

УДК 681.5
ББК 65.050

МОДЕЛЬ КОНКУРЕНЦИИ МЕЖДУ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИМИ КОМПАНИЯМИ С ТРАДИЦИОННЫМ И НЕТРАДИЦИОННЫМ СПОСОБОМ ДОБЫЧИ

Акинфиев В. К.¹

*(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)*

Рассматривается задача выбора инвестиционных стратегий нефтяных компаний с традиционным и нетрадиционным способом добычи. Предложена математическая модель, описывающая взаимосвязь между инвестиционными стратегиями компаний и рыночной ценой нефти, которая зависит от соотношения спроса и предложения на мировом рынке нефти. Решение задачи сведено к анализу биматричной игры, в которой матрица выигрышей формируется в результате численного моделирования. Приводятся результаты использования предложенного подхода.

Ключевые слова: инвестиционные стратегии, математическая модель, конкуренция на рынке нефти, биматричная игра.

1. Введение

В последние годы наблюдается существенная ценовая нестабильность на мировом нефтяном рынке. Шок на нефтяном рынке, который произошел во второй половине 2014 года, многие связывают с появлением в США новых технологий добычи трудно извлекаемых залежей нефти (сланцевой нефти). Как

¹ Валерий Константинович Акинфиев, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник (akinf@ipu.ru).

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.

Кроме этих факторов (ценовые войны между игроками) на равновесие на рынке существенное влияние оказывает динамика спроса на нефть на мировом рынке, зависящая от большого числа факторов, включая темпы роста экономик стран импортеров и изменение в структуре потребления энергоносителей, связанных с появлением новых технологий.

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. Причем компании с традиционной технологией добычи обладают в этом смысле большей инерционностью по сравнению с компаниями, добывающими сланцевую нефть.

Следует заметить, что на нефтяном рынке среди нефтедобывающих компаний наблюдается существенная асимметрия, связанная с различиями в технологии добычи и технико-экономических характеристиках нефтяных месторождений.

Очень 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. При этом в себестоимость добычи, как правило, включают инвестиции компаний на поддержание добычи (поддерживающие инвестиции). Если цена на рынке становится меньше точки безубыточности компании, то уровень ее добычи будет заведомо снижаться с некоторым временным лагом. Темп снижения зависит от разницы между рыночной ценой и точкой безубыточности. В период низких цен на нефть (30–35 долл./баррель) снижают инвестиции и добычу компании, добывающие нефть на глубо-

ководных шельфах (североморская нефть, Норвегия, Канада) и, конечно, компании, добывающие сланцевую нефть.

И, напротив, если цена на рынке выше точки безубыточности, то компания имеет возможность инвестировать в развитие и рост добычи. В этом случае у компании имеется возможность выбора того или иного варианта инвестиционной стратегии в зависимости от цели компании и складывающейся конъюнктуры рынка.

Основными критериями выбора игроками своих стратегий является, как правило, удержание или увеличение доли рынка, а также увеличения капитала (стоимости) компании. При этом каждой компании необходимо учитывать возможный выбор инвестиционных стратегий остальными игроками и ожидание изменения динамики спроса в среднесрочной и долгосрочной перспективе. Причем, между игроками возможны коалиции и соглашения, например, между странами ОПЕК.

Существенное влияние на возможные действия игроков в ответ на шоковые изменения цены на рынке оказывают также показатели временного лага между периодом инвестирования и периодом прироста товарной добычи нефти и показатель удельного прироста товарной добычи нефти на единицу инвестиционных вложений. Достаточно условно можно разделить игроков на нефтяном рынке по этим показателям на четыре группы. В таблице 1 приведены количественные и качественные оценки параметров для выделенных групп игроков. Анализ таблицы показывает существенную асимметрию на рынке, которая обуславливает различие в реакции игроков на рыночные шоки и их инвестиционные стратегии.

Взрывной рост добычи сланцевой нефти в США в 2014 году стал неожиданностью для рынка. К началу 2015 года объем добываемой в США сланцевой нефти практически сравнялся с объемом традиционно добываемой нефти – это более 4,5 млн. баррелей в сутки. Для справки, это почти половина от объема добычи нефти в Саудовской Аравии или России [2].

Добыча в основном ведется на трех формациях: Bakken на севере США, Eagle Ford и Permian на юге. В каждом регионе одновременно разрабатываются сотни участков, каждый из которых обладает уникальными характеристиками. Пористость

и проницаемость пласта, его толщина и глубина залегания, а также состав горных пород, расположенных над пластом сланца, могут существенно различаться даже на соседних участках.

Таблица 1.

Параметры	Арабская нефть	Сибирская нефть	Шельфовая нефть	Сланцевая нефть
Точка безубыточности	самая низкая (10 \$/барр.)	средняя (20 \$/барр.)	высокая (35 \$/барр.)	самая высокая (50 \$/барр.)
Временной лаг между периодами инвестирования и прироста добычи	средний (12–24 мес.)	высокий (24–36 мес.)	высокий (24–36 мес.)	самый низкий (3–12 мес.)
Удельные инвестиционные издержки на прирост добычи	низкая	высокая	самая высокая	высокая

Коммерчески выгодная добыча сланцевой нефти стала возможной благодаря технологиям горизонтального бурения и гидравлического разрыва пласта (англ. fracking). Технологии добычи постоянно совершенствуются, однако по объемам добычи из каждой отдельной скважины сланцевая нефть в любом случае уступает традиционно добываемой нефти. Уже в первый год после гидроразрыва объем извлекаемой сланцевой нефти падает более чем в два раза, а через пять лет скважина закрывается, так как низкий дебет нефти делает добычу нерентабельной. При добыче нефти из традиционных пластов дебет в среднем падает лишь на 5–7% в год, и общий объем извлекаемой нефти кратно выше.

Также сланцевая нефть уступает традиционно добываемой с точки зрения стоимости добычи. Как горизонтальное бурение, так и применение гидроразрыва в несколько раз увеличивают стоимость бурения отдельной скважины, и чем глубже залегает пласт сланца и ниже его проницаемость, тем дороже обходится применение этих технологий. С учетом стоимости аренды земли уровень безубыточности добычи сланцевой нефти на разных участках варьируется от 40 до 80 долларов США за баррель. Такой большой разброс цифр в первую очередь отражает непостоянность геологических характеристик каждого конкретного

участка, так как основным компонентом стоимости добычи сланцевой нефти является стоимость бурения [2].

