

УДК 622.83

Л. Л. Кауфман¹, Б. А. Лысиков²

¹ Массачусетский технологический институт, Бостон, США

² ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», Донецк, Украина

Опыт США добычи сланцевого газа

Представлены современные методологии оценки запасов сланцевого газа и новейшие технологии его добычи по сланцевым бассейнам США.

Ключевые слова: сланцевый газ, запасы, технология, гидроразрыв.

Природный газ играет важную роль в обеспечении энергетических запросов США и вместе с углем и нефтью составляет 85% в общем энергетическом балансе страны. Природный газ дает около 22% общего объема этих ресурсов. Ожидается, что это соотношение сохранится следующие 20 лет.

В США существуют различные методологии и классификационные системы, используемые для оценки запасов газа. По одной из них, представленной официально Комитетом газового потенциала (Potential Gas Committee), по состоянию на 01.01.2008 г. страна имеет запасы технически извлекаемого природного газа, оцениваемые в 73,25 трлн. м³, включая 6,7 трлн. м³ достоверных запасов с экономически целесообразными показателями добычи. Так называемый нетрадиционный газ (газ плотных песчаников, газ угольных пластов, сланцевый газ) составляет до 20% общих запасов природного газа - 13,96 трлн. м³ (извлекаемые запасы). Месторождения сланцевого газа показаны на рис. 1. Следует при этом иметь в виду, что исторические оценки запасов растут с течением времени, как результат улучшения знаний и технологических возможностей. Федеральное агентство EIA (Energy Information Administration – Информационная энергетическая администрация) прогнозирует, что к 2030 г. доля сланцевого газа в общей газовой продукции страны составит около 20%.

Цена сланцевого газа, например, в бассейне Marcellus к середине 2007 г. равнялась 283 долл. за 1000 м³, к середине 2008 г. она поднялась до 424 долл., но к середине 2010 г. упала до 141 долл.

До последних лет природный газ потреблялся в США темпами, превышающими собственную добычу. Однако в настоящее время этот разрыв преодолен за счет освоения месторождений нетрадиционного, в частности, сланцевого газа.

Первая скважина в сланцевую формацию США было пробурена в 1821 г. в городе Fredonia, штат New York. Газ использовался для освещения жилья. В течение 1920-х гг. был получен газ из сланцев Ohio в штате Kentucky. В 1930-х гг. газ добывался из сланцев Antrim в штате Michigan, однако, только в 1980-х гг. началось широкое распространение его добычи.

Решающим словом для развития добычи сланцевого газа стала комбинация бурения горизонтальных скважин и гидрорасчленения сланцев. До применения этой технологии ресурсы сланцевого газа серьезно не рассматривались, поскольку его добыча не считалась экономически приемлемой из-за низкой природной проницаемости сланцев.

В последние годы основную роль в добыче сланцевого газа играло месторождение Barnett в штате Texas. Технология гидрорасчленения сланцев здесь впервые применена в 1986 г., а в 1992 г. – пробурены первые горизонтальные скважины. Уроки, полученные при разработке этого месторождения, сейчас используются в других сланцевых бассейнах США – Fayetteville, Haynesville/Bossier, Marcellus, Antrim, New Albany, которые различаются спецификой освоения и имеют конкретные особенности разработки и эксплуатационные проблемы. Например, сланцы Antrim и New Albany в отличие от других бассейнов расположены на малой глубине и добыча в них связана с большими притоками воды. Развитие сланцев Fayetteville происходит в сельских районах севера штата Arkansas, тогда как сланцев Barnett – в городских и сельских районах штата Texas. В части бассейна Marcellus, расположенной в штате New York, имеются большие экологические проблемы размещения отходов бурения и гидрорасчленения.

