



**ЭКОНОМИЧЕСКИЙ
И СОЦИАЛЬНЫЙ СОВЕТ**

Distr.
GENERAL

ENERGY/WP.3/GE.5/2005/7
29 October 2004

RUSSIAN
Original: ENGLISH/RUSSIAN

ЕВРОПЕЙСКАЯ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ КОМИССИЯ

КОМИТЕТ ПО УСТОЙЧИВОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Рабочая группа по газу

Специальная группа экспертов по поставкам и использованию газа
Шестая сессия, 20 января 2005 года
(Пункт 7 предварительной повестки дня)

**ОСНОВНЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ, ИМЕЮЩИЕ ОТНОШЕНИЕ
К ДОБЫЧЕ ГАЗА И ПОДЗЕМНОМУ ХРАНЕНИЮ НЕФТИ И ГАЗА**

Подготовлен делегацией Российской Федерации

Примечание секретариата: Настоящий документ подготовлен в соответствии с решением, принятым на пятой сессии Специальной группы экспертов (ENERGY/WP.3/GE.5/2004/2, пункт 8 e)), состоявшейся в Женеве в январе 2004 года, для рассмотрения на шестой сессии Специальной группы экспертов по поставкам и использованию газа.

Просьба изучить этот документ и направить ваши замечания по адресу: Российская Федерация, 123182, Москва, пл. Курчатова 1, ПОДЗЕМГАЗПРОМ, Генеральному директору г-ну В. СМИРНОВУ. Тел.: +7 095 196 75 24, факс: +7 095 196 1704, электронная почта: smirnov-vi@mail.ru

1. Разработка газовых, газоконденсатных и нефтяных месторождений, строительство и эксплуатация подземных хранилищ газонефтепродуктов, как и любые горные работы, сопровождаются изменением напряженного состояния, деформированием и сдвижением вмещающих и перекрывающих породных массивов, т.е. геомеханическими процессами. Геомеханические процессы являются причиной формирования дополнительных эксплуатационных нагрузок на конструкции скважин, образования в породном массиве зон повышенной проницаемости и трещиноватости (т.е. дополнительных каналов миграции флюидов), смещений земной поверхности. Характер и интенсивность развития геомеханических процессов во многом определяют экологическую и промышленную безопасность объектов добычи, подземного хранения и транспорта углеводородного сырья, продуктов его переработки.

2. Говоря об основных задачах геомеханики, возникающих при добыче газа, газового конденсата и нефти и подземном хранении газообразных и жидких углеводородов, целесообразно вначале остановиться на различиях между *геомеханикой* и *геодинамикой*, так как в последнее десятилетие происходит явная, сознательная или нет, но подмена этих двух понятий.

3. *Геодинамика* - наука о глубинных процессах, возникающих в результате эволюции Земли как планеты и определяющих движение масс вещества и энергии внутри Земли и в ее твердой оболочке. Эти глубинные процессы недоступны непосредственному изучению, и об их природе можно судить только по их проявлениям в близповерхностных структурах земной коры с привлечением различного рода теоретических построений, концепций и гипотез, носящих глобальный характер (например, гипотеза о неподвижности материков и противоположная ей гипотеза о дрейфе континентов, приводящие к различным интерпретациям проявлений глубинных процессов). Когда говорят о геодинамике в связи с добычей полезных ископаемых, то, как правило, имеют в виду одно из ее направлений - региональную геодинамику, изучающую взаимодействия литосферных плит и результаты их проявлений в пределах конкретных территорий земной поверхности. Но даже в рамках этого, достаточно узкого направления, интерпретация геодинамических проявлений и, что особенно важно, их прогноз невозможны без привлечения глобальных теорий и гипотез.

4. В отличие от геодинамики, *геомеханика* изучает процессы деформирования и разрушения горных пород и породных массивов в результате техногенного воздействия на недра при добыче полезных ископаемых, строительстве и эксплуатации подземных сооружений различного назначения. Объектом изучения геомеханики является породный массив, непосредственно примыкающий к подземному сооружению или вовлекаемый в сдвиге при добыче полезного ископаемого или эксплуатации подземного хранилища. Таким образом, размеры рассматриваемых в геомеханике участков породного массива могут

