
ПРИРОДА И ОБЩЕСТВО

В. В. КЛИМЕНКО, А. Г. ТЕРЕШИН

СЛАНЦЕВЫЙ ГАЗ – ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ЧУДО ИЛИ КЛИМАТИЧЕСКАЯ КАТАСТРОФА?*

В статье исследованы глобальные и региональные ресурсные и экологические проблемы развития добычи и использования нетрадиционного газа. Показано, что несмотря на неопределенность в оценках экономической и экологической целесообразности добычи сланцевого газа, по имеющимся ресурсным оценкам, его использование способно решить ряд региональных энергетических (замещение импорта) и экологических (замещение более «грязного» угольного топлива) проблем. Вместе с тем освоение колоссальных мировых ресурсов этого вида топлива может существенным образом отразиться на химическом и тепловом радиационном балансе атмосферы планеты, причем климатический эффект выбросов диоксида углерода при сжигании нетрадиционного газа значительно превосходит последствия от утечек метана при его добыче.

Ключевые слова: нетрадиционный газ, ресурсы, добыча, сжигание, эмиссия диоксида углерода и метана, изменения атмосферы и климата.

Введение

Первые полтора десятилетия XXI века ознаменовались сразу несколькими знаковыми событиями в массо- и энергообмене системы «человек – природа»:

* Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 12-08-00367, 13-08-00872).

1) впервые после нефтяных кризисов 1970-х гг. отмечены чрезвычайно высокие темпы роста мирового энергопотребления – 2,6 % в год (в две предыдущие декады – 1,9 и 1,3 % соответственно) (ВР... n.d.);

2) впервые после 1965 г. уголь возвратил себе первое место в ряду важнейших энергоносителей (5,33 млрд т у. т.¹ в 2011 г.), завершив полувековую эру нефти (потребление в 2011 г. 5,25 млрд т у. т.) (ВР... n.d.);

3) впервые за 200 лет индустриальной истории энергопотребление развивающихся стран начиная с 2008 г. превышает уровень экономически развитых государств (*Ibid.*);

4) ежегодные антропогенные выбросы углекислого газа приблизились к критическому значению в 10 млрд т (в пересчете на углерод) (*Ibid.*);

5) среднегодовая концентрация углекислого газа в атмосфере достигла небывалого за последние 3 млн лет рубежа в 400 млн⁻¹;

6) повышение среднглобальной температуры воздуха по сравнению с доиндустриальным периодом вплотную подошло к рубежу в 1 °С (Climatic... 2013), беспрецедентному в контексте позднего голоцена (последние шесть тысяч календарных лет).

Эти события с новой силой напоминают, что перед цивилизацией стоят серьезные вызовы.

1) Располагает ли планета достаточным количеством природных ресурсов для современной бурно развивающейся энергетики?

2) Не приведет ли безостановочный рост антропогенной нагрузки на климатическую систему к губительным последствиям для всей цивилизации?

Однако для формирования объективной картины современного мира необходимо отметить, что в течение последней декады обозначились и некоторые ободряющие обстоятельства:

1) возобновляемые источники энергии, не связанные с выбросами диоксида углерода, демонстрируют максимальные темпы ро-

¹ Тонна условного топлива (т у. т.) – единица измерения энергии, эквивалентная 29 308 кДж (теплота сгорания тонны высококачественного угля).

ста среди прочих видов энергии (в 2000–2009 гг. – 12 % в год, а за последние три года – 18 %!) (BP... n.d.);

2) впервые за последние 30 лет зафиксирован отрицательный декадный тренд изменения глобальной температуры (Climatic... 2013).

Еще одно крупное событие, последствия которого для человечества пока еще недостаточно изучены, произошло в мировой энергетике: речь идет о так называемой «сланцевой революции» – стремительном росте добычи природного газа из нетрадиционных источников – сланцевых пород, а также угольных шахт и др. Так, в США – лидере освоения нетрадиционных ресурсов газа – всего за несколько лет производство нетрадиционного газа достигло почти половины от общей национальной ежегодной добычи (U.S. Energy... 2013), позволив стране занять первое место в мире по производству газового топлива, опередив Россию. Несмотря на множество неясных вопросов, связанных с промышленным использованием этого ресурса (в первую очередь экономических и экологических), многие страны ведут работы по освоению месторождений сланцевого газа (СГ) и утилизации шахтного метана. Особенностью СГ является то, что его запасы распределены по миру довольно равномерно, что позволяет многим странам-энергоимпортерам (Польша, Украина, Турция) надеяться на обретение большей энергетической, а порой и политической, независимости. Не будет преувеличением сказать, что вот уже несколько лет мир пребывает в состоянии «сланцевой эйфории», которая, впрочем, в основном поразила правительственные, политические и бизнес-круги.

По оценкам специалистов (Mohr, Evans 2011), эти процессы скоро окажут существенное влияние на структуру будущего мирового топливного баланса. В свою очередь изменения в объеме и характере мирового энергопотребления отразятся на масштабах антропогенного воздействия на атмосферу и климат. Настоящая работа посвящена анализу глобальных ресурсных и экологических проблем, связанных с увеличением объемов добычи нетрадиционного газа (НГ).