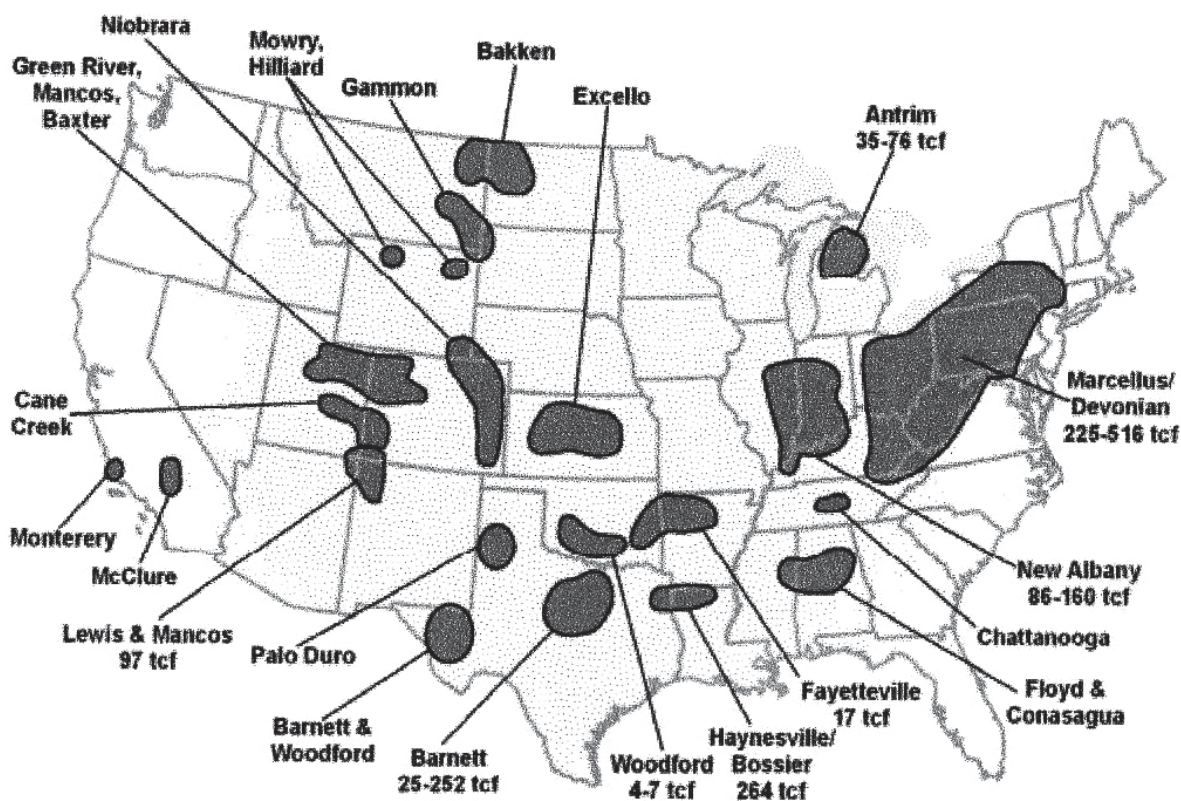


Рис. 1. Месторождение сланцевого газа США

Развитие добычи нефти и газа в США, включая сланцевый газ, регулируется комплексом федеральных, штатных и местных законов, которые определяют каждый аспект разведки и работ.

Агентство США по защите окружающей среды (U.S. Environmental Protection Agency) разрабатывает большинство стандартов, хотя работы на землях федеральной собственности регулируются преимущественно Бюро по земельному управлению (Bureau of Land Management), которое является частью Департамента внутренних дел (Department of Interior) и службы леса (U.S. Forest Service), входящей в Департамент сельского хозяйства (Department of Agriculture). Кроме того, каждый штат, где добываются нефть и газ, имеет одно (или более) собственное регулирующее агентство. К ним относятся, например, Департамент природных ресурсов (Department of Natural Resources) в штате Ohio или Департамент защиты окружающей среды (Department of Environmental Protection) в штате Pennsylvania. Наименование и структура местных агентств варьируются, но их функции очень схожи.

Основные характеристики основных сланцевых бассейнов США приведены в табл. 1.

Бассейн Barnett расположен в северо-центральной части штата Texas (Forth Worth Basin) и ограничен формациями известняка сверху и снизу. В бассейне за период 2004-2007 гг. в год бурились 815-1285 скважин. К настоящему времени в бассейне пробурено более 10 000 скважин. Примененная здесь технология горизонтального бурения и гидрорасщепления сланцев доказала свою работоспособность и позволила как расширить границы площади добычи газа, так и увеличить уровень этой добычи. Среднесуточная продуктивность бассейна находится в пределах 0,03-0,07 млрд. м³.