достигать нескольких десятков километров, тогда как в региональной геодинамике объектом изучения являются области земной коры в пределах территорий с размерами в несколько тысяч километров и более. Геомеханика тесно связана геологией и инженерной геологией, геофизикой и др. науками о Земле. Если это возможно, геомеханика использует в качестве исходных данных результаты геодинамических исследований, например, данные о современном напряженном состоянии породных массивов в различных регионах Земли. В свою очередь, и геодинамика использует результаты геомеханических исследований, например, данные о напряженном состоянии породного массива, полученные в результате испытаний скважин на гидроразрыв. Кроме того, геомеханика связана с техническими дисциплинами - с технологией эксплуатации месторождений, строительства и эксплуатации подземных сооружений, а также со строительной механикой. Так как геомеханика учитывает и производственные факторы, она в этом смысле является более широкой дисциплиной, чем геодинамика, однако по масштабу изучаемых объектов уступает последней, так как изучает локальные области породного массива. Таким образом, геомеханика и геодинамика, являясь достаточно близкими направлениями науки, ставят и решают, по существу, различные задачи.

5. Какие же научно-технические задачи может и должна решать геомеханика в связи с разработкой газовых, газоконденсатных и нефтяных месторождений и подземным хранением газо- и нефтепродуктов?

а) Первой и одной из основных научно-технических задач, решаемых геомеханикой, является количественная оценка механических свойств и начального напряженного состояния породного массива, в том числе пород пластов-коллекторов, которые в качестве исходных данных должны использоваться при решении всех последующих задач, связанных не только с геомеханическими, но и гидрогазодинамическими процессами. В идеале, уже перед разработкой месторождения или сооружением подземного хранилища необходимо иметь площадное и глубинное распределение количественных показателей свойств и состояния массива в пределах горного отвода. Основная трудность при решении этой задачи заключается в том, что получить такого рода оценки для массива в его начальном (ненарушенном) состоянии невозможно: определение механических характеристик пород выполняется сегодня в лабораторных условиях на керновом материале, а единственным прямым методом оценки начального напряженного состояния массива является метод гидроразрыва в скважине. Т.е. и в том и другом случаях необходимо бурение скважин, которое вызывает перераспределение существующих в массиве напряжений, развитие процессов деформирования и разрушения, которые могут изменить состояние и свойства керна и пород вблизи стенок скважины. Таким образом, для получения достоверных оценок свойств и состояния породного массива необходимы как разработка новых методов определения оценки свойств и состояния пород в ненарушенном массиве, так

и совершенствование методического обеспечения существующих методов в плане интерпретации получаемых результатов с учетом геомеханических процессов, происходящих при бурении геологоразведочных скважин.

б) Другая геомеханическая задача имеет целью своего решения прогноз и обеспечение устойчивости скважин, причем устойчивость в данном случае понимается в более широком смысле слова как сохранение подземным сооружением своих эксплуатационных качеств в течение заданного срока службы. Эта задача возникает уже на стадии бурения скважин, которое, как уже говорилось выше, сопровождается перераспределением напряжений в массиве, процессами деформирования и разрушения стенок скважин и прилегающих пород. В зависимости от свойств пород, состояния массива и свойств бурового раствора, процессы деформирования и разрушения могут проявляться в кавернообразовании на стенках скважин, в их оваллизации и заплывании, а также трещинообразовании на стенках в результате гидроразрыва пород, что негативно сказывается на технико-экономических показателях бурения, приводит к неудовлетворительному качеству последующей цементации, другим нежелательным последствиям, вплоть до аварийных ситуаций. Одним из способов управления состоянием стенок скважин и близлежащих пород при бурении является надлежащий подбор плотности бурового раствора. Простое увеличение плотности глинистого раствора не решает проблему, так как помимо экономических аспектов («граммы» плотности стоят недешево), существуют еще и соображения технического порядка, заставляющие использовать растворы с минимально возможной плотностью (циркуляция раствора, производительность бурения, возможные потери глинистого раствора в трещинах гидроразрыва при его высокой плотности и др.). Для подбора оптимальной для данного интервала глубин плотности раствора (т.е. минимальной, обеспечивающей устойчивое состояние ствола скважины) необходимы прогнозные оценки возможности и характера разрушений стенок скважины и вмещающих пород, которые могут быть получены в результате геомеханических расчетов.