Коммерческое использование новых технологий добычи сланцевой нефти позволило США в течение 2011–2014 годов увеличить почти вдвое собственную добычу нефти до уровня 9,2 млн баррелей в сутки. В это же период остальные нефтедобывающие страны свой уровень добычи либо увеличивали незначительно, либо даже снижали. Так, например, добыча нефти в России в последние годы росла с темпом около 1% в год. При этом на старых месторождениях добыча нефти падала на 1,5–2% в год, а на новых месторождениях – росла на 3–3,5% в год.

Если в период до 2013 года рост предложения нефти на рынке компенсировался ростом спроса, то в 2014 году потребление нефти росло более низкими темпами, и разница между спросом и предложением достигла 1,5–2,0 млн баррелей в сутки. Такой дисбаланс спроса и предложения привел к шоковому снижению цены на нефть.

Страны ОПЕК могли бы снизить уровень добычи нефти и таким образом ликвидировать избыток предложения, что помогло бы цене вернуться на более высокий уровень. Однако в 2014 году страны ОПЕК отказались от использования такой стратегии. Это решение объясняется нежеланием потерять долю рынка в пользу, прежде всего, производителей США, которые в случае быстрого восстановления цены на нефть смогли бы и дальше наращивать добычу нефти. Страны ОПЕК предпочли на первом этапе оставить вопрос балансировки спроса и предложения рыночным механизмам: низкая цена сделает добычу на дорогостоящих проектах нерентабельной, и предложение сократится. Производители сланцевой нефти уже отреагировали на снижение цен на нефть сокращением объемов бурения на наименее выгодных месторождениях: количество активных буровых установок к 2016 году снизилось почти в два раза.

Следует отметить, что нефтяные цены для многих стран, в том числе и России, являются ключевым фактором, влияющим на макроэкономические показатели и потенциал роста экономики. В этой связи представляется важным вопрос о том, будет ли сланцевая нефть оказывать большое влияние на нефтяной рынок

в течение ближайших 10–15 лет. По прогнозам ряда экспертов, добыча сланцевой нефти может пройти пик уже в 2020–2025 годах. Другие эксперты считают, что доля добычи сланцевой нефти в общемировой добыче будет расти вплоть до 2045–2050 годов. По их мнению, этому будет способствовать развитие технологий добычи и успешность разведочных работ. Однако слабая макроэкономическая среда может привести к сокращению инвестиций не только в США, но и в других странах. При этом запуск в эксплуатацию новых месторождений, которые сейчас находятся на ранней стадии разработки, может быть отложен. Это может негативно сказаться на темпах роста глобальной добычи нефти в среднесрочной и долгосрочной перспективе.

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. Главной целью этих исследований, очевидно, является прогнозирование уровня мировой добычи, спроса и цены на нефть.

2. Методы моделирования рынка нефти

Интерес к моделированию и прогнозированию уровня мировой добычи, спроса и цены на нефть всегда был высоким. Первые исследования в этой области рассматривали задачу прогнозирования времени пика добычи нефти, как для отдельных стран, так и в целом для мировой добычи нефти. Так как нефть является не возобновляемым ресурсом, то предполагается, что когда-нибудь общемировая добыча достигнет пика и далее будет снижаться.

Так, Кинг Хабберт в 1956 году предложил математическую модель, которая предполагает, что общее количество добытой нефти на некотором месторождении как функция времени следует логистической кривой [7]. Темп добычи нефти является производной этой функции, а ее график имеет колоколообразную форму, который известен как кривая Хабберта. Хабберт и его последователи предполагали, что те же модели, которые

позволили успешно предсказать пик добычи традиционной нефти в США, применимы и к другим случаям, таким как пик мировой добычи нефти. Были опубликованы различные оценки времени прохождения пика мировой добычи нефти, причём некоторые из этих результатов не подтвердились. Это привело к критике метода. Тем не менее, в США до сих пор существует ассоциация по исследованию пика нефти и газа ASPO (The Association for the Study of Peak Oil and Gas), целью которой является проведение исследований по оценке сроков и последствий прохождения глобального пика нефти и газа. Пример подобных исследований приведен в работе [7].

В последние годы большое число исследований по прогнозированию динамики добычи нефти и пика добычи проводилось с использованием более сложных моделей. Так, например, в [10] предложена модель ACEGES, которая представляет собой агенто-ориентированную модель добычи традиционной нефти для 93 стран. Модель учитывает четыре ключевых фактора неопределенности, а именно: предполагаемые расчетные конечные извлекаемые запасы, оценку роста спроса на нефть, предполагаемый рост добычи нефти и предполагаемую точку пиковой добычи в разных странах. Модель может быть использована для прогнозирования долгосрочных (дискретных и непрерывных) сценариев добычи традиционной нефти. Отметим, что предложенный подход и модель не позволяет прогнозировать нефтяные цены и учитывать их влияние на темпы роста добычи и потребления.

Последние годы усилился интерес к исследованиям в области математического моделирования различных аспектов конкуренции на рынке нефти между производителями традиционной и сланцевой нефти.

В [8] модель ACEGES используется для исследования влияния технологии добычи нетрадиционной нефти на динамику нефтяных рынков. Исследование проведено на примере четырех важных нефтедобывающих стран: Саудовской Аравии, Ирана, Канады и Венесуэлы. На основе полученного вероятностного прогноза делается вывод, что страны, которые богаты обычной нефтью, такие как Саудовская Аравия и Иран, будут оставаться глобальными игроками на нефтяном рынке в течение

первой половины 21 века; однако в течение второй половины 21 века игроки, добывающие нетрадиционную нефть, возьмут власть на мировом нефтяном рынке.

В [5] предложена модель оценки сценариев развития производства традиционной и сланцевой нефти в США, основанная на методологии системной динамики. Исследуются взаимосвязи между динамикой цены на нефть и изменениями в уровне технологии, объема производственных мощностей (буровых установок) и добычи нефти. С помощью статистических данных рынка сланцевой нефти США было выяснено, что лаг между моментом роста цены на нефть и моментом увеличения добычи сланцевой нефти на существующих скважинах составляет 3–5 месяцев. Кроме того, это приводит к более активному росту новых буровых установок с лагом 7–11 месяцев и увеличению добычи нефти с лагом 9–12 месяцев. В целом делается вывод, что сланцевая нефть может получить значительную долю рынка в среднесрочной перспективе, хотя традиционная нефть будет основным источником мирового рынка нефти в долгосрочной перспективе. Полученные результаты позволяют прогнозировать более поздний пик добычи традиционной нефти вследствие увеличения доли сланцевой нефти в ближайшем будущем. Тем не менее, негативное воздействие на окружающую среду сланцевых технологий добычи нефти может привести со стороны правительств к ограничениям на выдачу лицензий на новое бурения, что будет тормозить рост добычи сланцевой нефти.