Бассейн Fayetteville расположен в северной части штата Arkansas и восточной части штата Oklahoma (Arkoma Basin) на глубине от 300 м до 2100 м, ограничен формациями известняка сверху и песчаника снизу. Развитие бассейна началось в ранних 2000-х гг. после успешного освоения бассейна Barnett. В бассейне за период 2004-2007 гг. в год бурились 13-432 скважины. Среднесуточная продуктивность бассейна находится в пределах 0,04-0,1 млрд. м³.

Бассейн Haynesville расположен в северной части штата Louisiana и восточной части штата Texas, он ограничен формациями песчаника сверху и известняка снизу. В 2007 г. после нескольких

лет бурения и испытаний бассейн приобрел значение потенциально значительного запаса, хотя его полные возможности станут известны только через несколько лет освоения и развития.

Бассейн Marcellus – наиболее обширный район сланцевого газа, охватывающий 6 штатов северо - востока США. Он ограничен сланцами сверху и известняком снизу. Вслед за повышением цен на газ, начавшимся с конца 1970-х гг. развитие бассейна продолжалось до середины 1980-х гг., но со снижением цен к 1990-м гг. оно замедлилось. Однако, с применением горизонтального бурения и гидрорасчленения в начале 2000-х гг. экономика добычи сланцевого газа улучшилась и сегодня бассейн интенсивно развивается. Здесь за последние годы бурились 800-1100 скважин/год. Среднесуточная продуктивность бассейна находится в пределах 0,03-0,1 млрд. м³. Несмотря на сравнительно низкое содержание метана в 1 т сланцев, большая площадь бассейна обеспечивает значительные запасы газа.

Таблица 1 - Сравнение ключевых характеристик бассейнов сланцевого газа США

Бассейн сланцевого газа	Barnett	Fayetteville	Haynesville	Marcellus	Woodford	Antrim	New Albany
Площадь бассейна, км ²	13000	23000	23000	240000	28000	30000	113000
Глубина, м	2000-2600	300-2100	3200-4100	1200-2600	1800-3400	200-700	150-600
Мощность, м	30-180	6-60	60-90	15-20	35-70	20-40	15-30
Содержание органического углерода, %	4,5	4-9,8	0,5-4	3,12	1-14	1-20	1-25
Общая пористость, %	4-5	2-8	8-9	10	3-9	9	10-14
Содержание газа, %	8,5-10	1,7-6,2	2,8-2,9	1,7-2,8	5,7-8,5	1,1-2,8	1,1-2,2
Приток воды, м ³ /сут	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных
Площадь на скважину, га	25-65	30-65	15-230	15-65	260	15-65	30
Геологические запасы, трлн.м ³	9,26	1,47	20,3	42,5	0,65	2,1	4,5
Извлекаемые запасы, трлн.м ³	1,25	1,18	7,1	7,4	0,32	0,57	0,54

Бассейн Woodford расположен в южной центральной части штата Oklahoma. Сланцы ограничены формациями известняка сверху и нерасчленяемых слоев сланца снизу. Добыча газа в бассейне началась в 2003-2004 гг. с помощью только вертикальных скважин. В настоящее время развивается бурение горизонтальных скважин. В бассейне за период 2004-2007 гг. в год бурились от 38 до 208 скважин. В целом бассейн находится на ранней стадии освоения и этим объясняется большая территория, приходящаяся на 1 скважину. Среднесуточная продуктивность бассейна составляет 0,07 млрд. м³.

Бассейн Antrim расположен в северной части полуострова Michigan (штат Michigan) и ограничен сланцами сверху и известняками снизу. После бассейна Barnett сланцы Antrim – наиболее разрабатываемое месторождение, начало освоения которого относится к поздним 1980-м гг. Бассейн существенно отличается от других месторождений США сланцевого газа малой глубиной и стратегической мощностью, большими объемами выделяемой воды. Здесь в период 2004-2007 гг. бурились 302-452 скважины в год. Суточная добыча бассейна находится в пределах 0,003-0,01 млрд. м³.

