

М.В. Хлопцова

ЗАДАЧИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ

Горные породы, образующие естественный геологический резервуар для подземного хранения газа, в процессе эксплуатации ПХГ находятся в условиях длительного циклического нагружения, обусловленного периодическими закачками и отборами хранимого продукта. При этом возможно развитие и накопление в горных породах остаточных деформаций, вызывающих необратимые изменения емкостно-фильтрационных свойств пород, что необходимо учитывать в технологических решениях по созданию и эксплуатации ПХГ. В последние годы отечественными учеными и специалистами начаты работы по созданию геомеханических моделей месторождений. В настоящее время отсутствует единый методический подход к геомеханическому обоснованию технологических решений по созданию и эксплуатации ПХГ в структурах, учитывающий геомеханические особенности формирования структурных ловушек и прогноз механического поведения пород-коллекторов при циклических закачке и отборе газа. Геомеханическое обоснование может быть выполнено на основании геомеханической модели ПХГ, которая наряду с геологической моделью должна разрабатываться на стадии геолого-разведочных работ и корректироваться на стадиях обустройства и эксплуатации хранилища. Рассмотрены и сформулированы основные задачи геомеханического моделирования при разработке месторождений и эксплуатации подземных хранилищ. Ключевые слова: геомеханика, моделирование, разработка месторождений, геомеханическая модель, оценка устойчивости, деформация, коллектор, напряженное состояние.

Геомеханика как раздел механики занимается изучением механических свойств горных пород и массивов и геомеханических (механических) процессов, возникающих в них под воздействием инженерной деятельности человека в виде горных работ, к каковым, безусловно, относятся разработка месторождений и эксплуатация подземных хранилищ газа.

Геомеханика нашла широкое применение в горном деле, строительстве подземных сооружений различного назначения, в том числе и подземных хранилищ газа и нефти в соляных отложениях.

В нефтегазовой промышленности геомеханика стала применяться в 80-х годах прошлого века, то есть относительно недавно. Основными задачами при этом были повышение эффективности бурения скважин и прогноз техногенных геодинамических процессов [1].

Сегодня эта наука находит все более широкое признание среди специалистов нефтяной и газовой промышленности и стремительно развивается, расширяя круг решаемых задач — от оценки геомеханических воздействий на крепь скважины и ее фильтровую часть до анализа геомеханического состояния геологической среды, содержащей месторождение или подземное хранилище газа.

В перспективе роль геомеханики в решении инженерных проблем, возникающих при добыче углеводородов и подземном хранении газа, будет только возрастать. Этому способствуют вовлечение в разработку новых месторождений со сложными условиями залегания продуктивных пластов, применение различных дорогостоящих технологий, например горизонтального бурения, гидроразрыва пластов и различных методов воздействия на пласт. Об возрастании роли геомеханики говорит и тот факт, что крупные операторы все чаще создают геомеханические подразделения внутри компаний.

Современные компьютерные технологии позволяют выполнять исследования практически любой степени сложности с целью оценки геомеханических процессов, происходящих при разработке месторождений или эксплуатации подземных хранилищ. По сути, сегодня речь идет уже о создании геомеханических моделей месторождений или подземных хранилищ по аналогии с их геологическими моделями, которые позволяли бы выполнять комплексный геомеханический анализ на всех этапах обустройства и эксплуатации месторождения или подземного хранилища.

По этому пути идут крупнейшие сервисные компании (Schumberger, Halliburton, Baker Hughes), в которых ведутся разработки соответствующих программных комплексов [2].

В последние годы отечественными учеными и специалистами также начаты работы по созданию геомеханических моделей месторождений [3, 4].

Можно с уверенностью сказать, что эти работы будут развиваться, учитывая существующую тенденцию отхода от зарубежных технологий, в том числе компьютерных, возникшую не только вследствие санкционного режима, но и из-за высокой стоимости собственно зарубежных программных продуктов и их сопровождения.

Причем, работы по геомеханическому моделированию будут развиваться в направлении создания постоянно действующих цифровых моделей, сопровождающих весь цикл разработки месторождения или эксплуатации хранилища, аналогично геологическим и гидродинамическим моделям, создание которых в настоящее время стало обычной, почти рутинной процедурой.