Следует заметить, что в данной работе цена нефти считается экзогенной переменной (сценарии динамики нефтяных цен задаются заранее). При этом важнейшие вопросы балансирования рынка нефти и ценообразования в данном исследовании также не рассматриваются.

В [9] предложена модель долгосрочного прогноза добычи нетрадиционной нефти, основанная на методе разностных уравнений. Используя различные сценарии мирового потребления нефти, показано, что глобальный пик добычи нетрадиционной нефти произойдет примерно в 2080 году, причем максимальный уровень добычи нетрадиционной нефти составит порядка 50–80 млн баррелей в сутки.

Исследования, проведенные в [4], показывают, что пик тра-

диционной нефтедобычи, вероятно, пройдет между 2020 и 2030 годами, и объем традиционной нефтедобычи будет сокращаться после 2025 года. Эти вопросы исследуются с использованием модели системной динамики, которая учитывает альтернативные сценарии спроса и естественного истощения мировых запасов энергетических ресурсов, а также учитывает рыночные механизмы перехода от традиционных к нетрадиционным способам добычи нефти.

Следует заметить, что результаты прогноза у разных авторов довольно сильно отличаются друг от друга. Так, в [4] делается оптимистический прогноз для развития сланцевой нефти. Тогда как другие исследования показывают, что пик добычи сланцевой нефти придется только на вторую половину 21 века.

В [6] анализируются тенденции в области инвестиционной политики в нефтяном секторе с учетом новых вызовов для нефтяных компаний, связанных прежде всего с ужесточением требований и ограничений по защите окружающей среды, увеличением налоговой нагрузки для компаний. Кроме того, компаниям приходится инвестировать в новые нефтяные проекты с более сложными геологическими условиями, что приводит к существенному повышению инвестиционных издержек, длительности инвестиционного цикла и задержкам ввода в эксплуатацию новых месторождений. В работе построена эконометрическая модель, основанная на использовании техники Arellano-Бонд GMM, которая позволяет анализировать выше перечисленные факторы на инвестиционную политику компаний. Если многие из этих негативных факторов, как ожидается, сохранятся и даже усилятся в ближайшем будущем, то ограничения в области увеличения поставок нефти останутся доминирующим фактором колебаний цен на нефть.

В [3] исследуется модель спроса и предложения на нефтяном рынке. Спрос на нефть и предложение имеют очень низкую ценовую эластичность, и эта характеристика делает цены на нефть крайне неустойчивыми. Нефтяные цены могут изменяться в более широких пределах, чем цены на другие товары. Кроме того, на динамику роста спроса на нефть влияет кредитно-денежная политика на рынке долларовых активов. Проводится анализ денежно-кредитной политики США низких или отрица-

тельных реальных процентных ставок, которая, по утверждению авторов, является дестабилизирующим фактором для нефтяных рынков. В работе показано, что денежно-кредитная политика в области процентных ставок и курса доллара США стимулирует мировой спрос на нефть в условиях ограниченных поставок нефти, что приводит к неадекватно высоким ценам на нефть, которые являются ограничителем для мирового экономического роста.

Следует отметить, что задача моделирования нефтяного рынка (включая прогнозирование динамики нефтяных цен) с учетом всех факторов, влияющих на его параметры, является исключительно сложной. Поэтому в работе основное внимание уделено моделированию причинно-следственных связей между рыночным спросом на «физическую» нефть, предложением ее со стороны производителей и ценой, которая «балансирует» спрос и предложение. При этом из поля зрения, конечно, выпадают многие важные моменты, такие, например, как влияние на цену нефти параметров финансовых рынков, включая политику ФРС США в области процентных ставок и курса доллара, протекционистская политика ряда стран и многое другое, включая «психологические» реакции участников рынка на изменение его волатильности. Каждый из этих факторов требует отдельного исследования. Поэтому любое исследование этих вопросов с помощью математического моделирования страдает односторонностью. Это показывает и приведенный в данном разделе обзор публикаций.

Целью данной работы является построение макроэкономической модели, позволяющей анализировать связь между выбором игроками 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 компаний, использующих технологию добычи сланцевой нефти.

Проведение многовариантных расчетов с использованием разработанной модели позволит дать игровой анализ рацио-

нальных инвестиционных стратегий игроков и исследовать их влияние на процесс поиска рынком равновесия и равновесных цен в зависимости от внешних условий и параметров асимметрии на рынке [1].

3. Модель

Рассмотрим рынок, на котором присутствует N агентов (производителей нефти). Далее рассматривается временной промежуток (прогнозный период) равный T периодам: $t = 1, \dots, T$. Обозначим через $D(t)$ динамику рыночного спроса на нефть, – это экзогенная переменная, график изменения которой задается заранее для различных внешних по отношению к модели макроэкономических сценариев.

Пусть $P(t)$ – рыночная цена нефти в период t . Предполагается, что в каждый период времени рыночная цена формируется на основе соотношения спроса $D(t)$ и суммарного предложения со стороны агентов $S(t)$. $S(t)$ определяется в каждый период t как $S(t) = \sum_{i=1}^N S_i(t)$, где $S_i(t)$ – предложение нефти на рынок агентом i , которое определяется его производственной мощностью по добыче нефти. Тогда

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

где $P(0)$ – цена на рынке на начало прогнозного периода (начальные условия). Если $D(t) - S(t) \geq 0$, то возникает дефицит предложения на рынке и цена растет, в противном случае – избыток предложения и, соответственно, цена падает. Заметим, что суммарное предложение со стороны агентов $S(t)$ зависит от их инвестиционных стратегий, которые определяются в данной модели, в том числе динамикой рыночной цены на нефть. Параметр γ – эластичность цены нефти по величине превышения спроса над предложением.

3.1. МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ АГЕНТОВ

Производственная мощность агентов. Производственная мощность агента рассчитывается с помощью рекуррентного

соотношения $S_i(t) = S_i(t-1) + V_i(t)$, где $V_i(t)$ – изменение производственной мощности агента i в период t , который зависит от объема ранее сделанных инвестиций. $S_i(0)$ – начальная мощность производства (добычи нефти):

$$(2) \quad V_i(t) = F_i(I_i(t - \tau_i) - I_i^*).$$

Здесь функция F_i задает зависимость между изменением производственных мощностей агента и, соответственно, его предложением нефти на рынке и объемом инвестиций; $I_i(t)$ – объем инвестиций в развитие производственных мощностей агента i в период t ; τ_i – временной лаг между периодом инвестирования и периодом соответствующего изменения производственных мощностей; I_i^* – объем инвестиций, необходимых для поддержания уровня добычи нефти.