Ресурсы нетрадиционного газа

К нетрадиционным источникам газа относят газовые скопления, где газ находится в сорбированной или водорастворенных формах, либо в низкопроницаемых и глубокозалегающих коллекторах (Перлова 2010). Если технология промышленной добычи газа не определена, то он относится к нетрадиционным по технологическим критериям или же по экономическим, если стоимость добычи существенно превышает рыночную цену.

Мировые ресурсы газа нетрадиционных источников колоссальны и составляют не менее 4000 трлн м³, что как минимум в 10 раз превышает ресурсы традиционного газа. Их распределение по видам представлено в табл. 1.

Таблица 1

Ресурсы нетрадиционного газа (НГ)

| Источник НГ | Ресурсы, трлн м ³ |
|--------------------------------|------------------------------|
| Газовые гидраты | 2500–21000 |
| Угольные пласты | 200–250 |
| Коллекторы глубокого залегания | 200–350 |
| Низкопроницаемые коллекторы | 180–220 |
| Сланцы | 380–420 |

Источник: Перлова 2010.

Большая часть НГ заключена в газовых гидратах. Как видно из табл. 1, мировые ресурсы гидратного метана чрезвычайно велики, но определены в настоящее время весьма приблизительно с точностью до двух порядков.

Россия, значительную часть территории которой занимает вечная мерзлота, имеет благоприятные условия для существенных запасов газогидратов, что было отмечено советскими учеными еще в 40-х гг. XX в. (Соловьев 2003). В 1960-е гг. были обнаружены первые месторождения газовых гидратов на севере СССР. Примером добычи газа из гидратов может служить разработка Мессояхского месторождения в Сибири, начавшаяся в 1969 г., когда, по мнению специалистов, впервые удалось извлечь природный газ непосредственно из гидратов.

По оценке специалистов ООО «Газпром ВНИИГАЗ», в России ресурсы гидратного газа составляют около 400 трлн м³ и находятся на севере Европейской территории и Сибири. Огромные газогидратные месторождения расположены на шельфе морей Северного Ледовитого океана.

Существенную часть нетрадиционных источников газа составляет угольный метан, бóльшая часть которого находится в форме твердого раствора с углем.

Существовавшая ранее технология добычи газа из угольных пластов из-за низкого дебита не позволяла добывать газ целенаправленно и использовать его для газоснабжения населения и промышленности. Положение несколько изменилось в последние годы с развитием (и некоторым удешевлением) техники горизонтального бурения и многоступенчатого гидроразрыва пластов (ГРП).

Разные виды угля содержат различное количество метана. В бурых углях его содержится мало, а в антрацитах – много, однако проницаемость последних существенно ниже. В России наиболее перспективны для добычи газа угли Воркутинского и Кузнецкого бассейнов, недавно организована опытно-промышленная добыча угольного газа на Талдомской площади Кузбасса.

Не останавливаясь специально на газах низкопроницаемых кол-лекторов и глубоких горизонтов, рассмотрим более подробно сланцевый газ, к которому в последние годы приковано особенно пристальное внимание не только в экономических, но и в широких политических кругах разных стран.

Ресурсы сланцевого газа

Сланцевый газ (СГ) – это разновидность природного газа, сосредоточенного в коллекторах, расположенных в толще сланцевого слоя. Запасы отдельных газовых коллекторов невелики, но они огромны в совокупности, что диктует необходимость появления специальных технологий добычи.

Оценки запасов сланцевого газа по регионам мира и странам из разных источников значительно отличаются, что не в последнюю

очередь объясняется конъюнктурными и политическими соображениями.

Недавний отчет, подготовленный Управлением энергетической информации США (Energy Information Administration – EIA) (International... 2011), исключил из рассмотрения запасы сланцевого газа в России, обладающей значительными ресурсами традиционного газа, и богатые углеводородами страны Ближнего Востока. Помимо этого не учитывались и запасы угольного метана. Общемировые извлекаемые запасы газа в мире – и традиционного, и нетрадиционного – составили, по расчетам EIA, 640 трлн м³, из которых 40 %, что равно в численном выражении 256 трлн м³, приходится на сланцевый газ. При подсчете запасов принимались во внимание только перспективные с точки зрения добычи сланцевого газа формации высокого качества. Эксперты EIA отмечают, что разведочное бурение позволит в будущем уточнить запасы, учитывая такие параметры, как поступление газа из скважин и площадь, на которой удастся производить добычу.

Пригодные для промышленной добычи запасы СГ в мире (без стран СНГ и части стран Азии) оцениваются более скромной цифрой – в 187 трлн м³ (245 млрд т у. т., что в два раза меньше запасов традиционного газа). Однако в отличие от традиционного сланцевый газ довольно равномерно распространен по всей планете, что, безусловно, повышает его привлекательность в качестве местного энергетического ресурса. Его запасы в Северной Америке оцениваются в 54,7, в Южной Америке – 34,3, в Африке – 29,5, в Азии (главным образом, в Китае) – в 39,8 трлн м³. В Европе запасы сланцевого газа оцениваются в 18 трлн м³ (23 млрд т у. т.). По оценкам Министерства экономического развития России, добыча нетрадиционного газа в Европе к 2030 г. может составить 15 млрд м³ в год (около 20 млн т у. т.) и, конечно, ни в малейшей степени не сможет повлиять ни на газовый, ни тем более на общий энергетический баланс региона. В этой связи уместно напомнить, что ежегодное потребление газа в Европе (без России) превышает 820 млн т у. т.