Бассейн New Albany расположен в юго-восточной части штата Illinois, юго-западной части штата Indiana и северо-западной части штата Kentucky. Подобно бассейну Antrim он расположен на сравнительно небольшой глубине и водонасыщен. Месторождение ограничено формациями известняка сверху и снизу. К настоящему времени пробурены более 600 скважин, их производительность находится в пределах 0,003-0,005 млрд. м³/сут.

В табл. 1 приведены запасы газа наиболее активно развивающихся сланцевых месторождений США. Следует иметь ввиду, что оценки запасов, особенно части, которая считается технически извлекаемой, с течением времени могут увеличиваться, благодаря новым разведочным ра-

ботам, опыту, полученному при разработке, пониманию характеристик газовых ресурсов, совершенствованию технологии добычи.

Кроме месторождений сланцевого газа, в США существуют бассейны, содержащие запасы газа и нефти. Примером такого бассейна служит Eagle Ford Shale, штат Texas, занимающий площадь 81 000 га. Месторождение включает слои мягкого известняка – мела и сланца общей мощностью примерно 76 м, залегающие на глубине 2,1-4,3 км. Предполагается, что запасы нефти бассейна эквивалентны 80 млрд. баррелей (12,7 млрд. м³), геологические запасы газа – 0,25 трлн. м³.

Далее более подробно описан опыт работы бассейна Marcellus.

Бассейн Marcellus представляет из себя черный сланец малой плотности, богатый органическими веществами. Его мощность возрастает от 12 м в Канаде до 270 м в штате Нью-Джерси, США. В пределах штата Pennsylvania, где в настоящее время (2009-2010 гг.) сосредоточена основная добыча, мощность сланца 15-240 м, средняя глубина его расположения - около 1,6 км с юго-западными и северо-восточными районами, расположенными ближе к поверхности (рис. 2). В бассейне бурятся вертикальные и горизонтальные скважины с тенденцией преобладания последних.

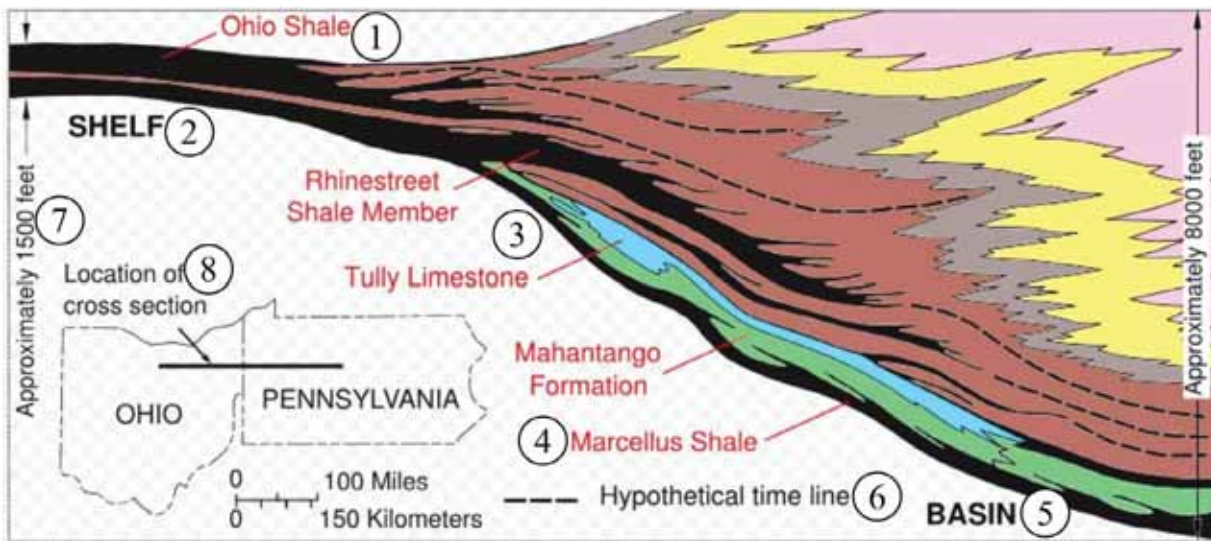


Рис. 2. Геологический разрез по бассейну Marcellus

1 – сланец Ohio, 2 - шельф, 3 – геологические формации, 4 – сланец Marcellus, 5 – бассейн, 6 – гипотетические границы геологических периодов, 7 – примерно 1500фут(450м), 8-- место разреза.