Следует пояснить особенность нефтяной отрасли, которая состоит в следующем: если агент инвестирует в развитие производства меньше величины I_i^* , то объем его добычи $V_i(t)$ будет падать с некоторым временным лагом τ_i . И наоборот: для того чтобы производственная мощность агента росла, необходимо чтобы объем его инвестиций превышал величину I_i^* :

если $I_i(t) = I_i^*$, то $V_i(t) = 0$;

если $I_i(t) \geq I_i^*$, то $V_i(t) \geq 0$;

если $I_i(t) \leq I_i^*$, то $V_i(t) \leq 0$.

Типичный вид функции F_i представлен на рис. 1.

Инвестиционные стратегии агентов. Далее предполагается, что агенты принимают инвестиционные решения в условиях высокой волатильности рынка и неопределенности относительно прогнозной динамики спроса $D(t)$. Агенты могут наблюдать в каждом периоде t лишь за изменением цены нефти и прогнозировать ее изменение на следующие несколько периодов. Агенты на каждом шаге t принимают инвестиционные решения на основе этой доступной информации в соответствии с некоторым заранее заданным алгоритмом, который будет описан далее.

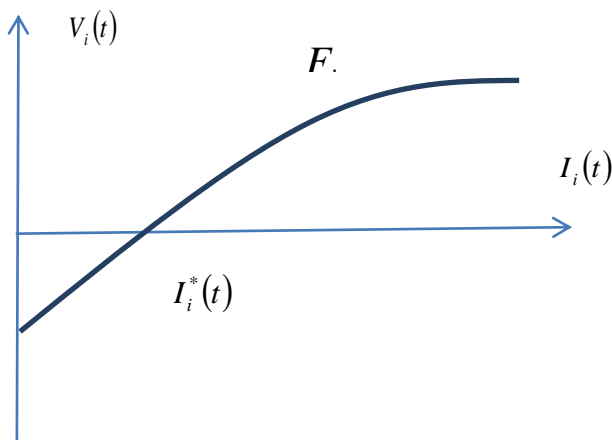


Рис. 1. Вид функции F_i

Пусть P_i^* – точка безубыточности агента i , равная цене нефти на рынке, при которой прибыль агента равна нулю. Поэтому если в период t $P(t) \geq P_i^*$, то у агента i прибыль от операционной деятельности 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:

$$(3) \quad I_i(t) = \omega_i(P(t) - P_i^*),$$

где функция ω_i задает зависимость между инвестициями агента и разницей между рыночной ценой нефти и его точкой безубыточности.

Подставим выражение (3) в (2), получим

$$(4) \quad V_i(t) = F_i(\omega_i(P(t - \tau_i) - P_i^*) - I_i^*).$$

Заметим, что в выражении (4) переменной величиной является только $P(t)$, остальные параметры являются константами. Далее, заменим функции F_i и ω_i на функцию μ_i , тогда

$$(5) \quad V_i(t) = \mu_i((P(t) - P_i^*), I_i^*, \tau_i).$$

Предлагаемый подход состоит в построении функциональной зависимости μ_i на основе анализа рыночного поведения агентов, параметров способа добычи нефти, представленных, например, в таблице 1, и некоторых допущений. Функциональная зависимость μ_i описывает поведение агентов на рынке в зависимости от динамики цены нефти, которая, в свою очередь, зависит от выбора агентами инвестиционных стратегии и динамики мирового спроса на нефть $P(t)$.

Далее будем предполагать, что функциональная зависимость μ_i задает максимально возможный прирост производственных мощностей агента в зависимости от $P(t)$. Вместе с тем, агенты могут сознательно выбирать уровень своей инвестиционной активности и, соответственно, прирост производственной мощности и объем предложения нефти на рынке, прогнозируя последствия своего выбора на баланс спроса и предложения. Пусть параметр α_i характеризует инвестиционную активность агента i , $0 \leq \alpha_i \leq 1$. Величины α_i являются параметрами модели, которые могут выбираться агентами:

$$(6) \quad V_i(t) = \alpha_i \mu_i((P(t) - P_i^*), I_i^*, \tau_i).$$

Заметим, что если $\alpha_i = 1$, то агент выбирает агрессивную политику, направленную на максимальное наращивание производственных мощностей по добыче нефти и захвату рынка. Напротив, если $\alpha_i = 0$, то агент сознательно «замораживает» добычу или даже снижает ее, тем самым ослабляет давление на рынок в надежде на более высокие цены.

Множество возможных инвестиционных стратегий каждого агента совпадает с множеством точек единичного отрезка. Без потери общности в рамках решения данной задачи можно рассматривать конечный набор стратегий.

Заметим, что модель (1)–(4), (6) является 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.

3.2. КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРАТЕГИЙ

Рассмотрим далее критерии эффективности, которыми руководствуются агенты при выборе своих инвестиционных стратегий. Будем предполагать, что каждый агент заинтересован в выборе такой инвестиционной стратегии (с учетом возможного выбора стратегий конкурентов), которая обеспечит сохранение или увеличение его рыночной доли и одновременно максимизацию поступления денег от продажи нефти. Последний критерий важен, так как его максимизация позволят агентам получать достаточно денежных средств для инвестиций в поддержание и увеличение своих производственных мощностей и, соответственно, уровня добычи нефти.

Критерий 1. Доля рынка. Пусть $B(t)$ – общий объем поставок нефти в период t , который рассчитывается по формуле $B(t) = \min\{D(t); S(t)\}$. Предположим, что загрузка производственных мощностей всех агентов одинакова, тогда объем поставок агента i вычисляется следующим образом: $B_i(t) = B(t) \frac{S_i(t)}{S(t)}$.

Соответственно, доля рынка агента в каждый период времени равна $m_i(t) = \frac{B_i(t)}{B(t)}$. Критерий 1 может быть выражен следующим образом:

$$(7) \quad m_i(T) \rightarrow \max \quad i = 1, N.$$

Агенты стараются максимизировать свою рыночную долю в конце прогнозного периода, используя, в том числе, стратегию ценовых войн. В случае конечного набора возможных стратегий агентов задача сводится к анализу матричной антагонистической игры с нулевой суммой.

Критерий 2. Доход от продажи. Вторым критерием эффективности стратегий агентов является общая стоимость поставок нефти за прогнозный период, которая вычисляется следующим образом: $Inc_i = \sum_{t=1}^{t=T} P(t)B_i(t)$. Заметим, что агенты в ряде стран являются госкомпаниями и должны учитывать в выборе своих инвестиционных стратегий интересы государства, связанные с пополнением доходных статей бюджета за счет

нефтяных доходов. Поэтому в некоторых случаях этот критерий в краткосрочной перспективе может быть более важным, чем рыночная доля агентов.