Как отмечается в отчете EIA (International... 2011), большинство сланцевых месторождений находятся там, где наблюдается недостаток традиционных источников, в частности в Китае, Южной Африке и Европе. Поэтому только в некоторых странах, например во Франции (оценочные запасы – 5,1 трлн м³), Польше (5,3 трлн м³), Турции, Украине и ЮАР, СГ мог бы составить значительную долю в национальном энергобалансе. Отдельно отмечено, что в ЮАР сланцевый газ может использоваться для выработки сжиженного газа.

Изменить объем экспорта российского газа могла бы добыча СГ у ближайших европейских соседей – Польши и Украины. Но насколько реально такая перспектива?

Недавно Польша существенно сократила оценку извлекаемых запасов СГ в недрах страны, что следует из опубликованного в марте 2012 г. отчета Польского института геологии. Теперь извлекаемые запасы СГ в стране оцениваются в 365–768 млрд м³, что значительно ниже оценок EIA. Учитывая, что потребление газа в Польше составляет примерно 15,4 млрд м³ в год (ВР... n.d.), страна теоретически может заместить весь импорт газа внутренним производством на несколько десятилетий. Вместе с тем в энергетике Польши традиционно велика доля угля, который в перспективе должен хотя бы частично замещаться более «чистым» природным газом. Поэтому даже при росте собственной добычи сланцевого газа Польша, скорее всего, продолжит импортировать природный газ. Таким образом, следствием добычи собственного СГ может стать разве что диверсификация источников импорта природного газа и уменьшение импорта из России.

Тем не менее интерес к польскому газу велик. К 2012 г. Польша выдала более сотни лицензий на его разведку. Однако первые 20 скважин, пробуренные на польских сланцевых месторождениях, не дали положительных результатов, поэтому ажиотаж вокруг польского сланцевого газа существенно спал. Акции нескольких

независимых компаний, специализирующихся на европейском сланцевом газе, упали с начала прошлого года на 70 %. Однако 20 скважин – это ничтожно мало для того, чтобы делать ответственные заключения о польских перспективах в этой области. Для сравнения: только на одном крупнейшем американском сланцевом месторождении Барнетт пробурено 13 700 скважин.

Государственная геологическая служба Украины недавно повысила свою оценку запасов сланцевого газа до 12,5 трлн м³, в то время как Геологическая служба США сообщала всего о 1,9 трлн м³. В настоящее время Украина импортирует из России 40 млрд м³ (Газпром... 2012) природного газа в год, что в три с половиной раза больше польского импорта, и ставит задачу добиться в течение 10 лет роста добычи сланцевого газа до 13 млрд м³; но даже если страна отважится на такой объем производства пока еще очень дорогого, технологически не слишком удобного и экологически рискованного продукта, она не сможет полностью освободиться от российских газовых поставок.

В России основными месторождениями сланцевого газа являются Прибалтийская, Прибайкальская, Волжско-Печорская, Забайкальская и Оленекская платформы, а общие геологические ресурсы сланцевого газа, по оценкам ООО «Газпром ВНИИГАЗ», могут составить довольно скромные 6–8 трлн м³. Ряд авторов дает более оптимистические оценки – до 20 трлн м³, что лишь незначительно меньше, чем суммарные оценки тех же авторов для Европы и Китая (International... 2011). Однако следует иметь в виду, что сегодня определяющими моментами в использовании этого нового природного ресурса являются не столько его запасы, сколько экологическая безопасность и стоимость добычи. В этой связи полезно взглянуть на опыт США, признанного пионера в области сланцевых технологий.

В настоящее время США занимают первое место не только по разведанным запасам, но и по добыче СГ. В 2012 г. общая добыча газа в США составила 651,3 млрд м³ (U.S. Energy... 2013), причем более 40 % приходилось на нетрадиционные источники (метан из угольных пластов и сланцевый газ). Доля СГ в общем объеме

всего горючего газа постоянно увеличивается, что уже привело к существенному перераспределению мирового рынка газа между странами и образованию избыточного предложения на рынке к началу 2010 г. В результате роста добычи сланцевого газа ранее построенные в США терминалы по импорту сжиженного газа, которые оставались бездействующими, в настоящее время активно переоборудуются для экспорта, который, на наш взгляд, может носить весьма ограниченный характер, поскольку страна и в ближайшие 10–15 лет все-таки будет оставаться нетто-импортером газа. Уровень добычи СГ в США (без угольного метана) к 2011 г. вырос до 150 млрд м³ в год (*Ibid.*).