На рис. 3 показаны скважины, пробуренные в 2011 г. Производительность скважин показана на рис. 4.

Добыча сланцевого газа связана с большим потреблением пресной воды. Другим ключевым фактором развития работ является создание необходимой инфраструктуры.

Еще одна статья затрат бассейна Marcellus – необходимость строительства газоперерабатывающих установок. Газ бассейна имеет высокую влажность и в его состав входят углеводороды – пропан, этан, бутан и другие более тяжелые газы. Эти продукты, составляющие около 15% общей добычи, должны быть удалены так, чтобы очищенный метан принимался транспортирующей или распределяющей компаниями.

Очищенный газ направляется далее в магистральные газопроводы. В штате Pennsylvania их пропускная способность в настоящее время не адекватна прогнозируемой добыче газа и поэтому должна быть увеличена. Магистральные газопроводы имеют диаметр 1,0-1,2 м и располагаются рядами по 5–6 линий. Многие из них закольцованы так, что их отдельные секции могут быть изолированы и служить емкостями на случай пиковых нагрузок.

Давление газа в трубопроводе создается компрессорными установками, которые в сельских районах содержат от 10 до 16 единиц машин турбинного или поршневого типа мощностью от 50 до 80 тысяч л.с. и приводятся в действие природным газом. В городских районах для снижения шума компрессоры работают на электричестве. Расстояние между компрессорными станциями составляет от 60 до 160 км. При подходе к потребителю давление газа снижается с 1,4-3,4 МПа до 13,8 КПа.

