УДК 622.02:531+622.83

Ю.А. КАШНИКОВ, *д-р техн. наук, профессор*
С.Г. АШИХМИН, *д-р техн. наук, доцент*
С.В. ГЛАДЫШЕВ, *канд. техн. наук*
С.Н. ПОПОВ, *канд. техн. наук*
Пермский государственный технический университет, geotech@pstu.ac.ru

Yu.A. KASHNIKOV, *Dr. in eng. sc., professor*
S.G. ASHIKHMIN, *Dr. in eng. sc., associate professor*
S.V. GLADYSHEV, *PhD in eng. sc.*
S.N. POPOV, *PhD in eng. sc.*
Permian State Technical University, geotech@pstu.ac.ru

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ РАЗРАБОТКУ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

Механика горных пород имеет важное значение для нефтяной промышленности, так как она обеспечивает разработку механических моделей горных массивов, расчет параметров процесса сдвижения горных пород, устойчивости нефтяных и газовых скважин, изучение проблем геодинамики недр. В статье представлены аналитические и численные решения задач уплотнения коллекторов соответствующего снижения фильтрационно-емкостных свойств и продуктивности скважин.

***Ключевые слова*:** извлечение флюидов, фильтрационные свойства, продуктивность скважин.

GEOMECHANICAL AND GEODYNAMIC PROBLEMS ACCOMPANYING THE MINING OF HYDROCARBON DEPOSITS

Rock mechanics in petroleum industry is used for determination of geomechanical models of rock mass, calculating parameters of rock subsidence, stability of oil and gas wells, problems relevant to geodynamics. The present paper describes the analytical and numerical analyses of compaction in reservoir, following reduction in filter-capacity performance and well productivity.

***Key words*:** fluides extraction, filtering properties, productivity of wells.

Разработка нефтяных и газовых месторождений и связанные с ними изменения пластового давления, различные виды воздействия на залежь нарушают природное напряженно-деформированное состояние недр, создавая предпосылки для возникновения сильных и порой катастрофических природно-техногенных явлений. Очевидно, что прогнозирование этих событий и снижение масштабов их последствий является весьма актуальной проблемой. В этой связи в последнее время значительное развитие получили исследования в области механики горных пород при разведке и добыче углеводородов. При этом основное внимание уделяется таким проблемам, как прогноз и мониторинг деформаций земной поверхности, техногенных сейсмических явлений, снижение фильтрационно-емкостных свойств при уплотнении коллекторов и падение продуктивности скважин, устойчивость и разрушение поверхностных нефтепромысловых систем и скважин, гидроразрыв пласта, разрушение призабойной зоны пласта.

Решение данных проблем встречает значительные трудности, связанные с недостаточной разработкой теоретических и методических основ процессов деформирования горных пород и количеством накопленной информации. При изучении геомеханических параметров продуктивных объектов на образцах керна, добываемых из скважин на глубинах 4 км и более, необходимо учитывать многочисленные эффекты, связанные с разгрузкой образца от действующих высоких анизотропных напряжений, влияние высоких температур, насыщенность пористой среды и ряд других проблем. Дополнительные трудности вносят эффекты изменения свойств массива при его вскрытии под буровым раствором и извлечении флюида.

Механика горных пород на протяжении двух прошедших десятилетий являлась весьма важной темой исследований в нефтяной зарубежной промышленности. На это указывают серьезные исследования в данном направлении специалистов фирмы «Шлюмберже», проведение нескольких европейских и мировых конгрессов по проблемам механики горных пород при нефте-и газодобыче («EUROCK-94», «EUROCK-98» и др.), многочисленные публикации в ведущих мировых научных изданиях*. Тематика исследований чрезвычайно широка, так как практически все аспекты разведки и добычи углеводородного сырья касаются данной области знаний. Вместе с тем основное внимание уделяется таким проблемам, как прогноз и мониторинг деформаций земной поверхности и техногенных сейсмических явлений, снижение фильтрационно-емкостных свойств при уплотнении коллекторов и падение продуктивности скважин, устойчивость и разрушение поверхностных нефтепромысловых систем и скважин, гидроразрыв пласта, разрушение призабойной зоны пласта.

Разработка нефтяных и газовых месторождений и связанные с ними изменения пластового давления, различные виды воздействия на залежь для поддержания пластового давления и повышения нефтеотдачи нарушают природное напряженно-деформированное состояние недр, создавая предпосылки для возникновения сильных и даже катастрофических природно-техногенных явлений, которые приводят к деформациям горного массива и земной поверхности, повреждениям и авариям систем и объектов обустройства, а также скважин и коммуникаций.

Безусловно, сильные (в ряде случаев катастрофические) геодинамические и геомеханические события природно-техногенного происхождения на разрабатываемых месторождениях углеводородов и других природно-технических системах и объектах нефтегазового комплекса представляют сравнительно редкое явление, опасность которого не стоит преувеличивать, однако не стоит и недооценивать. Прогнозирование этих событий и снижение масштабов их последствий является актуальной проблемой, поскольку их возникновение может иметь катастрофические для предприятия и природной среды последствия.