Совершенно иное положение с добычей СГ складывается на другой стороне Атлантики. Хотя ряд стран Евросоюза и заявил о намерении добывать газ из сланца, очень скоро эти заявления были подвергнуты серьезной критике со стороны экологов. Последние уверены в непоправимом ущербе, который наносит окружающей среде гидроразрыв пласта, сопровождающий добычу сланцевого газа. Поэтому от добычи уже отказалась Франция, сделав ставку на свою атомную энергетику, приостановили работы по разведке Венгрия и Чехия, а в Болгарии сильны общественные протесты. Из государств, намеренных продолжать попытки добывать газ из сланца, остается Польша, где заявления о подобном способе добычи делают преимущественно политики, Украина, где вопрос тоже имеет серьезную политическую подоплеку, а также Литва, которая надеется на компанию Chevron, получившую разрешение на разведку месторождений сланцевого газа на литовской территории (U.S. Energy... 2013).

В России не ведется даже опытной добычи СГ, что совсем не удивительно при наличии огромных запасов традиционного природного газа, стоимость добычи которого сейчас как минимум в 4–5 раз ниже.

Экологические аспекты добычи и использования сланцевого газа

Для последующего анализа полезно отметить особенности технологии добычи СГ. О том, что в сланцах есть газ, было известно с начала XIX в. Однако эта порода отличается плотностью и низкой проницаемостью, а газ залегает в небольших изолированных «карманах». Первая коммерческая газовая скважина в сланцевых пластах была пробурена в США еще в 1821 г. около г. Фридония в штате Нью-Йорк Уильямом Хартом, который считается в США «отцом природного газа». Инициаторами масштабного производства сланцевого газа в США являются Джордж П. Митчелл и Том Л. Уорд.

Однако только в 70-е гг. XX в., во время энергетического кризиса, правительство США в поисках новых источников топлива профинансировало исследования, связанные с разработкой сланцевых месторождений. Были проведены разведочные работы, в ходе которых выявлены четыре огромные сланцевые структуры – Barnett, Haynesville, Fayetteville и Marcellus, простирающиеся на десятки тысяч квадратных километров и, по-видимому, содержащие гигантские запасы газа. Однако на тот момент эти резервы оказались недоступными, а разработка соответствующих технологий добычи была приостановлена после падения цен на нефть в 80-х гг.

Промышленная добыча СГ стала возможна только после появления новых технологий (Дмитриевский, Высоцкий 2010: 44–47). Современная технология добычи сланцевого газа подразумевает бурение одной вертикальной скважины и нескольких горизонтальных скважин длиной до 2–3 км. В скважины закачивают смесь песка, воды и химикатов, потом в результате гидроудара разрушаются стенки газовых коллекторов, и доступный газ откачивается на поверхность. Процесс горизонтального бурения проводится посредством инновационной методики сейсмического моделирования 3D GEO, которая предполагает сочетание геологических исследований и картирования с компьютерной обработкой данных, включая визуализацию. Как и в других газовых месторождениях, газ, естественно, мигрирует из области высокого давления в область низкого давления, поэтому технология газодобычи основана на создании областей с переменным давлением.

Теоретическая база технологии гидроразрыва пласта была разработана еще в Советском Союзе в 1953 г. академиком С. А. Христиановичем совместно с Ю. П. Желтовым в Институте нефти АН СССР.

Масштабное промышленное производство сланцевого газа было начато компанией Devon Energy в США на месторождении Barnett Shale, где она в 2002 г. впервые пробурила горизонтальную скважину. Десятилетний опыт эксплуатации скважин в Barnett Shale, Fayetteville Shale, Marcellus Shale, Haynesville Shale совершенно определенно обозначил следующие проблемы:

- технология гидроразрыва пласта требует крупных запасов воды вблизи месторождений, для одного гидроразрыва используется смесь воды (7 500 тонн), песка и химикатов. В результате вблизи месторождений скапливаются значительные объемы отработанной загрязненной воды, которая не утилизируется добытчиками с соблюдением экологических норм;

- как показывает опыт разработки Barnett Shale, сланцевые скважины имеют гораздо меньший срок эксплуатации, чем скважины обычного природного газа;

- формулы веществ для осуществления гидроразрыва в компаниях, добывающих сланцевый газ, являются закрытыми. По отчетам экологов, добыча сланцевого газа приводит к значительному загрязнению грунтовых вод толуолом, бензолом, диметилбензолом, этилбензолом, мышьяком и др. Известно, что некоторые компании используют соляно-кислотный раствор, загущенный с помощью полимера, причем только для одной операции гидроразрыва используется 80–300 т химикатов;

- при добыче сланцевого газа происходят значительные утечки метана в атмосферу, что приводит к усилению парникового эффекта;

- добыча сланцевого газа рентабельна только при наличии устойчивого спроса и высоких цен на газ.

Химическая смесь компании Halliburton составляет около 1,53 % от общего объема раствора и включает соляную кислоту, формальдегид, уксусный ангидрид, пропаргилловый и метиловые спирты, хлорид аммония. Компания Chesapeake Energy использует

свой состав химической смеси, но ее объем в гидрорастворе гораздо меньше – 0,5 %. В целом газодобывающими компаниями для добычи газа используется около 85 токсичных веществ.

