

СЛАНЦЕВАЯ НЕФТЬ: ТЕХНОЛОГИИ, ЭКОНОМИКА, ЭКОЛОГИЯ



Е.В. Грушевенко



Д.А. Грушевенко

Учитывая, что ни одна из имеющихся на сегодня технологий производства альтернативной энергии не может заменить ископаемые углеводороды, человечество все больше стремится к открытию новых источников энергетических ресурсов. Таким источником после сланцевого газа сегодня является сланцевая нефть, добыча которой, как свидетельствуют отдельные примеры, стремительно набирает впечатляющие обороты. При этом потенциал нетрадиционных источников нефти (битуминозных песков, сверхтяжелой нефти и нефти сланцевых плевов) – одна из основных тем для обсуждения в мировом экспертном сообществе за последние годы.

Введение

По различным оценкам ресурсы нефтяных песков, сверхтяжелой нефти и нефтяных сланцев почти пятикратно превышают запасы традиционной нефти¹. По оценкам ИНЭИ РАН², Мирового Энергетического Агентства³ и Департамента Энергетики США⁴ едва ли не наибольшим потенциалом среди

всех них обладает нефть низкопроницаемых пород и сланцевая нефть.

Стоит отметить, что на сегодняшний момент существует некоторая путаница в терминах, так, в различных исследованиях не дается четких определений «сланцевой нефти», «нефтяного сланца» и «нефти низкопроницаемых пород», что приводит к иска-

жению в оценках запасов и перспектив добычи. Основной причиной этой неопределенности является сходная для всех этих источников нефти материнская порода – нефтяной сланец.

Термин, используемый в исследованиях ИНЭИ РАН «нефть сланцевых плевов» включает в себя все виды нефти, добываемые на месторождениях нефтяного сланца – мелкозернистой осадочной породы, с высоким содержанием керогена (глина, мергель, или карбонаты)⁵. В частности:

1. Нефть низкопроницаемых пород (tight oil) – нефть, добываемая из сланцевых плевов, или другой низкопроницаемой породы, с использованием технологий бурения горизонтальных скважин и мультстадийного ГРП. С точки зрения геологии, легкая нефть низкопроницаемых пород – это нефть, которая либо не была исключена из сланца, либо мигрировала на небольшое расстояние в другие низкопроницаемые формации рядом, или внутри самого сланца.

2. Сланцевая нефть – нефть, добываемая методами термического воздействия на нефтяной сланец, который богат керогеном – смесью твердого органического материала.

Во избежание недопонимания мы относим нефть, добываемую методами термического воздействия, к керогеновой нефти или керогеновому сланцу.

Совокупный потенциал мировой добычи нефти сланцевых плевов оценивается ИНЭИ РАН в 84–208 млн. т к 2020 году и в 150–418 млн. т к 2035 году, порядка 10% от суммарного объема предложения всех жидких видов топлив. В 2011 году в мире добыли около 40 млн. т

Екатерина Валерьевна Грушевенко, м.н.с., Дмитрий Александрович Грушевенко, инженер-исследователь, Центр мировых энергетических рынков, ИНЭИ РАН, г. Москва

¹ IEA WEO 2010

² Прогноз энергетики России и мира под руководством А.А. Макарова, Л.М. Григорьева, Москва 2012