В данной постановке задачи нас будет интересовать в первую очередь агенты двух типов: компании, добывающие нефть по традиционной технологии, и компании, добывающие трудно извлекаемую (сланцевую) нефть. Поэтому далее будем рассматривать рынок типа дуополия, на котором представлены два агента. Пусть конечное множество инвестиционных стратегий агента 1 состоит из K элементов, где k – номер стратегии ($k = 1, \dots, K$). Соответственно, для агента 2 множество инвестиционных стратегий состоит из J элементов ($j = 1, \dots, J$). По результатам проведения серии расчетов на модели для каждого сценария $D(t)$ можно построить матрицу выигрышей агентов $Inc_{k,j}^1, Inc_{k,j}^2$.

В этом случае решение задачи сводится к анализу биматричной игры с платежными матрицами $Inc_{k,j}^1, Inc_{k,j}^2$. Данная задача достаточно хорошо исследована. Как известно, условием существования хотя бы одной равновесной точки Нэша в чистых стратегиях (k_0, j_0) является выполнение следующих неравенств:

$$(8) \quad Inc_{k_0 j_0}^1 \geq Inc_{k j_0}^1, k = \overline{1, K};$$

$$(9) \quad Inc_{k_0 j_0}^2 \geq Inc_{k_0 j}^2, j = \overline{1, J}.$$

Если такая точка существует, то она считается решением данной задачи.

Возможность получения решения (равновесной точки Нэша) биматричной игры в чистых стратегиях в общем случае не гарантировано и зависит от свойств матрицы $Inc_{k,j}^1, Inc_{k,j}^2$. Метод решения данной задачи включает проведение серии расчетов на имитационной модели, построение платежной матрицы, ее анализ и поиск решения [1].

В смешанных стратегиях равновесная точка всегда существует и может быть найдена различными методами, например сведением к задаче ЦЛП или к линейной задаче дополненности. Заметим, что смешанное равновесие Нэша служит не очень

«удобным» вариантом решения данной игры, поскольку игровая ситуация разыгрывается только один раз.

Заметим, что платежные матрицы $Inc_{k,j}^1, Inc_{k,j}^2$ задаются имитационной моделью, поэтому в качестве основного метода исследования данной задачи будет использоваться метод численного моделирования.

Следует отметить, что в исследуемой задаче предполагается, что агенты однократно выбирают свои инвестиционные стратегии и сохраняют их на протяжении всего прогнозного периода. При этом, как показано выше, задача сводится к анализу одношаговой матричной игры. Если снять это допущение и считать, что агенты на протяжении прогнозного периода могут менять свои инвестиционные стратегии, т.е., например, до некоторого периода времени придерживаются «агрессивной» инвестиционной политики, а после него – сокращают объем инвестиций и постепенно «сворачивают бизнес».

В такой постановке исследуемая задача может быть сведена к анализу многошаговой (динамической) матричной игры, и в силу специфики рассмотренных сценариев спроса на нефть оптимальные решения будут иметь «кусочно-постоянный» вид. Решение задачи может быть получено с помощью анализа последовательности одношаговых матричных игр и проведения серии численных экспериментов с разработанной моделью.

В следующем разделе приводятся результаты практического использования разработанной модели для анализа и выбора инвестиционных стратегий нефтяных компаний с традиционным и нетрадиционным способом добычи. Будет показано, что во многих случаях существуют решения исследуемой задачи (равновесные точки Нэша) в чистых стратегиях, анализ которых позволяет сделать ряд интересных для практики выводов.

4. Моделирование и анализ результатов

Рассмотрим рынок типа «дуополия», на котором представлены агенты двух типов: компании, добывающие нефть по традиционной технологии, и компании, добывающие трудно

извлекаемую (сланцевую) нефть. Рассматривается прогнозный период с 2016 года по 2031 год (15 периодов).

В расчетах использованы следующие параметры модели:

Предполагается, что в начальный период спрос и предложение на рынке сбалансированы, т.е. $B(0) = D(0) = S(0)$, и равны 90 млн баррелей в сутки; $P(0)$ – равновесная рыночная цена нефти, равная 45 долларов США за баррель.

Параметр эластичности цены γ равен 26,2. Это означает, что при отклонении величины небаланса в период t от равновесного значения (в период $t = 0$) на b процентов, соответственно, рыночная цена нефти изменится по отношению к ее равновесному значению на $26,2b$ процентов (с тем же знаком). Значение параметра эластичности цены γ оценено в результате анализа данных поквартальной динамики мирового спроса на нефть, поставок со стороны производителей и рыночных цен на нефть за период с 1 кв. 2013 года по 3 кв. 2016 года. Данные представлены на сайте International Energy Agency (<https://www.iea.org/oilmarketreport/omrpublic>).

Прогноз динамики мирового спроса на нефть $D(t)$. Международное энергетическое агентство (IEA) в своем ежегодном исследовании «Прогноз мировой энергетики 2016» рассматривает три сценария развития спроса и предложения на рынке нефти до 2040 года. Основной сценарий учитывает последствия выполнения Парижского договора о сокращении вредных выбросов (Nationally Determined Contributions, NDC) и существенное замедление роста потребления углеводородного топлива в мире. По этому сценарию мировой спрос на нефть к 2040 году возрастет на 12%, до 103,5 млн баррелей в сутки. Наибольшую долю в росте спроса за этот период обеспечат Индия и Китай, при этом Китай станет крупнейшим потребителем нефти, опередив к началу 2030-х годов по этому показателю США. Более консервативный сценарий предусматривает ежегодный рост мирового спроса на нефть до 2030 года в среднем на уровне 1,0–1,5 %. При этом мировой спрос на нефть к 2040 году возрастет до 108,5 млн баррелей в сутки. Наиболее амбициозный сценарий предполагает в ближайшие годы резкий рост количества электромобилей, а также широкое распространение возоб-

новляемых источников энергии, включая биотопливо. В соответствии с этим сценарием глобальный спрос на нефть достигает пика к 2020 году (на уровне 95–96 млн баррелей в сутки), после чего глобальный спрос на нефть будет снижаться.

В расчетах рассматривается два крайних сценария: консервативный (сценарий 1) и «амбициозный» (сценарий 2). Сценарий 1 предусматривает равномерный рост мирового спроса на нефть на уровне 1,5% в год. В сценарии 2 предполагается, что в период с 2016 по 2020 год происходит рост спроса на уровне 1,0% в год, в период с 2021 по 2025 годы – стабилизация спроса и далее после 2025 года – падение спроса на уровне 1,0% в год.