Существуют и другие экологические проблемы, связанные с добычей сланцевого газа, в первую очередь обусловленные утилизацией отработанной жидкости после гидроразрыва пласта (ГРП). Кроме воды и песка, в ее состав входят разнообразные химические добавки для повышения эффективности ГРП, что вызывает опасность загрязнения грунтовых вод. Научно подтверждена повышенная вероятность микроземлетрясений в местах, где производился ГРП, а также в местах, где отработанная жидкость закачивается в подземные полости, например на утилизацию. К более долгосрочным и наименее изученным проблемам относится возможность утечек газа в атмосферу на этапе строительства и эксплуатации скважины. По оценкам ряда исследователей (Howarth *et al.* 2011), при добыче сланцевого газа утечки в атмосферу могут составлять 4–8 % газоотдачи, что намного больше, чем при добыче традиционного газа.

С другой стороны, использование СГ вместо угля позволяет значительно уменьшить вредные выбросы от ТЭС в атмосферу, так как при сжигании СГ практически не образуется SO_2 , а удельные выбросы оксидов азота NO_x в два раза ниже, чем при сжигании угля. Однако при расчете экологического эффекта важен объем выбросов по полной цепочке производства, и здесь преимущество газа значительно уменьшается, поскольку утечки метана, являющегося чрезвычайно сильным парниковым газом, при его добыче и транспортировке значительно усиливают суммарный парниковый эффект. При размере утечек в верхнем интервале существующих оценок (около 8 % выхода газа) газовая электростанция на СГ по суммарным выбросам становится аналогичной современным угольным электростанциям, использующим угольную пыль.

Имеются крайне противоречивые оценки для экономических показателей добычи СГ. Пионером в добыче сланцевого газа США является компания Chesapeake Energy, которая регулярно публикует свои основные показатели финансовой деятельности в свобод-

ном доступе. Анализ показателей компании показывает, что фактическая себестоимость добычи СГ в 2008 г. составила 192,6 долларов США за тыс. м³. Однако, по мнению экспертов, реальные затраты на получение сланцевого газа еще выше и составляют 212 долларов США за тыс. м³. Некоторые специалисты полагают, что компании, осуществляющие добычу сланцевого газа, искусственно занижают его себестоимость.

Пока же отмечено, что по состоянию на начало августа 2012 г. стоимость добычи сланцевого газа на американских месторождениях находилась в диапазоне 130–260 долларов за тыс. м³, а в Канаде – 140–230 долларов США за тыс. м³. Вместе с тем цены на газ в регионе находятся на уровне около 100 долларов США за тыс. м³ (U.S. Energy... 2013). По данным Газпрома, средняя стоимость газа для потребителя составляла в 2011 г. около 92 долларов США за тыс. м³, но это в три с половиной раза меньше, чем перед началом «сланцевой революции» в 2008 г.

Однако существует и иная точка зрения. Дело в том, что сланцевый газ бывает «сухим» (без примесей) и «мокрым» (с газовым конденсатом, содержащим этан или бутан). Этот конденсат широко используется в производстве пластика, и цены на него выше, чем на сам газ, так что маржу добывающим компаниям приносит в основном именно он. Таким образом, продажа попутно извлекаемых компонентов делает добычу СГ рентабельной даже при низких внутренних ценах. А вот добыча сухого газа в текущих условиях пока нерентабельна.

Тем не менее правительство США вполне удовлетворено нынешними низкими ценами на газ, ведь это именно то, в чем сейчас нуждается американская экономика для стимулирования ее роста. Поэтому сланцевые проекты активно поддерживаются государством. Низкая стоимость заимствований стимулирует инвестиции в газовые скважины, несмотря на низкие отпускные цены для потребителя. Кроме того, американские энергетические компании серьезно рассчитывают на экспорт газовой продукции и технологий добычи как средство повышения рентабельности. К тому же нынешний беспрецедентно низкий уровень внутренних цен сохранит-

ся, по-видимому, недолго и начиная уже с нынешнего года сменится устойчивым повышением со скоростью 2,5 % в год.

Нетрадиционный газ и глобальные изменения атмосферы и климата

К сожалению, при обсуждении экологических проблем добычи СГ почти всегда имеют в виду лишь региональные аспекты, связанные с отчуждением значительных территорий и загрязнением подземных вод. Между тем СГ и другие виды нетрадиционного газа (угольный метан, газ плотных формаций) представляют собой колоссальный резервуар углерода, поступление которого в атмосферу способно серьезно изменить его глобальный баланс и привести к большим изменениям в климатической системе. Именно этим проблемам посвящен данный раздел.

В своих прогнозах производства нетрадиционного газа мы исходили из оценок его запасов, представленных в таблице 2, где для сравнения также показаны результаты наших недавних расчетов (Клименко, Терешин 2010), учитывающих только запасы традиционного газа. Очевидно, что введение в оборот нетрадиционных источников резко повысит роль газа в мировой энергетике, причем пик общей ежегодной добычи в обновленном сценарии повышается с 5,5 до 10 млрд т у. т. и смещается во вторую половину XXI столетия (рис. 1). Таким образом, даже в конце нынешнего столетия общая добыча газа все еще будет превышать современную, а полное исчерпание запасов наступит лишь к концу XXII в. Газ станет главной составляющей мирового энергобаланса уже к началу 2030-х гг.