б. Устойчивость закрепленного участка скважины (в том числе его герметичность) при эксплуатации месторождения или подземного хранилища определяется качеством цементации заколонного пространства и свойствами цементного камня, характеристиками обсадных труб, видом и интенсивностью нагружения крепи скважины, состоящей из обсадной колонны и цементного кольца. Качество цементации, во многом зависящее от устойчивости открытого ствола скважины при бурении, может быть повышено применением специальных технологий тампонажных работ (например, многостадийное комбинированное цементирование, применение вибровоздействия) и надлежащим выбором тампонажных материалов и реагентов, обеспечивающих необходимые сроки схватывания и загустевания, реологические характеристики тампонажного раствора. Выбор конструкции обсадной колонны (типоразмеры обсадных труб по секциям и их длины, типы резьбовых соединений)

и состав тампонажного раствора по механической прочности и адгезионным свойствам цементного камня производится исходя из характера и интенсивности нагружения крепи скважины, обусловленного воздействием внутреннего давления, нормальных и касательных внешних нагрузок, а также осевых нагрузок от собственного веса. Величины внешних нагрузок как в плоскости, перпендикулярной оси скважины, так и в осевом направлении могут быть определены по результатам геомеханического анализа процессов сдвижения, деформирования и разрушения породного массива, обусловленных, в том числе, режимами эксплуатации месторождения или подземного хранилища. Указанная геомеханическая задача, связанная с прогнозом и обеспечением устойчивости скважин, в значительной степени усложняется при отклонении оси скважины от вертикали, в условиях аномально высоких поровых давлений, а также градиентов температур.

7. Следующая научно-техническая задача связана с механическим поведением пластов-коллекторов при отборе или закачке в них флюида. Пласт-коллектор представляет собой консолидированную или неконсолидированную пористую среду, подвергающуюся в результате отбора или закачки флюида нагружению, обусловленному значительными колебаниями внутрипорового давления. Следствием этого нагружения является изменение напряженного состояния и деформации скелета пласта, общие деформации пласта-коллектора, приводящие к сдвигению покрывающих пород и деформациям земной поверхности. Нагружение и деформации пласта-коллектора сопровождаются также изменением его коллекторских свойств (пористость, проницаемость и т.д.) как по площади, так и по разрезу пласта. Таким образом, технологические параметры эксплуатации месторождения или подземного хранилища газа в пласте-коллекторе (давления, объемы отбора и закачки, дебиты скважин и др.) непосредственным образом связаны с геомеханическими процессами деформирования пласта-коллектора, которые могут развиваться не только в упругом, но и неупругом режиме, в зависимости от уровня нагружения скелета пласта. Поэтому анализ развития указанных геомеханических процессов необходим не только для прогнозирования процессов сдвижения покрывающих пород и деформаций земной поверхности, но и для прогнозирования технологических параметров эксплуатации месторождения или подземного хранилища.

8. К этому же классу задач относится и задача повышения дебита скважин за счет интенсификации притока флюида. Одним из способов интенсификации притока флюида к забою скважины является гидравлический разрыв пласта и его различные варианты (многократный, направленный и т.д.). Эта же задача возникает и при добыче метана из угольных пластов, так как гидравлическое воздействие на пласт с целью создания системы трещиноватости заданных протяженности и ориентации является основным способом повышения метаноотдачи пласта.

9. Разработка месторождения или эксплуатация подземного хранилища сопровождается развитием процессов деформирования и сдвижения перекрывающего (вышележащего) породного массива и земной поверхности той или иной степени интенсивности. Возможны различные варианты развития геомеханических процессов сдвижения и деформирования перекрывающих пород:

- если пласт-коллектор представлен жесткими и прочными породами типа твердых песчаников, известняков, доломитов, его деформации будут малыми упругими и вызовут небольшое изменение мощности пласта (от нескольких сантиметров до нескольких дециметров), которое при большой протяженности вовлекаемых в сдвижение участков массива не приведет к существенным прогибу и деформациям вышележащей породной толщи и земной поверхности, хотя и в этом случае могут создаваться условия для миграции флюидов в вышележащие горизонты, что, по всей вероятности, наблюдается на Северо-Ставропольском ПХГ;
- если пласт-коллектор представлен слабо сцементированными породами типа песков, рыхлых песчаников, чистых плотных алевритов, деформации пласта-коллектора будут значительными, а изменение его мощности может достигать нескольких метров; в этом случае прогиб и деформации вышележащей породной толщи будут существенными, особенно на флангах залежи, могут сопровождаться сдвигами пород по плоскостям напластования, представляющими особую опасность для эксплуатационных скважин, появлением зон повышенной проницаемости и трещин разрыва; деформации земной поверхности могут быть опасными для расположенных на подрабатываемой территории зданий, сооружений, технологического оборудования и природоохранных объектов;
- если пласт-коллектор представлен жесткими и крепкими породами, а перекрывающий массив содержит пласты так называемых «недоуплотненных» пород, находящихся первоначально под высоким пластовым давлением флюида (например, слабопроницаемых обводненных глин), то даже при малых деформациях пласта-коллектора сдвижения подрабатываемого массива и деформации земной поверхности могут быть существенными за счет миграции флюида из «недоуплотненных» пород в истощенную залежь и их усадки, причем последняя может достигать нескольких метров и сопровождаться оседаниями земной поверхности того же порядка; именно такой механизм развития процессов сдвижения и деформаций земной поверхности был отмечен на некоторых нефтепромыслах США, а также на одном из месторождений Северного моря;