Параметр $S_i(0)$ (начальная мощность по добыче нефти). Агент 1 (традиционная технология добычи нефти) – 86,4 млн баррелей в сутки (или 96% мирового рынка). Агент 2 (технологии добычи сланцевой нефти) – 3,6 млн баррелей в сутки (4% мирового рынка). Эти данные соответствуют фактическому соотношению мировой добычи между производителями традиционной и сланцевой нефти в начале 2016 года.

Таблица 2. Традиционная добыча нефти

Интервал цены нефти, \$/баррель						
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 3. Добыча сланцевой нефти

Интервал цены, \$/баррель						
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%

Точка безубыточности P_i^* агентов принята на уровне: агент 1 – 20 долл./баррель и агент 2 – 50 долл./баррель. В соответствии с этим функциональная зависимость μ_i , задающая значения максимально возможного прироста производственной

мощности агентов в зависимости от $P(t)$, представлена в таблицах 2 и 3.

Временной лаг между периодом инвестирования и периодом соответствующего изменения производственных мощностей τ_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. Так, данные, приведенные в таблице 3, отражают 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 (таблица 2).

Будем рассматривать три возможные инвестиционные стратегии агентов, задаваемые параметром их инвестиционной активности α_i : стратегия 1 ($\alpha_i = 1$), стратегия 2 ($\alpha_i = 0,75$) и стратегия 3 ($\alpha_i = 0,5$).

Варьируя заданный набор стратегий агентов для каждого сценария динамики мирового спроса на нефть $D(t)$, с помощью разработанной модели можно построить матрицы выигрышей, соответствующие выбранным критериям эффективности. Критерий 1 – доля рынка каждого агента в % и критерий 2 – суммарная за все периоды стоимость поставленной на рынок нефти (млрд. долл. США).

Сценарий 1. В соответствии с этим сценарием рыночный спрос на нефть на протяжении прогнозного периода растет равномерно с темпом 1,5% в год (рис. 4). Матрицы выигрышей агентов приведены в таблице 4 и 5.

Первый элемент матрицы (таблица 5) соответствует выигрышу первого игрока, а второй элемент – выигрышу второго игрока. В таблице полужирным шрифтом выделены максимальные элементы столбцов матрицы первого игрока и максимальные элементы строк матрицы второго игрока. Анализ полученной матрицы показывает наличие единственной равновесной точки Нэша, которая соответствует выбору агентом 1 инвестиционной стратегии 3, а агентом 2 инвестиционной стратегии 1

($k = 3$ и $j = 1$). Элементы матрицы первого и второго игрока в этой точке выделены полужирным шрифтом.

Таблица 4. Матрица выигрышей агента 2 по критерию 1 (%)

	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
$k = 1$	13,8	11,5	11,2
$k = 2$	16,5	15,0	12,8
$k = 3$	16,8	16,1	14,7

Таблица 5. Матрица выигрышей по критерию 2 (млрд. \$)

	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
$k = 1$	87,3\7,7	90,5\7,6	101,4\7,4
$k = 2$	87,4\8,7	95,3\8,8	104,8\8,5
$k = 3$	91,0\10,2	96,4\10,1	108,5\10,0

При реализации сценария 1 наилучшей стратегией агента 1 с точки зрения критерия 2 является выбор стратегии 3 при любом ответе агента 2. Это означает, что агенту 1 выгодно придерживаться сдержанной инвестиционной стратегии ($\alpha_i = 0,5$), что позволяет ему поддерживать нефтяные цены на достаточно высоком уровне, в интервале 50–70 долл. США за баррель.

Заметим, что при реализации сценария 1 рыночная доля компаний, добывающих сланцевую нефть, при любом сочетании вариантов стратегий игроков, будет существенно увеличена с 4% (2016 год) до 13,8%–17,1% (2031 год). Если агент 1 хочет минимизировать потерю своей доли рынка из-за агрессивной стратегии агента 2, то он должен выбрать стратегию 1, но при этом потери его по критерию 2 составят около 5%.

Напротив, для агента 2 с точки зрения любого критерия наилучшей стратегией является стратегия 1. Это мы наблюдаем на рынке: сланцевые компании США, как только цена нефти становится выше их точки безубыточности, используют, как правило, агрессивную инвестиционную стратегию, направленную на увеличение добычи и захват доли рынка. Заметим, что в случае реализации сценария 1 агенту 2 удастся существенно потеснить на рынке агента 1 (таблица 4).

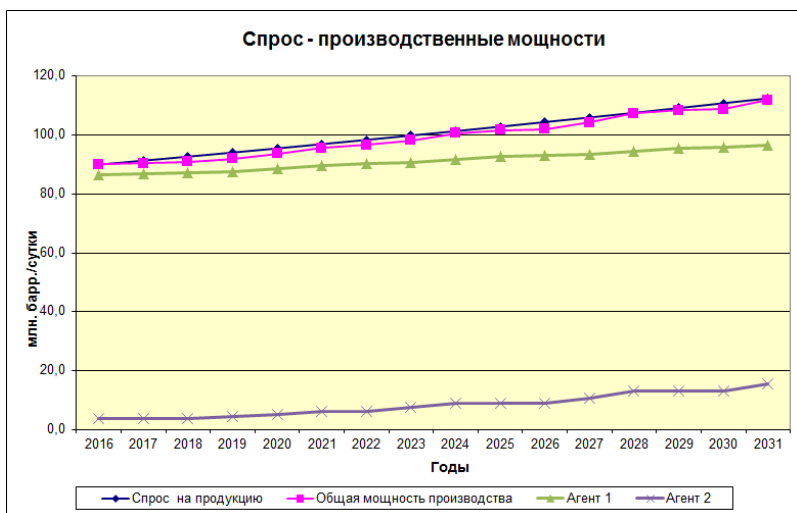


Рис. 2. Спрос – производственные мощности, сценарий 1

На рис. 2 показана динамика предполагаемого рыночного спроса на нефть для сценария 1 и динамики роста производственных мощностей и, соответственно, предложения со стороны игроков (агент 1 и агент 2). На рис. 3 показана динамика цены на нефть. Колебания цены вокруг значения в 60 долларов США за баррель связаны с выбором сланцевыми компаниями агрессивной инвестиционной стратегии. Колебания графика с периодом примерно в три года объясняется коротким инвестиционным циклом сланцевых компаний. При увеличении цены выше 60 долл. США за баррель сланцевые компании начинают увеличивать инвестиции, что приводит с временным лагом в один год

к увеличению предложения нефти и баланс на рынке нарушается, что приводит в свою очередь к соответствующему снижению цены.