³ IEA WEO 2012

⁴ EIA IEO 2011

⁵ World Energy Outlook 2010

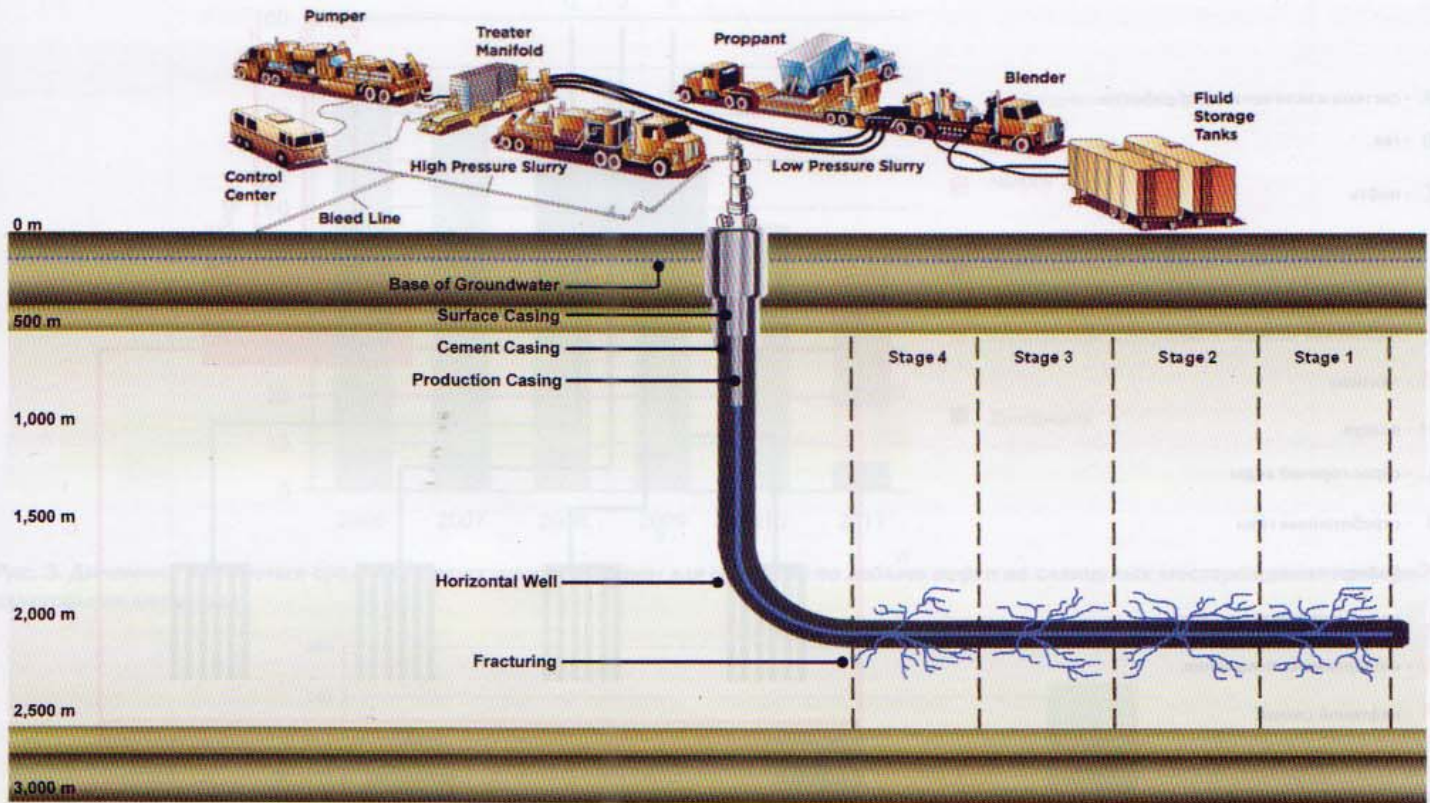


Рис. 1. Схема ГРП в горизонтальной скважине

Источник: R. Wasylishen & S. Fulton, PTAC, *Environment and Reclamation reuse of flowback & produced water for hydraulic fracturing in tight oil*, June 28, 2012

нефти из этих источников. Такой рост добычи обуславливается целым набором факторов:

1. Стремительный рост цен на нефть в начале XXI в. Нефтяные компании смогли инвестировать в разработку новых технологий добычи. Это привело к выходу нефти сланцевых плевов на приемлемый уровень рентабельности.

2. Политическая напряженность на Ближнем Востоке и в Северной Африке сформировала новую концепцию Энергетической безопасности стран-импортеров нефти, в первую очередь США. Во главу угла была поставлена необходимость снижения энергетической зависимости от стран-экспортеров, что обеспечило на политическом уровне поддержку проектов по добыче нефти сланцевых плевов.

3. Расширение деятельности национальных нефтяных компаний добывающих стран и постепенное вытеснение ими западных компаний с месторождений стран Ближнего Востока, Латинской Америки, Африки

и бывшего СССР побудило транснациональные компании расширять свои портфели добычных проектов за счет новых источников⁶.