Таблица 2

Характеристики сценариев добычи природного газа

| Сценарий | Запасы, Гт у. т. | | | Ожидаемый пик добычи | | | | | |
|------------------------|------------------|----|-------|----------------------|---------------|-----|---------------|-------|---------------|
| | | | | Трад. ПГ | | НГ | | Всего | |
| | Трад. ПГ | НГ | Всего | год | Гт у. т./ год | год | Гт у. т./ год | Год | Гт у. т./ год |
| Клименко, Терешин 2010 | 490 | | 490 | 2045 | 5,8 | | | 2045 | 5,8 |

| | | | | | | | | | |
|------------------|------|------|-----|------|---|------|-----|------|------|
| Настоящая работа | 490* | 420* | 910 | 2045 | 6 | 2075 | 5,5 | 2065 | 10,0 |
|------------------|------|------|-----|------|---|------|-----|------|------|

Источник: International... 2011.

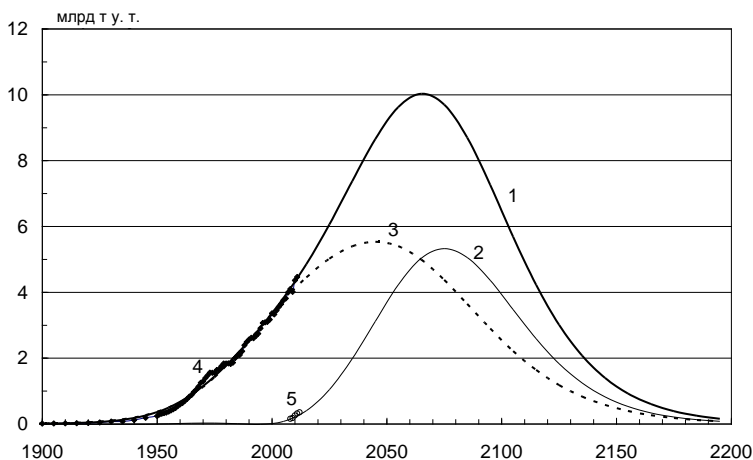


Рис. 1. Объемы добычи природного газа: прогнозная оценка настоящей работы – суммарная добыча (1), в том числе нетрадиционного газа (2), оценка добычи традиционного газа из (Клименко, Терешин 2010) (3) и данные энергетической статистики (BP... n.d.; U.S. Energy... 2013; International... 2011) по общему производству (4) и добыче из нетрадиционных источников (5)

Однако с точки зрения возможных изменений состава атмосферы и климата важной является эмиссия диоксида углерода при сжигании не только газа, но и всех видов ископаемого топлива, которая зависит от общего энергопотребления и структуры мирового энергобаланса. В основу приведенных здесь расчетов положен генетический прогноз энергопотребления, подробно описанный в наших работах (Klimenko, Tereshin 2010) и доказавший свою способность давать весьма полезные результаты в долгосрочных прогнозах. Этот прогноз предполагает стабилизацию мирового потребления энергии на уровне примерно в 30 млрд т у. т. к концу нынешнего столетия с преобладанием доли источников, не связанных со сжиганием ископаемого топлива (в основном нетрадицион-

ных и возобновляемых источников [НВИЭ] – солнечных, ветровых, гидро- и биоэнергетических). Долгосрочный прогноз *структуры* энергобаланса, как показывает практика, представляет собой гораздо более сложную задачу, и поэтому здесь рассматриваются два его крайних сценария и еще один промежуточный, когда весь объем нетрадиционного газа используется для:

- 1 – замещения угля;
- 2 – замещения НВИЭ;
- 3 – замещения угля и НВИЭ в равных долях.

Результаты расчетов, представленные на рис. 2, показывают, что реализация сценария 3 дает эволюцию будущих выбросов углерода, по сути, тождественную так называемому «историческому» сценарию, последствия которого подробно обсуждались в недавних работах (Klimenko, Tereshin 2010; Хрусталеv и др. 2008; Аржанов

и др. 2012) и могут быть квалифицированы как вызывающие определенную озабоченность масштабом предстоящих климатических изменений. Замещение угля нетрадиционным газом приводит к скорому, в течение двух десятилетий, достижению пика эмиссии углекислого газа в пересчете на углерод на уровне немногим выше 9 Гт С/год, в то время как замена НВИЭ газом повышает этот пик почти до 12 Гт С/год и смещает его во вторую половину текущего столетия.

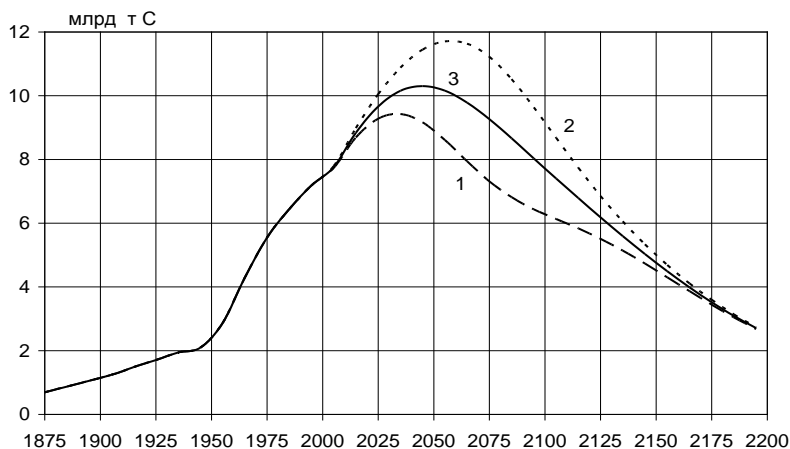


Рис. 2. Эмиссия CO_2 (в пересчете на углерод) при сжигании органического топлива по сценариям 1–3 (см. текст)