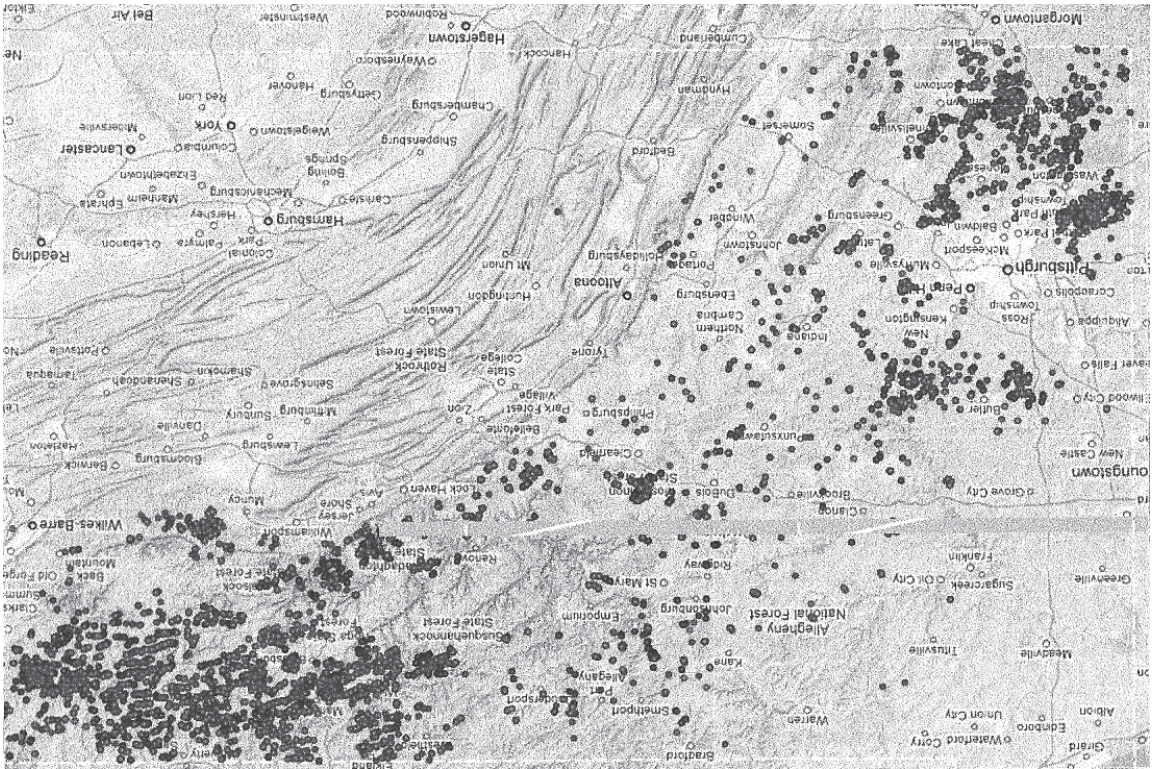


Рис. 3. География развития работ по бурению скважин в 2011г

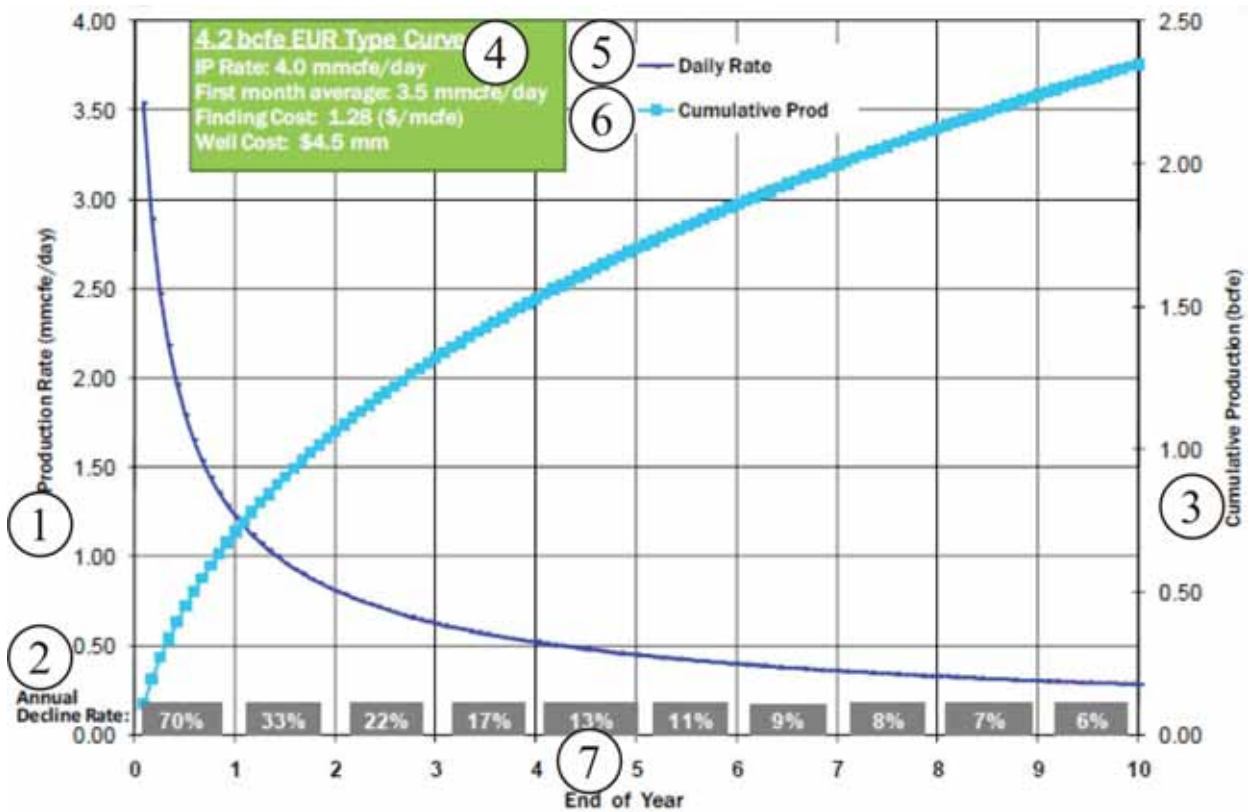


Рис. 4. Производительность горизонтальных скважин бассейна Marcellus
 1 – производительность, млн.ft.³/сут (1млн.ft.³ = 28,3 тыс.м³), 2 – годовой темп уменьшения производительности, %, 3 – кумулятивная производительность (млрд.ft.³), 4 – общие извлекаемые запасы – 4,2 млрд.ft.³, 5 – суточный темп добычи, 6 – кумулятивная производительность, 7 – конец года.