Сегодня сланцевая нефть – это перспективный, но до конца не оцененный источник жидких углеводородов, ее успех будет основываться на «трех китах»: эффективные технологии, высокая доходность и экология.

Технологии добычи

Углеводороды в сланцах находятся в твердом или в жидком состоянии в порах и трещинах коллектора, а добыча основана либо на мультстадийном гидроразрыве пласта (ГРП) (для нефти в жидком состоянии), либо на термических методах воздействия на пласт (как правило, для нефти, залегающей в твердом состоянии).

Технология добычи нефти низкопроницаемых пород мультстадийным ГРП стала применяться для нефтяных сланцевых плевов спустя несколько лет после начала разработки аналогичными методами сланцевого газа. Мульт-

тстадийный ГРП заключается в бурении наклонно-направленных скважин и применении в их горизонтальной части множественных разрывов. Суть процесса заключается в увеличении открытой проточной части продуктивного пласта и соединении этой области со скважиной, посредством создания путей с высокой проницаемостью. Это достигается закачкой жидкости, состоящей из воды, смешанной с активными компонентами и химическими добавками, а также расклинивающим наполнителем (Рисунок 1).

Методы выделения из сланца «синтетической нефти» подразумевают нагрев породы, до высоких температур либо непосредственно внутри пласта, либо на поверхности.

Поверхностный ретортинг подразделяется на три основных типа:

1. Непрямой ретортинг подразумевает переработку нефтяного сланца за счет нагрева, причем в качестве теплоносителя используется природный газ. Теплоноситель подается во

⁶ Нефть сланцевых плевов – новый вызов энергетическому рынку // Грушевенко Е., Грушевенко Д.

A - система извлечения и обработки

B - газ

C - нефть

D - вода

E - добычные/теплоперерабатывающие скважины

F - подготовка кипящей воды

G - топливо

H - воздух

I - сброс горячей воды

J - отработанные газы

K - бойлер

L - система нагревающих труб

M - четвертичные отложения

N - нефтяной сланец

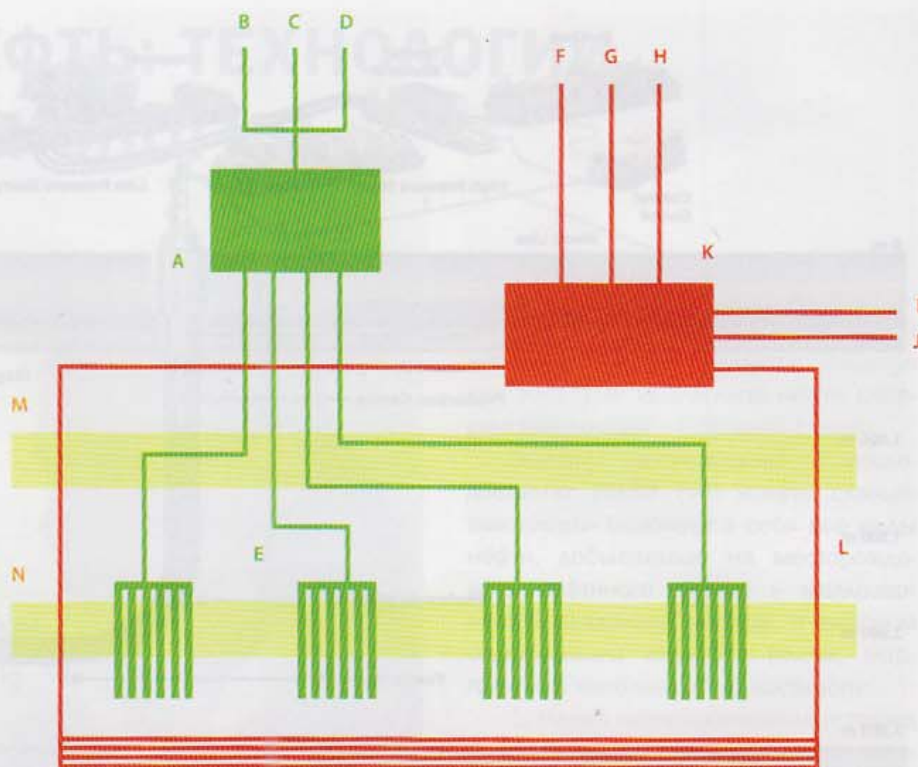


Рис. 2. EGL In-Situ Process

Источник: Сайт компании EGL (<http://www.eglolshale.com/>).