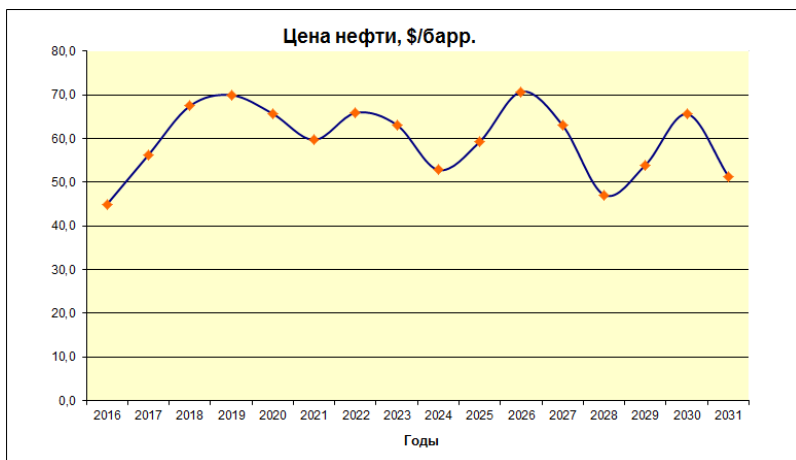


Рис. 3. Цена нефти, сценарий 1

На рис. 4 показана динамика цены нефти для вырожденного случая, когда на рынке отсутствуют компании, добывающие сланцевую нефть. Расчеты показывают, что равновесной ценой нефти в этом случае является цена 90 долл. США за баррель.

Сценарий 2. В соответствии с этим сценарием рыночный спрос на нефть в период с 2016 по 2020 год растет с темпом 1,0% в год, в период с 2021 по 2025 годы – происходит стабилизация спроса (нулевой рост) и, далее, после 2025 года – происходит падение спроса с темпом 1,0% в год. Матрицы выигрышей агентов приведены в таблице 6 и 7. На рис. 5 показана динамика предполагаемого рыночного спроса на нефть и динамики роста производственных мощностей и, соответственно, предложения со стороны игроков (агент 1 и агент 2). На рис. 6 показана динамика цены на нефть.

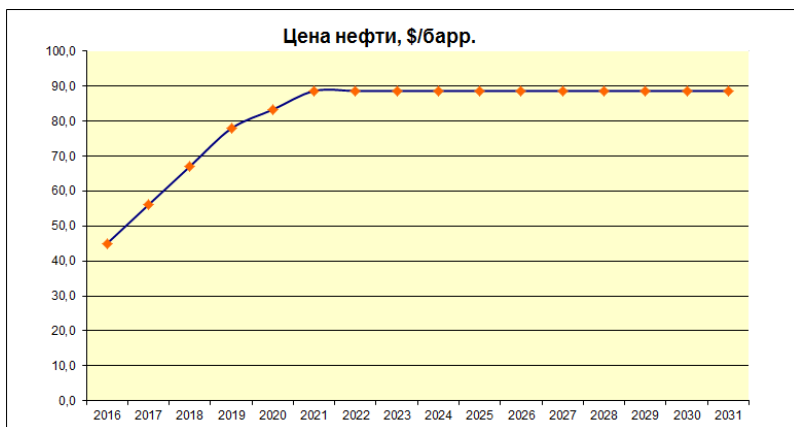


Рис. 4. Цена нефти, сценарий 1

Таблица 6. Матрица выигрышей агента 2 по критерию 1 (%)

	j=1	j=2	j=3
k=1	1,3	1,7	2,0
k=2	1,5	1,6	1,8
k=3	1,9	2,3	2,9

Таблица 7. Матрица выигрышей по критерию 2 (млрд. \$)

	j=1	j=2	j=3
k=1	56,5\2,2	57,3\2,3	60,0\2,4
k=2	59,0\2,4	57,9\2,4	59,5\2,5
k=3	57,8\2,8	58,0\2,8	61,0\2,8

В таблице 7 полужирным шрифтом выделены максимальные элементы столбцов матрицы первого игрока и максимальные элементы строк матрицы второго игрока. Анализ полученных матриц показывает наличие единственной равновесной точки Нэша, которая соответствует выбору обоими игроками инвестиционной стратегии 3 ($k = 3$ и $j = 3$).

Это означает, что обоим игрокам выгодно придерживаться сдержанной инвестиционной стратегии ($\alpha_i = 0,5$), что позволит им даже при неблагоприятной динамике спроса на рынке поддерживать нефтяные цены до 2025 года на уровне выше 40 долларов США за баррель. Поскольку цена нефти 40 долларов США за баррель значительно ниже точки безубыточности для компаний, добывающих сланцевую нефть, то это приводит к тому, что добыча сланцевой нефти после 2022 года станет убыточной и будут существенно сокращаться.

Анализ результатов расчетов, приведенных в таблице 6, показывает, что при реализации сценария 2 сланцевые компании не смогут конкурировать с компаниями, добывающими традиционную нефть, их рыночная доля уменьшится с 4% (2016 год) до 1,3%–2,9% (2031 год).

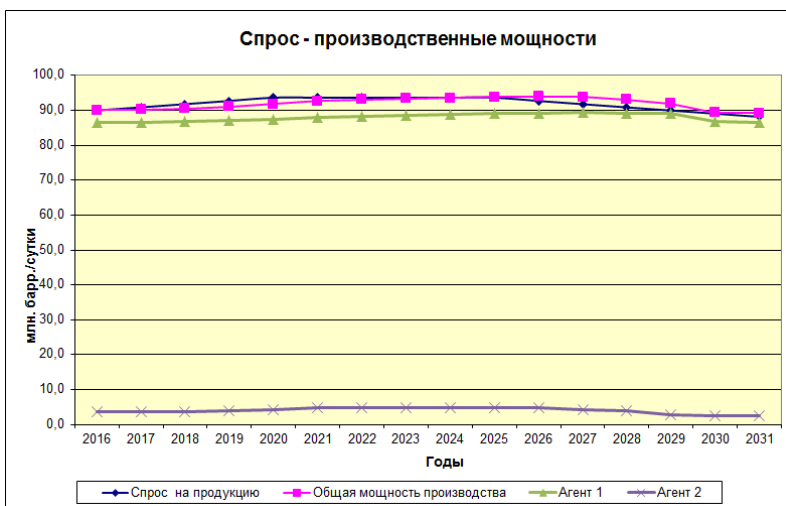


Рис. 5. Спрос – производственные мощности, сценарий 2

Заметим, что, в соответствии со сценарием 2, пик спроса на нефть будет пройден в период с 2023 по 2025 год. Далее цена нефти будет снижаться более быстрыми темпами и достигнет минимума в 2028 году. По-видимому, все игроки в этой ситуации будут вынуждены сокращать добычу для того, чтобы сбалансировать мировой рынок нефти на новых уровнях, что приведет к 2030 году к кратковременному росту цены нефти до уровня 40 долларов США.