При получении права на работы и разрешений природоохранных агентств согласовываются источник воды, необходимый для бурения, места и условия сброса сточных вод (обратного потока). Из-за глубины залегания сланца Marcellus потребности в пресной воде составляют от 7,5 тыс. м³ до 38 тыс. м³ на скважину. Вода охлаждает буровое долото, создает пульпу для удаления измельченных пород (буровой мелочи), а также используется для гидрорасчленения сланца.

Выбранная для бурения скважины площадка очищается и выравнивается. К ней строятся дороги. Владельцы земли получают компенсации за используемую и поврежденную при этом лесную или сельскохозяйственную территорию. После завершения бурения и начала получения газа площадка рекультивируется и приводится к начальному состоянию.

Стоимость бурения и гидрорасчленения для типичной горизонтальной скважины в бассейне Marcellus составляет 3,5-4,5 млн. долл., вертикальной – 0,8 млн. долл. По данным 5 работающих здесь компаний основной объем газа поступает по скважине в первые 5-10 лет работы. Среднегодовая продукция горизонтальной скважины составляет более 14,2 млн. м³ в течение первого года работы и 7,1 млн. м³ в течение второго года. После 8 лет работы средняя годовая добыча близка к 2,8 млн. м³, а после 30 лет – к 0,85 млн. м³. Вертикальные скважины имеют похожую форму кривой падения добычи, но производительность, составляющую менее 30% производительности горизонтальной скважины. В настоящее время в бассейне Marcellus используются оба вида скважин.

После окончания добычи скважины заполняются цементом и перекрываются.

Далее приводятся результаты вариантного анализа возможного развития бассейна Marcellus. Анализ основан на показателях работы 2009 г, когда в штатах Pennsylvania и West Virginia работы существенно расширились – были пробурены 1122 скважины, добыча газа и жидких углеводородов увеличилась до более, чем 17 млн. м³ в газовом эквиваленте. Общая стоимость дополнительного валового продукта в этих двух штатах выросла на 4,8 млрд. долл., как результат производственной деятельности бассейна, прирост рабочих мест составил более 57357, сумма местных, штатных и федеральных налогов – 1,7 млрд. долл.

Из-за непостоянства требований к объемам поставок необходимо хранение газа. Обычно для этой цели используются соляные шахты, отработанные газовые или нефтяные скважины, геологические формации. Условия штата Pennsylvania не позволяют применить такой способ хранения и поэтому газ размещается в неработающих газопроводах или наземных металлических емкостях. Газ может также храниться в сжиженном виде.

Добыча сланцевого газа включает последовательность операций: аренду земли, разведку недр, определение необходимости числа и мест расположения скважин, бурение и гидрорасчленение, строительство инфраструктуры и газоперерабатывающих установок. Продолжительность каждой из этих операций различна. Составление специфических документов аренды занимает несколько недель, разведка часто выполняется в течение теплых летних месяцев. Продолжительность бурения может варьироваться в зависимости от условий рынка и в бассейне Marcellus занимает обычно от 6 до 10 недель. Строительство сборной газопроводной системы и перерабатывающих установок требует до 2 лет в зависимости от объема поставок, экономических и инженерных соображений.

Будущее сланцевого бассейна Marcellus зависит от изменений состояния экономики, политики, изученности геологии. На перспективы развития бассейна воздействуют несколько источников неопределенности: общая налоговая политика, производственные затраты, рыночная стоимость газа.

Для определения перспектив бассейна Marcellus рассматривались три сценария его развития (табл.2).

