

Точка безубыточности  $P_i^*$  агентов принята на уровне: агент 1 - 20\$/барр. и агент 2 - 50\$/барр. Временной лаг между периодом инвестирования и периодом соответствующего изменения производственных мощностей  $\tau_i$  равен: для агента 1 – два периода и агента 2 – один период. Приведенные данные отражают существенное отличие (асимметрию) параметров модели агента 1 и агента 2, в том числе короткий инвестиционный цикл в секторе сланцевой нефти и способность сланцевых компаний быстро реагировать на ценовые сигналы активно наращивать или сокращать инвестиции и, соответственно, объем добычи и предложения на рынке. Как отмечалось ранее, компании, добывающие нефть по традиционной технологии, обладают большей инерционностью. В соответствии с этим, функциональная зависимость  $\mu_i$ , задающая значения максимально возможного прироста производственной мощности агентов в зависимости от  $P(t)$ , представлена в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 Традиционная добыча нефти

		Интервал цены, \$/бар.				
0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140
		Прирост добычи, %				
-5,0%	-0,5%	0,5%	1,0%	1,5%	2,0%	2,5%

Таблица 2 Добыча сланцевой нефти

		Интервал цены, \$/бар.				
0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140
		Прирост добычи, %				
-50,0%	-20,0%	0,0%	20,0%	30,0%	35,0%	40,0%

В расчетах рассматривается два сценария спроса на нефть. Сценарий 1 предусматривает равномерный рост мирового спроса на нефть на уровне 1,5% в год. Сценарий 2 предполагает в период с 2016 по 2020 год спрос растет с темпом 1,0 % в год, в период с 2021 по 2025 годы - стабилизация спроса и, далее, после 2025 года - падение спроса с темпом 1,0 % в год.

Будем рассматривать пять возможных инвестиционных стратегий агентов, задаваемых параметром их инвестиционной активности  $\alpha_i$ : стратегия 1 ( $\alpha_i = 1$ ), стратегия 2 ( $\alpha_i = 0,75$ ), стратегия 3 ( $\alpha_i = 0,5$ ), стратегия 4 ( $\alpha_i = 0,25$ ) и стратегия 5 ( $\alpha_i = 0$ ). Заметим, что при выборе стратегии 1 агенты используют наиболее «агрессивную» инвестиционную политику, при выборе стратегии 3 объем инвестиций сокращается вдвое по сравнению со стратегией 1 и при выборе стратегии 5 объем инвестиций равен нулю.

Варьируя заданный набор стратегий агентов для каждого сценария динамики мирового спроса на нефть  $D(t)$  с помощью разработанной компьютерной технологии можно построить матрицы выигрышей, соответствующие выбранным критериям эффективности. Далее находится решение игры, которое считается консолидированным решением игроков по выбору своих инвестиционных стратегий для каждого периода времени.

Сценарий 1 характеризуется стабильно высоким ростом мирового спроса на нефть, что провоцирует агентов придерживаться «агрессивной» инвестиционной стратегии. Равновесные цены на нефть будут колебаться вокруг значения в 60 долл. США за баррель. При этом доля рынка сланцевых компаний увеличится с 4% до 13,2% в конце прогнозного периода.

В соответствии со сценарием 2, пик спроса на нефть будет пройден в период с 2023 по 2025 года, цена в этот период снизится ниже 40 долл. США за баррель. Далее цена нефти будет снижаться более быстрыми темпами и достигнет минимума к 2029 году. По-видимому, все игроки в этой ситуации будут вынуждены сокращать добычу для того, что бы сбалансировать мировой рынок нефти на новых уровнях, что приведет к 2030-2031 году к росту цены нефти до уровня 25 долл. США за баррель. Доля рынка сланцевых компаний увеличится к 2025 году до 6,7% и снизится до 5,1% в конце прогнозного периода.

Результаты моделирования показывают, что, при благоприятном сценарии мирового спроса на нефть, нетрадиционная нефть может получить значительную долю рынка в среднесрочной перспективе. Однако добыча традиционной нефти остается основным источником поставок на мировой рынок нефти. К 2019–2020 годам реализованные проекты добычи сланцевой нефти будут генерировать основную часть прироста предложения нефти. Причем уровень безубыточности этих проектов составит 50-55 долл. США за баррель. Вероятно, в среднесрочной перспективе равновесная цена на нефть будет колебаться немного выше этого уровня. В случае реализации менее благоприятного сценария избыток предложения нефти по сравнению со спросом может привести к раннему пику обычной нефти и существенному снижению нефтяных цен.

## Литература

1. *Акинфиев В. К.* Модель конкуренции между нефтедобывающими компаниями с традиционным и нетрадиционным способом добычи / Управление большими системами. Выпуск 67. М.: ИПУ РАН, 2017. С.52-80.
2. *Акинфиев В. К.* Анализ волатильности нефтяного рынка // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. 2017. № 2. С. 193-196.
3. *Ferris M., Munson T. S.* Complementarity Problems in GAMS and the PATH Solver // Journal of Economic Dynamics and Control. 2000. V. 24, Issue 2. P. 165–188.
4. *Hosseini, S.H. Shakouri G, H.* A study on the future of unconventional oil development under different oil price scenarios: A system dynamics approach / Energy Policy 91, 2016,- P. 64–74.
5. *Hvozdyk, L. Mercer-Blackman, V.* What Determines Investment in the Oil Sector? A New Era for National and International Oil Companies. IDB working paper series (IDB-wp-209), Inter-American Development Bank. 2010, p. 46.
6. *Maggio, G.À., Cacciola, G.* A variant of the Hubbert curve for world oil production forecasts. Energy Policy 37, 2009, - P. 4761–4770.
7. *Matsumoto, K.Õ., Voudouris, V.*, Potential impact of unconventional oil resources on major oil-producing countries: scenario analysis with the ACEGES model. Nat. Resour. Res. 24, 2015, -P. 107–119.