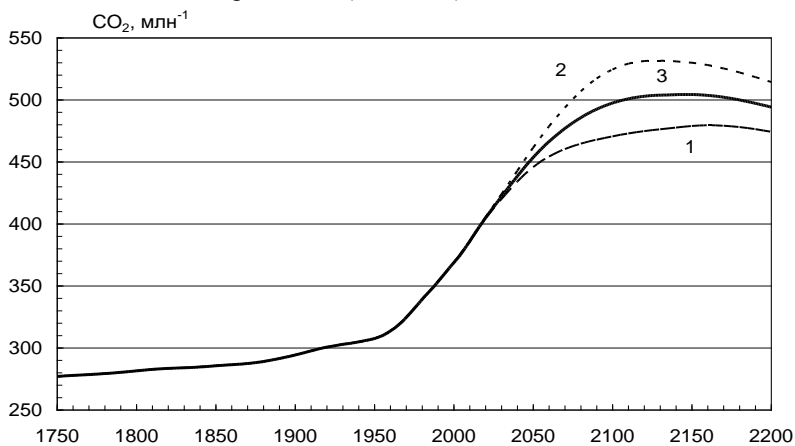


Рис. 3. Модельные расчеты изменения атмосферной концентрации CO_2 по сценариям эмиссии 1–3 (см. текст)

Глобальный цикл углерода при различных сценариях освоения нетрадиционных резервов газа претерпевает довольно значительные изменения, что отражается на ходе концентрации углекислого газа в атмосфере (рис. 3) и температурной реакции климатической системы (рис. 4).

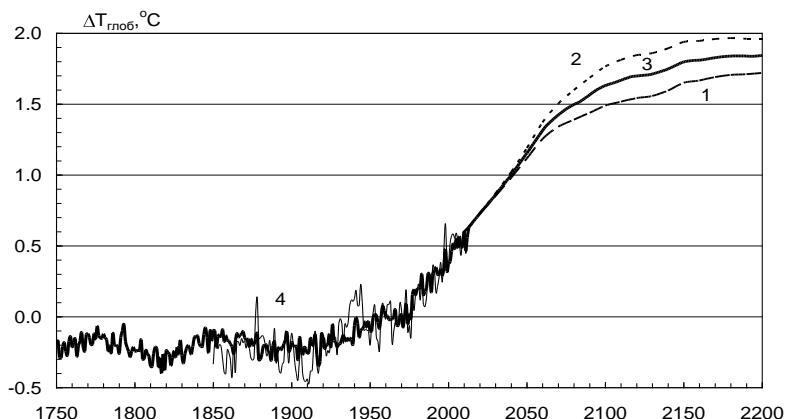


Рис. 4. Модельные расчеты изменения среднелобальной температуры воздуха (относительно среднего значения за 1951–1980 гг.) по сценариям эмиссии 1–3 (см. текст)

Расчеты глобальных изменений атмосферной концентрации CO_2 выполнены О. В. Микушиной с помощью боксово-диффузионной модели углеродного цикла, температуры приземного воздуха – регрессионно-аналитической модели климата, разработанных в НИУ МЭИ (Клименко и др. 1997).

Как уже говорилось, настоящее время извлечение СГ сопряжено со значительными его утечками в атмосферу, достигающими 4–8 % от объемов добычи (Howarth *et. al.* 2011), что значительно выше, чем при добыче традиционного природного газа. Высказываются серьезные опасения, что поступление в атмосферу такого количества метана, парниковый потенциал которого в 25 раз превосходит потенциал углекислого газа, может значительно усилить глобальное потепление. По нашим расчетам в предположении, что технологические утечки составляют 6 % от объемов добычи, максимальный выброс метана в атмосферу от добычи НГ достигнет в 2050–2120 гг. 100–200 млн т/год, или 10–15 % от общей интенсивности всех его источников. Это действительно приведет к некоторому увеличению концентрации метана в атмосфере и повышению его радиационного форсинга в этот период примерно на 10 % по

сравнению с базовым вариантом (Клименко, Терешин 2010). Однако же в течение XXII столетия в связи со спадом добычи НГ и соответствующих утечек метана, а также небольшим временем жизни этого парникового газа содержание метана в атмосфере вернется к базовому варианту. Вклад дополнительных выбросов метана в температурный сигнал мы оцениваем в *несколько сотых градуса*.