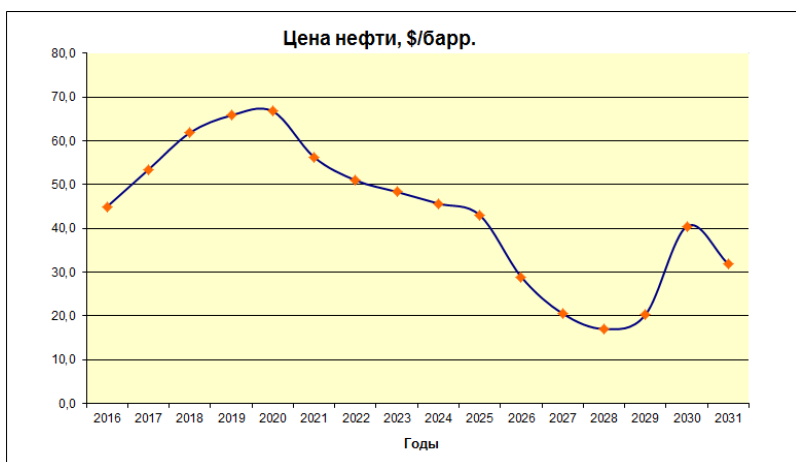


Рис. 6. Цена нефти, сценарий 2

Как видно из анализа приведенных данных, сценарий 2 является крайне пессимистическим для нефтедобывающего сектора. После 2025 года многие игроки с высокой точной безубыточности вынуждены будут уйти с рынка. Оставшимся игрокам придется сокращать инвестиции в поддержание добычи и новые проекты, что будет приводить к сокращению предложения на рынке и к поиску нового ценового равновесия в условиях сокращения мирового спроса на нефть и замену ее новыми, альтернативными источниками энергии.

4. Заключение

Рассмотрена задача оценки и выбора инвестиционных стратегий нефтедобывающих компаний в условиях конкуренции между компаниями с традиционным и нетрадиционным способом добычи. Задача сведена к анализу биматричной игры, в которой матрица выигрышей формируется в результате численного моделирования. Метод решения данной задачи включает проведение серии численных расчетов на разработанной имитационной модели, построение платежных матриц для различных сценариев и их анализ.

Результаты моделирования показывают, что при благоприятном сценарии мирового спроса на нефть (сценарий 1) нетрадиционная нефть может получить значительную долю рынка в среднесрочной перспективе, хотя добыча традиционной нефти будет оставаться основным источником поставок на мировой рынок нефти. К 2019–2020 годам проекты сланцевой нефти, которые сейчас только планируются, могут стать ключевой частью кривой предложения, причем уровень безубыточности этих проектов составит 55–60 долларов США за баррель. Вероятно, в среднесрочной перспективе равновесная цена на нефть будет колебаться около этого уровня. В случае реализации сценария 2 избыток предложения нефти по сравнению со спросом может привести к раннему пику для обычной нефти и существенному снижению нефтяных цен.

Следует заметить, что рассмотренная в работе модель сознательно упрощена и не учитывает некоторые существенные факторы, в том числе возможное изменение точки безубыточности вследствие перехода компаний к разработке более затратных месторождений, а также совершенствование технологий добычи, приводящее к сокращению затраты на разработку и добычу нефти.

Практический интерес представляет также разработка методов решения исследуемой задачи для случая трех и более игроков, что позволит сделать прогнозы параметров нефтяного рынка, полученные с помощью предложенных методов, более реалистичными. Кроме этого, большой интерес представляет анализ решения исследуемой задачи с учетом соотношения

динамики истощения разведанных запасов нефти и, соответственно, естественного снижения ее добычи и сокращения мирового спроса на нефть.

Литература

1. АКИНФИЕВ В.К. *Моделирование инвестиционных стратегий компаний в условиях неопределённости* // Управление большими системами. – 2016. – Вып. 61. – С. 136–167.
2. ПОЛЯКОВА Т.В. *Перспективы развития добычи сланцевых углеводородов в Северной Америке* // Вестник МГИМО. – 2014. – № 1 (34). – С. 97–105.
3. ASKARI H., KRICHENE N. *An oil demand and supply model incorporating monetary policy* // Energy. – May, 2010. – Vol. 35, Iss. 5. – P. 2013–2021.
4. GREENE D.L., HOPSON J.L., LI J. *Have we run out of oil yet? Oil peaking analysis from an optimist's perspective* // Energy Policy. – 2006. – No. 34. – P. 515–531.
5. 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. – 2016. – No. 91. – P. 64–74.
6. 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.
7. MAGGIO G.Ã., CACCIOLA G. *A variant of the Hubbert curve for world oil production forecasts* // Energy Policy. – 2009. – No. 37. – P. 4761–4770.
8. MATSUMOTO K.Ö., VOUDOURIS V. *Potential impact of unconventional oil resources on major oil-producing countries: scenario analysis with the ACEGES model* // Nat. Resour. Res. – 2015. – No. 24. – P. 107–119.
9. MOHR S.H., EVANS G.M. *Long term prediction of unconventional oil production* // Energy Policy. – 2010. – No. 38. – P. 265–276.

10. VOUDOURIS V. DI MAIO C. *ACEGES 1.0 Documentation: Simulated scenarios of conventional oil production* // London Metropolitan Business School Working Papers Series. – August, 2010. – No. 12. – P. 14. – URL: <http://ssrn.com/abstract=1652361>.

A MODEL OF COMPETITION BETWEEN OIL COMPANIES WITH CONVENTIONAL AND UNCONVENTIONAL OIL PRODUCTION

Valerij Akinfiev, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, professor (akinf@ipu.ru).

Abstract: This paper examines the problem of investment strategies choice of oil companies with conventional and unconventional oil production. A mathematical model describing the relationship between the oil companies' investment strategies and the oil price, which depends on the ratio of supply and demand on the world oil market, is constructed and discussed. Solution is reduced to the analysis of a bimatrix game, where in the payoff matrix is formed by numerical simulation. Two possible scenarios of play are presented, a stable one and a volatile one. We present an illustrative example of the proposed approach. The obtained results show that unconventional oil production, including shale oil, will occupy a significant portion of the market in the medium term. Average market price of oil is expected to reach 55-60 \$ per barrel. This model, however, does not account for possible technology advancements, which could lower the expense of oil extraction and, thus, market price.

Keywords: investment strategies, mathematical model, competition in the oil market, bimatrix game.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии В.В. Ключковым.

Поступила в редакцию 26.12.2016.

Опубликована 31.05.2017.