Деформации и оседания земной поверхности обнаруживаются чаще всего по достижении ими определенных опасных значений, а также по нарушениям подземных и поверхностных инженерных объектов, когда уже необходимо затратить значительные средства на восстановление поврежденных объектов. Начальные стадии этих процессов можно обнаружить только на основе специального маркшейдерско-геодезического мониторинга. Существующий опыт исследования и прогнозирования просадок земной поверхности свидетельствует о том, что сильные их проявления возможны в случае:

• наличия АВПД и разработки продуктивных объектов без поддержания пластового давления;

---

* *Кашников Ю.А.* Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья / Ю.А.Кашников, С.Г.Ашихмин. М.: Недра, 2007.

Kashnikov Yu.A, Ashikhmin S.G. Rock mechanics in mining the deposits of hydrocarbon raw materials. Moscow: Nedra, 2007.

Charlez F.P. Rock Mechanics. Petroleum applications. Editions Technip. 27 rue Ginoux 75737 Paris cedex 15. 1997. V.1, 2.

• низких прочностных и деформационных характеристик резервуара;

• высокой пористости пород – коллекторов (до 30-40 %);

• относительно небольшой глубины разрабатываемых залежей (до 2000 м);

• значительной суммарной мощности продуктивных отложений.

Для большинства месторождений скорости просадок составляют умеренные величины – 1-2 см/год, а суммарные (накопленные) величины просадок земной поверхности не превышают десятков сантиметров. Однако зафиксированный диапазон оседаний поверхности при разработке углеводородов весьма велик – наблюдаются оседания от нескольких миллиметров до нескольких метров. В связи с этим обстоятельством маркшейдерско-геодезический мониторинг и прогноз деформационных процессов при разработке месторождений углеводородов является обязательной нормой цивилизованной эксплуатации природных ресурсов.

При извлечении флюида (воды, нефти или газа) известны многочисленные случаи сейсмических явлений. Механизмов данных явлений может быть несколько: выделение техногенной сейсмической энергии связано с высвобождением основной сейсмической энергии находящегося поблизости сейсмически активного региона (очага); диффузия напряжений, возбуждающих сейсмические события; локальная реакция типа гидроразрыва на закачивание жидкости; восстановление равновесия регионального масштаба, связанное с перемещением жидкости, активизация тектонически активных зон и нарушений.

Среди специалистов существуют разные мнения о возможности прогноза природных землетрясений, которые меняются со временем. Однако совершенно определенно можно сказать, что к началу XXI в. ученые не решили эту фундаментальную для человечества проблему. Сложнее с прогнозом техногенных землетрясений, которые пока еще представляют единичные явления, появившиеся в последние три десятилетия. Еще не выяснен механизм этих явлений, условия их возникновения, зависимость от природных и технологических факторов.

Вполне ясно, что на современном уровне знаний о техногенной геодинамике недр невозможно разработать какой-то метод, позволяющий прогнозировать место и время очередного техногенного землетрясения. По всей вероятности, в обозримом будущем можно будет лишь ответить на вопросы: возможны ли техногенные сейсмические явления при разработке конкретного месторождения и если да, то какой силы, и какой из механизмов присутствует при наведении техногенной сейсмоактивности. Однако, познав механизм данных явлений, можно проектировать превентивные меры, снижающие негативность их проявлений. Безусловно, что это одна из самых важных геодинамических проблем, стоящих перед специалистами нефтегазовой отрасли.

Анализ мирового и отечественного опыта диктует необходимость создания целостной системы геомеханической и геодинамической безопасности освоения углеводородного потенциала, которая должна не только увязать стратегические, оперативные, технические и организационные меры защиты от возможного воздействия современных опасных процессов природно-техногенного генезиса на природно-технические системы газового комплекса, но и способствовать повышению эффективности разработки месторождения. Основным принципом создания системы геодинамической безопасности должно стать обеспечение заданного уровня защищенности природно-технических систем нефтегазового комплекса от возможного развития опасных природно-техногенных явлений, а также внедрение конкретных технических решений, направленных на повышение эффективности разработки месторождения на основе выявленных закономерностей проявления геомеханических и геодинамических процессов.

Другой чрезвычайно важный аспект геомеханического поведения горных пород при освоении недр связан с их использованием для повышения эффективности добычи нефти и газа. В процессе эксплуатации

добывающих скважин в результате образования воронки депрессии в прискважинной зоне пласта наблюдается значительное снижение пластового давления. По мере работы добывающих скважин происходит расширение воронки депрессии, которая может охватывать значительные по площади участки залежи. В результате этого коллекторы пласта, особенно в прискважинной зоне, начинают испытывать дополнительную вертикальную нагрузку, приводящую к деформации порового и трещинного пространства. При этом происходит как упругое, так и необратимое (пластическое) уменьшение емкостных и фильтрационных свойств пород.