внешний контур реторты, нагревая находящиеся в ней куски породы.

2. Прямой ретортинг подразумевает под собой процесс, когда теплоноситель подается непосредственно в реторту, разогревая находящийся там сланец.

3. Смешанный (комбинированный) ретортинг подразумевает одновременную подачу теплоносителя в законтурное пространство реторты и непосредственный контакт теплоносителя со сланцевой породой. Наиболее популярный метод.

Внутрипластовый ретортинг, основанный на методах разрыва и термического воздействия на пласт появился только во второй половине первого десятилетия XXI века. Именно он позволил принципиально изменить экономику и экологию добычи сланцевой нефти. К наиболее известным методам внутрипластового ретортинга относятся:

• **Shell ICP.** Процесс основывается на постепенном нагреве изолированных сланцевых пластов в течение длительного времени (2–4 года) с использованием погружных электрических

нагревателей. За счет сравнительно низкой теплопроводности сланца и выстраивания вокруг нагреваемого контура «замораживающих стен» удается равномерно нагреть все сланцевые пласты до температуры 200 °С и начать практически переработку сланца внутри пласта⁷.

• **ExxonMobil Electofrac.** Модернизированный вариант классического ГПП, но построен на электролизных методах воздействия на пласт. Скважины заполняются электропроводящим флюидом, а пласт становится резистивным элементом цепи и нагревается под воздействием электричества. Таким образом, пласт становится естественным теплоносителем при внутрипластовом ретортинге содержащегося в нем керогена⁸.

• **AMSO EGL Technology.** Один из немногих примеров непрямого ретортинга внутри пласта. Она построена на замкнутой системе нагревательных труб, расположенных в глубине пласта в максимальной близости к сланцевой залежи (L). В качестве теплоносителей

могут быть использованы разогретые в бойлере (F) жидкие флюиды, в т.ч. нефтесодержащие, или водосодержащие. За счет нагрева от непрямого контура, содержащаяся в пласте сланцевая нефть (N) разогревается, разжижается и начинает поступать в сеть добычных скважин (E), обеспечивающих высокую температуру по всему пласту. Отработанные газы (J), образовавшиеся в результате термического разложения сланца поступают в бойлер и служат сырьем для нагрева теплоносителя⁹ (Рисунок 2).

В результате разработки нефти сланцевых пластов методами ГПП и внутрипластового ретортинга получают углеводородную смесь, не требующую какой-либо дополнительной обработки до отправки на НПЗ (так, нефть, добываемая на формации Green River соответствует качеству современного WTI, ее плотность равна 0,834 г/см³, а содержание серы не превышает 4%¹⁰).

Применяемые технологии добычи обуславливают как экономические, так и экологические особенности добычи нефти сланцевых пластов.

⁷ J.R. Covell, *Environmental Review of Selected Oil Shale Technologies*, National oil symposium, Golden, 2008

⁸ Bit Tooth Energy, *The Future of Oil Shale*, Techcorr, апрель 2010 (<http://www.techcorr.com/news/Articles/Article.cfm?ID=832>)

⁹ Сайт компании EGL (<http://www.eglolshale.com/>)

¹⁰ J. W. Bunger, P.M. Crawford, H.R. Johnson *Hubbert Revisited* – 5 *Oil&Gas Journal*, 2004