Таблица 2 - Сценарии экономического развития бассейна Marcellus

Показатели	Пессимистический R/W=42,48млн.м ³			Вероятный R/W=56,63 млн. м ³			Оптимистический R/W=72,29 млн. м ³		
	2011	2015	2020	2011	2015	2020	2011	2015	2020
Число пробуренных скважин	1447	1605	1738	2436	2970	3216	2727	3918	4842
Добыча газа, млн.ft ³	1581	2734	4036	2178	6015	9519	2986	10173	18212
Прирост стоимости (value added), млн.долл	6329	7835	8788	10424	14166	16247	11952	18833	24798
Налоги, млн.долл	1473	1839	2085	2418	3388	3942	2794	4601	6236
Рабочие места	72160	90120	101975	118078	158408	184007	135939	211683	282716

Развитие бассейна Marcellus будет иметь значительное воздействие на экономику штатов, добывающих газ. Сдача в аренду земли и недр, разведочные работы, бурение и другие технологические операции напрямую создают новые высокооплачиваемые рабочие места и косвенно стимулируют их создание в поддерживающих отраслях промышленности. Добыча газа увеличивает валовый продукт штата, его доходы и получаемые налоги, направляемые на социальные нужды населения.

Библиографический список

1. Arthur J. An overview of modern shale gas development in the United States [Электронный ресурс] / J.Arthur. – Режим доступа: [http://www.all-llc.com/publicdownloads/ALLShale Overview.FINAL.pdf](http://www.all-llc.com/publicdownloads/ALLShale%20Overview.FINAL.pdf).
2. Arthur J. Considerations for development of Marcellus shale gas [Электронный ресурс] / J.Arthur. – Режим доступа: <http://www.all-llc.com/publicationloads/W00709Arthur.pdf>.
3. Considine T. The economic impact of the Marcellus shale [Электронный ресурс] / T.Considine. – Режим доступа: <http://www.api.org/policy/exploration/hydraulic/fracturing/upload/API%20/Economic%20impact%20Marcellus%20Shale.pdf>.
4. Gas well drilling and development Marcellus shale [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.srbc.net/whatsnew/docs/MarcellusShaleandGasWellDrillingPowerpoint061208.pdf>.
5. Gaudlip T. Marcellus shale development process [Электронный ресурс] / T.Gaudlip. – Режим доступа: <http://files.dep.state.pa.us/PublicParticipation/Citizens%20Advisory%20Council/lib/cac/Marsellus>.
6. Impact on community character of horizontal drilling and high volume hydraulic fracturing in Marcellus shale and other low permeability gas reservoirs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nyserda.org/publications/03%20-Chapter%203%20%20NTS%202009-9-16.pdf>.
7. Introduction to Marcellus shale natural gas development [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cce.cornell.edu/Community/Documents/PDFs/CCE-NatGasRoadshow-Jul28-AGI.pdf>.
8. Modern shale gas development in the United States: a primer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://fossil.energy.gov/programs/oilgas/publications/naturalgas_general/shale_gas.
9. Potential development of the natural gas resources in the Marcellus shale [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.eesi.psu.edu/news_events/EarthTalks/2009Spring/materials2009spr/NatParkService-GRD-M-Sh.
10. Soeder D. Water resources and natural gas production from the Marcellus shale [Электронный ресурс] / D. Soeder. – Режим доступа: <http://pubs.usgs.gov/fs/2009/3032/pdf/FS2009-3032.pdf>.
11. Sumi L. Shale gas: focus on the Marcellus shale [Электронный ресурс] / L. Sumi. – Режим доступа: <http://www.earthworksaction.org/pubs/OGAPMarcellusShaleReport-6-12-08.pdf>.
12. Welcome to Marcellus-shale.us [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.marcellus-shale.us>.

Надійшла до редакції 10.02.2012

Л. Л. Кауфман¹, Б. О. Лисіков²

1 Массачусетський технологічний інститут, Бостон, США

2 ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Донецьк, Україна

Досвід США у видобуванні сланцевого газу

Представлені сучасні методології оцінки запасів сланцевого газу і новітні технології його видобутку по сланцевим басейнам США.

Ключові слова: сланцевий газ, запаси, технології, гідророзрив.

L. Kaufman¹, B. Lisikov²

1 Massachusetts Institute of Technology, Boston, USA

2 Donetsk national technical university, Donetsk, Ukraine

Experience in shale gas exploration in USA

Presented current evaluation methodology of shale gas and new technologies of its production to the U.S. shale basins.

Keywords: shale gas reserves, technology fracturing.