- если перекрывающий породный массив разбит системами трещин на блоки (содержит разрывные нарушения), его сдвиги и деформации могут носить динамический характер и проявляться в виде техногенных сейсмических событий, т.е. техногенных землетрясений, причиной которых являются происходящие при извлечении или закачке флюида активизация существующих разломов, их развитие и взаимные сдвиги отдельных блоков по плоскостям разломов; техногенная сейсмоактивность с различной магнитудой неоднократно наблюдалась при эксплуатации нефтяных (Гус-Крик, Уилмингтон, Буэна-Виста-Хилс, США; Старо-Грозненское, Россия) и газовых (Лак, Франция; Кавьяга, Италия; Газли, Узбекистан) месторождений; с высокой долей вероятности можно предположить возможность техногенных землетрясений, вызванных эксплуатацией Астраханского ГКМ, учитывая геологическое строение вмещающего залежь породного массива и возможное наличие в нем разрывных нарушений.

10. Из сказанного видно, насколько важны анализ и прогноз возможного развития геомеханических процессов сдвига и деформирования горных пород и земной поверхности при эксплуатации месторождений и подземных хранилищ как с точки зрения обеспечения необходимого уровня промышленной и экологической безопасности, так и с точки зрения снижения финансовых затрат на проведение различного рода аварийных и восстановительных работ по ликвидации негативного воздействия геомеханических процессов на технологическое оборудование и непосредственно эксплуатацию.

11. В соответствии с требованиями российского законодательства, нормативных документов органов горного надзора в части охраны недр и обеспечения промышленной безопасности объектов добычи углеводородного сырья, разработка месторождений должна сопровождаться организацией систем маркшейдерско-геодезических наблюдений за деформациями земной поверхности, или так называемых «геодинамических полигонов». Учитывая значительные размеры территорий горных отводов месторождений, стоимость наблюдательных станций, а также существенную неравномерность деформаций земной поверхности в пределах образующейся на земной поверхности мульды сдвига, проектирование и организацию систем наблюдений целесообразно выполнять только на основе результатов анализа и прогноза развития геомеханических процессов. Кроме того, интерпретация результатов наблюдений, без чего организация систем наблюдений теряет всякий смысл, возможна только на основе соответствующих геомеханических расчетов. Следует отметить, что застройка территорий горных отводов месторождений и подземных хранилищ, включая строительство трубопроводов, компрессорных станций и т.д., допускается при наличии соответствующих горно-геологических обоснований, содержащих анализ и прогноз процессов сдвига и деформаций земной поверхности.

12. И еще один класс геомеханических задач возникает при строительстве, эксплуатации, консервации и ликвидации подземных хранилищ газообразных и жидких углеводородов в каменной соли. В первую очередь, из них следует выделить задачу обеспечения устойчивости и герметичности выработок-емкостей в течение заданного срока их эксплуатации, которая связана, прежде всего с определением долговременно устойчивых геометрической формы и размеров выработок-емкостей в различных горно-геологических условиях, а также определением безопасных технологических параметров эксплуатации подземных резервуаров (максимальное и минимальное противодействие хранимого продукта, режимы его отбора и закачки). Несмотря на безусловные достижения советских, российских и зарубежных ученых в различных аспектах этой задачи, ее нельзя считать на сегодняшний день окончательно решенной.