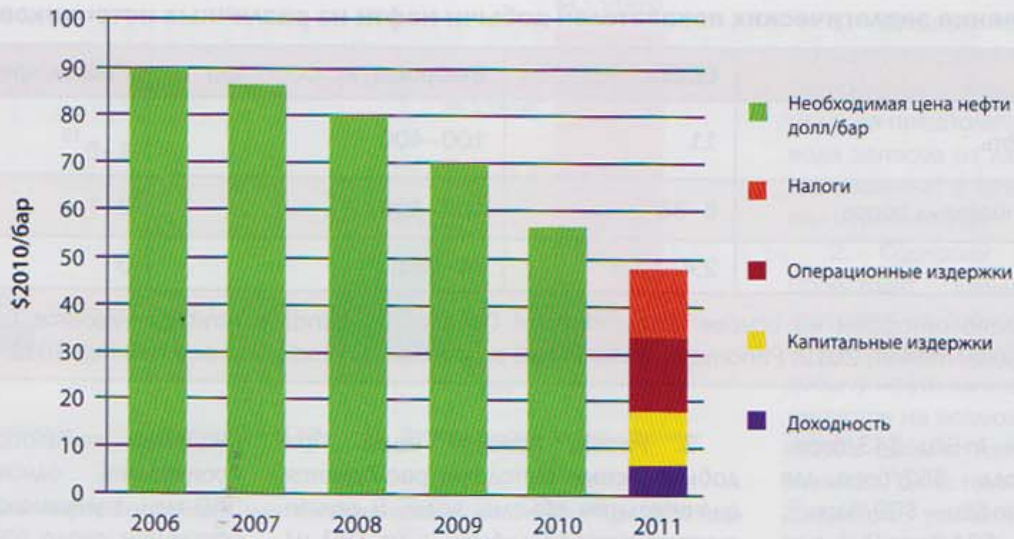


Рис. 3. Динамика изменения среднемировых «цен отсечения» для проектов по добыче нефти на сланцевых месторождениях внутрипластовыми методами

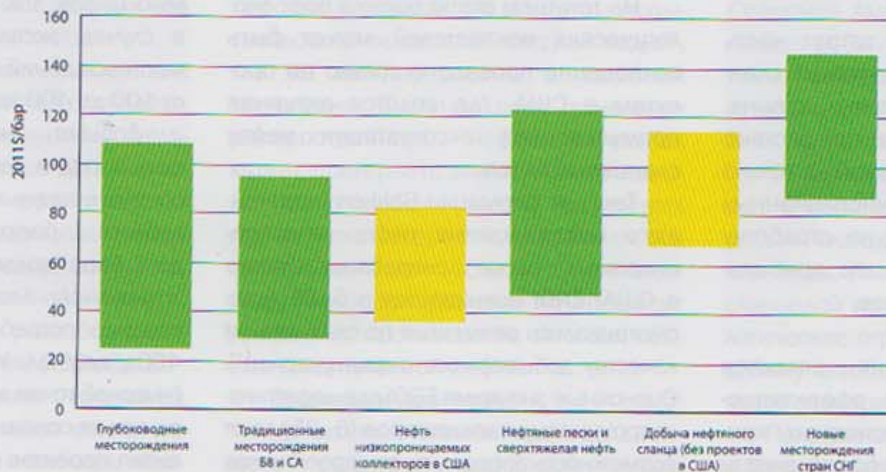


Рис. 4. Цены, необходимые для достижения рентабельности различных проектов по добыче нефти
Источник: Goldman Sachs 360 projects to change the World 2012

Экономический потенциал

Сегодня, наблюдается рост эффективности проектов по добыче с точки зрения динамики затрат и роста их прибыльности. Так, за последние несколько лет сильно изменились значения цен отсечения¹¹ (Рисунок 3).

Падение затрат обусловлено постепенной внедрением технологии мультистадийного ГРП и применением современных внутрипластовых методов нагрева, которые фактически позволяли проводить первичную подготовку и переработку нефти непосредственно «в пласте», тем самым снижая затраты на оборудование месторождения и переподготовку НПЗ.

Кроме динамики «цен отсечения» важно оценить конкурентоспособность по издержкам проектов по добыче нефти сланцевых плеев в сравнении с традиционной нефтью.

Стоит отметить некоторые особенности затрат для проектов по добыче нефти сланцевых плеев по сравнению с традиционной. Так, спецификой сланцевых проектов для методов, первичной переработки нефти в пласте (типа Shell ICP), является значительный интервал между началом обустройства месторождения до первой нефти (2–4 года), что увеличивает срок окупаемости по сравнению с аналогичными проектами по добыче традиционной нефти.