Наличие необратимой деформации коллекторов обнаружено на многих месторождениях мира, где в процессе их разработки наблюдалось значительное снижение пластового давления. При этом было выявлено, что величина необратимой деформации коллекторов определяется не только падением пластового давления, но также палеоглубиной залегания пласта, литологическим типом пород и длительностью воздействия дополнительных нагрузок на продуктивные отложения. На примере месторождений Западной Сибири установлено, что необратимая деформация коллекторов приводит не только к замедлению темпов отбора нефти, но и к снижению нефтеотдачи пластов. Проявление необратимой деформации коллекторов на месторождениях Западной Сибири, по мнению специалистов, привело к потере десятков миллионов тонн извлекаемых запасов нефти.

Особую чувствительность к действующим нагрузкам испытывают коллекторы трещинного и трещинно-порового типов, которыми представлены глубокозалегающие продуктивные объекты. Для них характерно сравнительно быстрое и равномерное снижение пластового давления при использовании редкой сетки разведочных скважин, непредсказуемая динамика обводненности скважин, существенно неравномерная продуктивность скважин. Все эти явления связаны с механическими особенностями поведения под нагрузкой трещиноватых пород – коллекторов. К сожалению, на современном этапе проектирования вскрытия и разработки продуктивных объектов трещинно-поровых и даже чисто поровых коллекторов особенности их поведения под нагрузкой учитываются весьма слабо. Особенности учета деформирования пористых консолидированных и, тем более, деформируемых трещиноватых сред практически не учитываются в гидродинамическом моделировании и создании технологических схем разработки месторождений. Познание механических процессов, происходящих в недрах, может помочь в определении мест заложения новых скважин и плотности сетки скважин.

Устойчивость скважин при их строительстве и в процессе последующей эксплуатации – традиционная проблема механики горных пород. Точные аналитические решения механики горных пород не потеряли своей актуальности, но с появлением численных методов стали вытесняться из инженерной практики. При большом разнообразии строения и свойств горных пород, которые пересекает ствол скважины в процессе ее проходки, последующего крепления и работы чрезвычайно трудно разработать модель, которая могла бы описать напряженно-деформированное состояние вскрытых разновидностей горных пород и использовать ее в качестве основы проекта. Такая модель должна быть достаточно простой, чтобы разработанные на ее основе методы исследований устойчивости и разрушения горных пород можно было применять с уверенностью и без чрезмерных затрат труда. В связи с этим одно из центральных мест в механике горных пород при разработке месторождений углеводородов занимает создание модели деформирования горного массива.

Создание модели деформирования горного массива применительно к разработке углеводородов является более сложной проблемой, чем решение аналогичной проблемы при разработке твердых полезных ископаемых, строительстве подземных сооружений или возведении высотных плотин. В данном случае исследователь если и проникает в недра Земли, то это проникновение определяется всего лишь диаметром скважины.

Все остальные возможности познания массива пород (геофизические и др.) несут косвенную, требующую умелой интерпретации, информацию. Дополнительные сложности вносят эффекты консолидации массива при его вскрытии и извлечении флюида, термические напряжения, а также, чаще всего, полная неопределенность с исходным полем напряжений.

Знание исходного тензора напряжений, его ориентации и величины, имеет фундаментальное значение в нефтяной промышленности, так как этот параметр влияет на многие аспекты разведки и разработки углеводородов. Достаточно отметить, что трещина ГРП растет в направлении наибольшего сжатия, следовательно, зная направление максимального главного напряжения и его величину, можно более эффективно проектировать и выполнять ГРП. Овализация ствола скважины, ее разрушение является также следствием действия высоких анизотропных напряжений. Явления разрушения призабойной зоны, или пескопроявления, наносящие большой ущерб оборудованию нефте- и газопромыслов, также являются следствием действия природного поля напряжений, при этом, естественно, накладываются эффекты консолидации коллекторов, слабость их прочностных свойств.

Изучение физико-механических и компрессионных свойств продуктивных объектов – чрезвычайно сложный раздел механики горных пород. Как учесть при определении геомеханических параметров продуктивных объектов на образцах керна, добываемого из скважин на глубинах 4 км и более многочисленные эффекты, связанные с разгрузкой образца от действующих высоких, чаще всего анизотропных напряжений, анизотропию свойств самого образца, влияние высоких температур, насыщенность пористой среды и целый ряд еще не менее значимых проблем? В связи с этим параметрическое обеспечение самых оригинальных численных моделей деформирования горного массива чаще всего становится непреодолимой преградой при практической реализации этих моделей. В этих условиях исследователь вынужден использовать иногда наиболее простые модели и подбирать входящие в них коэффициенты на основе эмпирических знаний. Однако использование простых моделей (например, в оценке устойчивости ствола скважины в процессе бурения) не позволяет выявить истинные сложные механизмы деформирования пород.

Сложность изложенных проблем определяется недостаточной разработкой теоретических и методических основ процессов деформирования горных пород, а также количеством накопленной информации, многовариантностью получаемых решений и сложностью происходящих в недрах процессов. Определенные трудности в реализации задач связаны также с нестабильностью финансирования, в результате чего большой объем исследований остается незавершенным и теряется значительная часть необходимой информации.