13. При строительстве и эксплуатации подземных хранилищ в каменной соли также возникают и задача обеспечения устойчивости и герметичности эксплуатационных скважин подземных резервуаров, и задача анализа и прогноза процессов сдвижения и деформирования перекрывающего породного массива и земной поверхности. Но в данном случае они имеют свои особенности, обусловленные, прежде всего, реологическими свойствами каменной соли, а также спецификой технологических процессов строительства и эксплуатации подземных хранилищ в соляных отложениях.

14. Специфические геомеханические задачи возникают при консервации и ликвидации подземных резервуаров, созданных в отложениях каменной соли с использованием ядерно-взрывной технологии. Эта специфика связана, прежде всего, с технологией сооружения резервуаров, а именно, динамическим воздействием на вмещающий соляной массив сверхвысоких давлений и температур, которые невозможно воспроизвести в лабораторных условиях, но которые кардинально меняют свойства и состояние пород в приконтурной области. Таким образом, анализ развития геомеханических процессов деформирования и разрушения вмещающего массива, конечной целью которого является прогноз образования в массиве потенциальных каналов миграции радионуклидов из подземных емкостей в породный массив и водоносные горизонты, возможен только в результате решения обратных геомеханических задач, когда исходные свойства и состояние массива восстанавливаются по натурным наблюдениям за результатами проявлений геомеханических процессов (например, по давлению на устьях скважин, остаточным объемам подземных емкостей).

15. В настоящее время проектирование подземных хранилищ газо- и нефтепродуктов в отложениях каменной соли выполняется с использованием геомеханического обоснования конструктивных решений подземных резервуаров и основных технологических параметров их эксплуатации. Геомеханическое обоснование выполняется на основе детального изучения

механических и реологических свойств каменной соли на участке строительства хранилища, для чего создана соответствующая лабораторная база, оснащенная современным испытательным оборудованием.

16. В отличие от подземного хранения газо- и нефтепродуктов в каменной соли, геомеханическое обоснование проектных и технических решений при разработке месторождений и подземном хранении газа в пористых структурах в России практически не используется, если не считать организацию на некоторых месторождениях и подземных хранилищах систем маркшейдерско-геодезических наблюдений за деформациями земной поверхности, причем, как правило, без каких-либо попыток интерпретации результатов этих наблюдений. Сложившееся положение объясняется явно недостаточной изученностью геомеханических процессов, сопровождающих разработку месторождений и эксплуатацию подземных хранилищ газа в пористых структурах, и, как следствие, отсутствием необходимого методического обеспечения для анализа, контроля и прогноза этих процессов, разработка которого может быть отнесена к разряду актуальных отраслевых научно-технических проблем.

17. Для успешного решения указанных выше задач необходима, на наш взгляд, организация на обустраиваемых и действующих месторождениях и подземных хранилищах систем *геомеханического мониторинга*. Основными целями организации систем *геомеханического мониторинга* и реализации последнего являются: оценка свойств и состояния вмещающих и перекрывающих породных массивов и их изменения в пространстве и во времени; разработка геомеханических моделей разрабатываемых месторождений и подземных хранилищ; уточнение геомеханических моделей на основе выполнения комплекса наблюдений за проявлениями геомеханических процессов, в т.ч. маркшейдерско-геодезических наблюдений за деформациями земной поверхности, и последующего сопоставления данных наблюдений с прогнозными оценками характера и интенсивности реализации геомеханических процессов; прогноз развития процессов сдвижения, деформирования и разрушения вмещающих и перекрывающих породных массивов с учетом проектных и фактических технологических параметров разработки месторождений и эксплуатации подземных хранилищ; оценка воздействия геомеханических процессов на подземные и наземные инженерные сооружения и объекты, обоснование мер их защиты и обеспечения экологической и промышленной безопасности.

18. Наряду с организацией систем *геомеханического мониторинга* представляется целесообразным создание российского банка данных о проявлениях геомеханических процессов при разработке месторождений и эксплуатации подземных хранилищ, характере и интенсивности этих проявлений и степени их воздействии на подземные и наземные сооружения и объекты: результатов инструментальных маркшейдерских наблюдений

за деформациями земной поверхности, об аварийных ситуациях на эксплуатационных скважинах, об аномальных скачках пластовых давлений с привязкой к технологическим параметрам разработки месторождений и эксплуатации подземных хранилищ и т.д. Создание такого банка данных позволит произвести геомеханическую типизацию условий разработки газовых и газоконденсатных месторождений и подземных хранилищ, существенно облегчить разработку методического обеспечения анализа, прогноза и контроля развития геомеханических процессов.