В проектах карьерной добычи сырье, получаемое на поверхности по своим физико-химическим свойствам значительно уступает в качестве традиционной нефти и требует дополнительного ретортинга для подготовки сырья к переработке на НПЗ. Это приводит к снижению доходности, по сравнению с более современными внутрипластовыми методами добычи. Однако все эти методы все равно остаются в диапазоне цен отсечения на позициях достаточных для того, чтобы конкурировать с проектами по добыче традиционной нефти.

В США в среднем издержки на добычу нефти низкопроницаемых коллекторов сланцевых плеев составляют:

¹¹ «Цена отсечения» (breakeven price в англоязычной литературе) – цена нефти на рынке, при которой проект по добыче становится экономически рентабельным. Цена отсечения включает в себя полные проектные издержки, включая все налоги, операционные и капитальные затраты, 15% рентабельность проекта, а так же транспорт нефти до магистрального нефтепровода (или другого объекта нефтетранспорта).

Таблица 1. Сравнение экологических показателей добычи нефти из различных источников

	EROI	Выбросы, кг. CO ₂ /барр.	Расход пресной воды, л
Традиционная нефть	11	100–400	1–5 ¹⁹
Нефть низкопроницаемых пород	6–35	100–400	2–7
Сланцевая нефть	2,4–15,8	74–285	3

Источник: составлено авторами на основе Government of Canada, Oil Sands a strategic resource for Canada, North America and the global market, 2012; Panorama, Water in fuel production Oil production and refining, 2011

для технологии True In-Situ \$43/барр., для карьерного метода – \$52/барр., для технологии Modified In-Situ – \$69/барр.¹², для технологии ICP – \$34/барр.^{13 14}, в то же время проекты в других регионах мира, например, в Аргентине доходят до \$115/барр. (Рисунок 4)¹⁵.

Благодаря снижению затрат, часть проектов по добыче из нефтяных сланцев, с экономической точки зрения, вполне имеет право на присутствие в портфеле активов компаний не только в качестве небольших инновационных проектов, направленных на отработку технологий, но и в качестве прибыльных, коммерческих активов.

Экология добычи

В центре внимания остаются вопросы экологической эффективности. Рассмотрим три основных критерия экологической эффективности проектов по добыче сланцевой нефти в сравнении с традиционной нефтью:

1. Энергетическая эффективность является основным фактором при оценке экологического потенциала производства любого источника энергии. Для ее оценки используется показатель Energy return on investment (EROI) – удельный показатель, определяющий какое количество единиц энергии можно получить, затратив 1 единицу энергии¹⁶.

2. Выбросы углекислого газа – немаловажный аспект, учитывая высокую степень «загрязнения» окружающей среды при добыче традиционной нефти.

3. Расход пресной воды. При добыче всеми методами расходуются значительные объемы воды. В случае внутрипластовой добычи – на ГПП и/или охлаждение, в случае с наружным ретортигом – на охлаждение реторт.

На текущем этапе оценка всех экологических показателей может быть полноценно проведена только по проектам в США, где ведется активная промышленная эксплуатация нефти сланцевых пластов.

Так, для формации Bakken (крупнейшего месторождения нефти низкопроницаемых пород разрабатываемого в США) EROI оценивается в 6–35 (рассматривались различные по сложности и качеству добываемого сырья участки)¹⁷. Оценочные значения EROI для нефти низкопроницаемых коллекторов (6–35) дают возможность определить эти проекты как энергетически эффективные. Добыча нефти из нефтяных сланцев энергетически менее эффективна, в сравнении с традиционной нефтью и нефтью низкопроницаемых пород. По оценкам различных организаций EROI варьируется от 2,4 до 15,8¹⁸, но даже такие показатели сохраняют добычу сланцевой нефти приемлемой (см. Таблица 1).

Энергетический институт Колорадо в тесном сотрудничестве с правительством США представил результаты расчетов, согласно которым инфраструктура добычных проектов, рассчитанных на добычу 660 млн. барр нефти низкопроницаемых коллекторов в год, будет производить одновременно более 350 млн. т углекислого газа в год. Это составляет около 5% от текущих годовых выбросов парниковых газов США (7,26 Гт CO₂), что является допустимой цифрой, так как объемы выбросов в случае эксплуатации традиционных месторождений в среднем составляют от 100 до 400 кг. CO₂ на барр.