Частичное замещение угля нетрадиционным газом в мировом энергобалансе приводит к заметному смягчению антропогенного воздействия на климатическую систему и отодвигает ее от критических рубежей в 500 млн^{-1} по концентрации CO_2 и 2°C повышения температуры по сравнению с доиндустриальной эпохой. Напротив, замедление темпов роста НВИЭ и сохранение нынешней ориентации на ископаемые виды топлива является чрезвычайно опасным, поскольку еще до конца нынешнего столетия сначала концентрация, а затем и температура превышают указанные критические рубежи и остаются за ними по крайней мере в течение двух-трех столетий. В таких условиях неизбежно существенное повышение кислотности верхнего слоя океана, что повлечет за собой массовую гибель значительной части морской биоты, и в первую очередь кораллов (Knowlton 2001; Hoegh-Guldberg *et al.* 2007). Это будет означать разрушение экономики многих развивающихся стран, основанной на туризме и прибрежном рыболовстве. Далее, длительное повышение температуры на величину более 2°C (что всего на $1,2^\circ\text{C}$ выше современного) делает почти неизбежным частичное разрушение Гренландского ледового щита и всех малых материковых оледенений, существенное, не менее чем на 2 м, повышение среднего уровня Мирового океана (Oppenheimer, Alley 2005; Jevrejeva *et al.* 2011), повышение региональных уровней моря до 3 м (Meuysignac, Cazenave 2012) и, наконец, заметное ослабление океанической циркуляции в Северной Атлантике.

Выводы:

1. Сохраняется неопределенность в оценках экономической и экологической целесообразности добычи сланцевого газа, снижающая привлекательность этого вида топлива.

2. Если верны имеющиеся ресурсные оценки, то использование нетрадиционного природного газа, в первую очередь сланцевого, способно решить ряд региональных энергетических (замещение импорта) и экологических (замещение более «грязного» угольного топлива) проблем.

3. Нетрадиционный газ нельзя считать «дополнительным» источником энергии, способным обеспечить прирост энергопотребления. Для сохранения устойчивости глобальной климатической системы освоение колоссальных мировых ресурсов нетрадиционного газа должно сопровождаться эквивалентным сокращением использования угля.

Благодарности

Авторы выражают благодарность О. В. Микушиной за проведение расчетов и А. О. Морозовой за подбор информации.

Литература

Аржанов, М. М., Елисеев, А. В., Клименко, В. В., Мохов, И. И., Терешин, А. Г. 2012. Оценки климатических изменений в Северном полушарии в XXI веке при альтернативных сценариях антропогенного воздействия. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана* 48(6): 643–654.

Газпром. Годовой отчет 2011. М.: ОАО «Газпром», 2012.

Дмитриевский, А. Н., Высоцкий, В. И. 2010. Сланцевый газ – новый вектор развития мирового рынка углеводородного сырья. *Газовая промышленность* 8: 44–47.

Клименко, В. В., Клименко, А. В., Андрейченко, Т. Н., Довгалоук, В. В., Микушина, О. В., Терешин, А. Г., Федоров, М. В. 1997. *Энергия, природа и климат*. М.: Изд-во МЭИ.

Клименко, В. В., Терешин, А. Г. 2010. Мировая энергетика и глобальный климат после 2100 г. *Теплоэнергетика* 12: 38–44.

Перлова, Е. В. 2010. Коммерчески значимые нетрадиционные источники газа – мировой опыт освоения и перспективы для России. *Территория «Нефтегаз»* 11: 46–51.

Соловьев, В. А. 2003. Природные газовые гидраты как потенциально полезное ископаемое. *Российский химический журнал* 48(3): 59–69.

Хрусталеv, Л. Н., Клименко, В. В., Емельянова, Л. В., Ершов, Э. Д., Пармузин, С. Ю., Микушина, О. В., Терешин, А. Г. 2008. Динамика состояния многолетнемерзлых пород в зоне островной мерзлоты в условиях глобального изменения климата. *Криосфера Земли* XII(1): 3–11.

BP Statistical Review of World Energy. June 2012. URL: <http://www.bp.com/statisticalreview>

Climatic Research Unit, University of East Anglia 2013. URL: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>

Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J. et al. 2007. Coral Reefs under Rapid Climate Change and Ocean Acidification. *Science* 318(5857): 1737–1742.

Howarth, R. W., Santoro, R., Ingraffea, A. 2011. Methane and Greenhouse Gas Footprint of Natural Gas from Shale Formations. *Climatic Change Letters*. DOI 10.1007/s10584-011-0061-5.

International Energy Outlook 2011. U.S. Energy Information Administration Washington, DC, USA: EIA.

Jevrejeva, S., Moore, J. C., Grinsted, A. 2011. Sea Level Projections to AD 2500 with a New Generation of Climate Change Scenarios. *Global and Planetary Change* 80–81(1): 14–20.

Klimenko, V. V., Tereshin, A. G. 2010. World Energy and Climate in the Twenty-first Century in the Context of Historical Trends: Clear Constraints to the Future Growth. *Journal of Globalization Studies* 1(2): 27–40.

Knowlton, N. 2001. The Future of Coral Reefs. *Proceedings of the National Academy Sciences* 98(10): 5419–5425.

Meysignac, B., Cazenave, A. 2012. Sea Level: A Review of Present-day and Recent-past Changes and Variability. *Journal of Geodynamics* 58: 96–109.

Mohr, S. H., Evans, G. M. 2011. Long Term Forecasting of Natural Gas Production. *Energy Policy* 39: 5550–5560.

Oppenheimer, M., Alley, R. B. 2005. Ice Sheets, Global Warming, and Article 2 of the UNFCCC. *Climatic Change* 68(3): 257–267.

U.S. Energy Information Administration 2013. URL: <http://www.eia.gov/>