Добыча нефти низкопроницаемых пород и сланцевой нефти связана со значительным расходом воды: для добычи 1 барр. нефти требуется от 2 до 7 барр. воды (от 317,8 до 1112,3 л). В крупном мегаполисе как Москва, среднее потребление воды составляет 400л/сут./чел. Именно вода, с технологической точки зрения, сегодня является одним из основных препятствий для развития проектов по добыче нефти низкопроницаемых пород в мире.

Проблема расхода пресной воды стала камнем преткновения для развития добычи нефти сланцевых пластов в Китае, Иордании, а так же в Калифорнии (США). Проблема замены мультистадийного ГПП на менее водозатратную технологию – сегодня является основной.

Для современных методов добычи эти показатели не столь катастрофичны, как для ГПП. В среднем, для всех видов ретортига они составляют 3/1 по отношению вода к нефти. Основной расход воды происходит при охлаждении повер-

Для современных методов добычи эти показатели не столь катастрофичны, как для ГПП. В среднем, для всех видов ретортига они составляют 3/1 по отношению вода к нефти. Основной расход воды происходит при охлаждении повер-

¹² M. Carolus, P. Crawford, H. Mohan, K. Biglarbigi, Economics, barriers, and risks of oil shale development in the United States, USAEE, 2008

¹³ В долларах 2010 года.

¹⁴ G. Parkinson, Oil shale: The US takes another look at a huge domestic resource, Sepmagazine, 2006

¹⁵ Нефть сланцевых пластов – новый вызов энергетическому рынку // Грушевенко Е., Грушевенко Д.

¹⁶ Murphy, D.J.; Hall, C.A.S. (2010). «Year in review EROI or energy return on (energy) invested». Annals of the New York Academy of Sciences 1185: 102–118. doi:10.1111/j.1749-6632.2009.05282.x

¹⁷ Средний EROI для добычи традиционной нефти равен 11, для природного газа – 10, для биотоплив, в районе 3.

¹⁸ J.R. Covell, Environmental Review of Selected Oil Shale Technologies, National oil symposium, Golden, 2008

¹⁹ В зависимости от степени истощенности месторождения

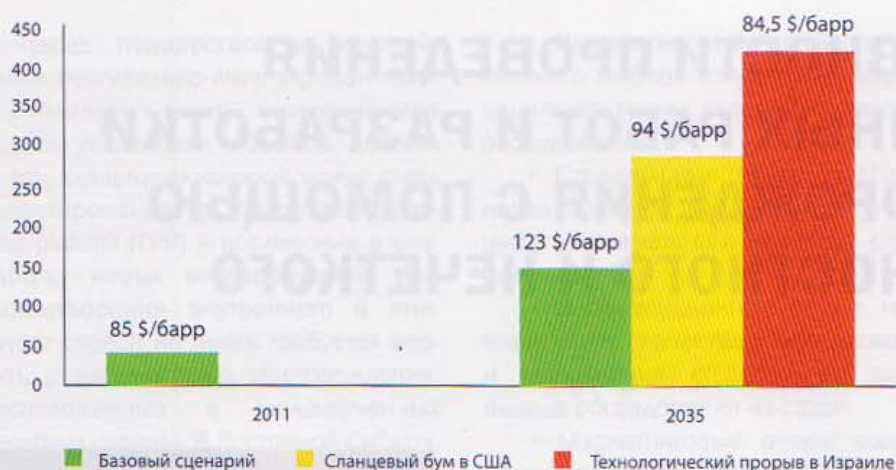


Рис. 5. Прогноз добычи нефтяных сланцев, млн. т и балансовые цены нефти²² до 2035 года

хностных реторт, или проведении ГРП. Так же значительные потери воды наблюдаются при повреждении грунтовых вод при разработке методами in-situ.

Таким образом среди экологических ограничений для всех нефтей сланцевых плеев основным и критическим является расход пресной воды. По показателям энергетической эффективности и выбросам CO₂ нефть сланцевых плеев в состоянии конкурировать с месторождениями традиционной нефти, а в отдельных случаях их разработка становится более экологичной (Таблица 1).

Значительные усилия компаний направлены на радикальное снижение затрат воды. Одним из наиболее перспективных проектов в этом направлении является разработка нефтяного плеча Шфела (Израиль). Инженеры компании-оператора IEL планируют применить принципиально новые методы извлечения нефти из керогена. На начальных этапах добыча будет вестись методами внутрислоевого добычи, а позже будет разработана технология, снижающая объемы воды, требуемые для добычи. Одной из основных целей пилотного проекта является именно разработка и апробация этой технологии уже к 2019–2020 гг. Такая технология позволит каким-то образом даже получать воду вместе с нефтью на подобных месторождениях.

Страны, имеющие значительные запасы нефти в низкопроницаемых породах и сланцах, но при этом испытывающие недостаток пресной воды²⁰, так же заинтересованы в подобной технологии. В случае если технология распространится, нефтяной рынок может претерпеть значительные изменения, а добыча нефти сланцевых плеев может возрасти до 418 млн. т в мире с нынешних 40 млн. т., при этом ущерб мировой экологии не превысит ущерба от производства того же объема традиционной нефти.

Выводы и прогнозы

На данный момент для дальнейшего развития сланцевой нефти объективно существует только один барьер – проблема высокого расхода пресной воды при ее добыче. Значительные затраты воды делают углеводороды сланцевых плеев недоступными для таких стран, как Китай, Иордания, Монголия, Израиль, где уже подтверждены значительные запасы сланцевой нефти.

Исходя из этого ограничения и потенциальной возможности его снятия при успешной апробации безводной технологии добычи нефти сланцевых плеев в ИНЭИ РАН были сформированы три сценария развития будущего нефти сланцевых плеев в нефтяной индустрии:

1. Базовый сценарий. Подразумевает под собой использование при сланцедобыче только текущих технологий и не предполагает массового перевода запасов из категории технически извлекаемых в категорию экономически извлекаемых

2. Сценарий «Сланцевый бум». Происходит дальнейшее снижение издержек на добычу сланцевой нефти, вплоть до 2015 года. США наращивают добычу нефти за счет сланцевых плеев, несмотря на возможные экологические угрозы добычи на подобных месторождениях. Цена на нефть снижается под влиянием увеличивающегося потенциала дешевых сланцев, что приводит к падению добычи на дорогих месторождениях Европы и стран СНГ, вся Северная Америка значительно увеличивает добычу нефти. К концу прогнозного периода США почти полностью отказываются от импорта нефти из всех стран, кроме Канады²¹.

3. Сценарий «Технологический прорыв в Израиле». Появляется технология добычи сланцевой нефти без расходования воды. После 2020 года для добычи сланцевой нефти везде снимаются экологические ограничения, а издержки на добычу снижаются, аналогично показателям сценария «Сланцевый Бум».

Показанные ниже сценарии добычи и балансовых цен на нефть (Рисунок 5) демонстрируют, что после 2020 года возникает наибольшая неопределенность, в первую очередь, в связи с разрабатываемой Израилем безводной технологии добычи сланцев (сценарий «Технологический прорыв в Израиле»).

Тем не менее, даже самый низкий сценарий добычи сланцевой нефти показывает, что на мировой рынок в скором времени, вероятнее всего, будет выведен значительный объем дешевой нефти и газового конденсата сланцевых плеев, которые вступят в конкурентную борьбу с дорогой нефтью традиционных месторождений, что окажет понижающее давление на мировые цены нефти. ■

²⁰ Китай, Иордания, Марокко

²¹ Более подробно эти сценарии рассмотрены в Прогнозе развития энергетики России и мира до 2035 года ИНЭИ/РЭА, под ред. А.А. Макарова, Л.М. Григорьева

²² Под балансовой ценой подразумевается та цена, при которой за счет добычи на традиционных и нетрадиционных месторождениях будет удовлетворяться спрос на нефть в прогнозном периоде (фактически – точка пересечения кривых спроса и предложения в конкретном периоде). Рыночные цены при этом могут значительно отличаться от балансовых под влиянием спекулятивных, геополитических и прочих факторов.