Геомеханическая модель должна являться основой для решения текущих геомеханических задач, возникающих при разработке месторождения или эксплуатации подземного хранилища. Поэтому архитектура модели, набор исходных данных, используемые методы расчета и программные средства должны определяться совокупностью конкретных геомеханических задач. Остановимся на последних более подробно:

Оценка структурно-механических особенностей строения породного массива, наличия поверхностей ослабления, пликативных и дизъюнктивных нарушений, потенциально влияющих на развитие деформационных процессов в массиве при разработке месторождения или эксплуатации подземного хранилища.

Оценка начального напряженного состояния породного массива (in-situ), включая собственно пласт-коллектор, перекрывающие и подстилающие горные породы (рис. 1), – вертикального (σ_z) и горизонтальных ($\sigma_x = \lambda_x \cdot \sigma_z$ и $\sigma_y = \lambda_y \cdot \sigma_z$, в общем случае $\lambda_x \neq \lambda_y$) напряжений, а также определение ориентации

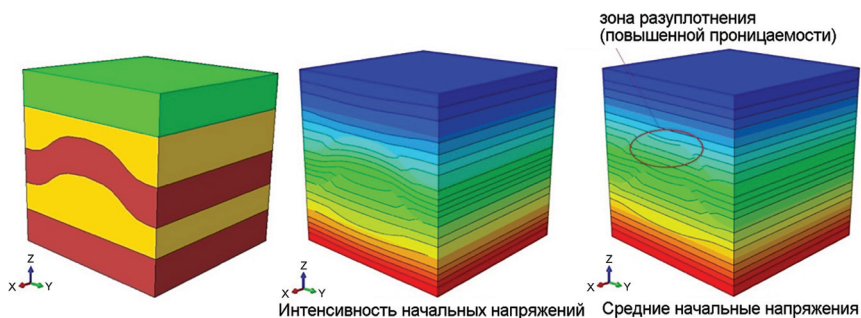


Рис. 1. Начальное напряженное состояние породного массива в инвариантах тензора напряжений

максимального и минимального горизонтальных напряжений в случае их анизотропии; начальное напряженное состояние пород-коллекторов оценивается с учетом пластовых давлений (эффективные начальные напряжения) [13]. Начальное напряженное состояние породного массива используется в качестве граничных условий при решении геомеханических задач [7].

Прогноз зон уплотнения и разуплотнения в продуктивных пластах в целях оптимального размещения эксплуатационных скважин (рис. 1). Зоны разуплотнения являются зонами повышенной проницаемости пород-коллекторов [5].

Оценка физико-механических свойств горных пород, используемых в качестве исходных данных при решении геомеханических задач. К ним относятся деформационные и прочностные свойства горных пород, определяющие их деформирование и разрушение при нагружении. К деформационным характеристикам относятся модули упругости и коэффициенты Пуассона (хотя, последние оказывают несущественное влияние на деформационные процессы), а также коэффициенты сжимаемости минерального скелета и порового пространства пород-коллекторов. Прочностные характеристики, подлежащие оценке, определяются используемой при моделировании теорией прочности; для теории прочности Кулона-Мора, получившей наибольшее распространение в механике горных пород, такими характеристиками являются сцепление и угол внутреннего трения.

Прогноз устойчивости эксплуатационных скважин на стадии бурения, которое сопровождается процессами деформи-

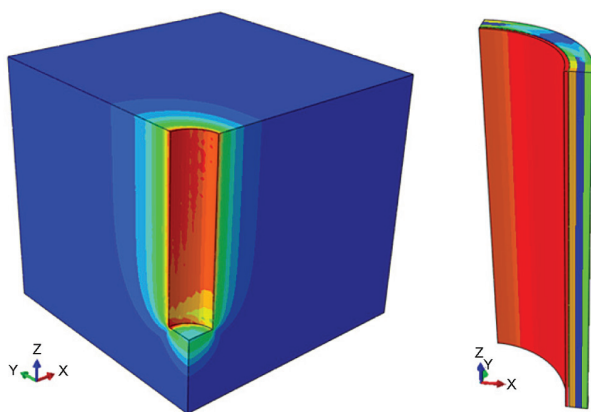


Рис. 2. Напряженное состояние прискважинного массива и крепи скважины

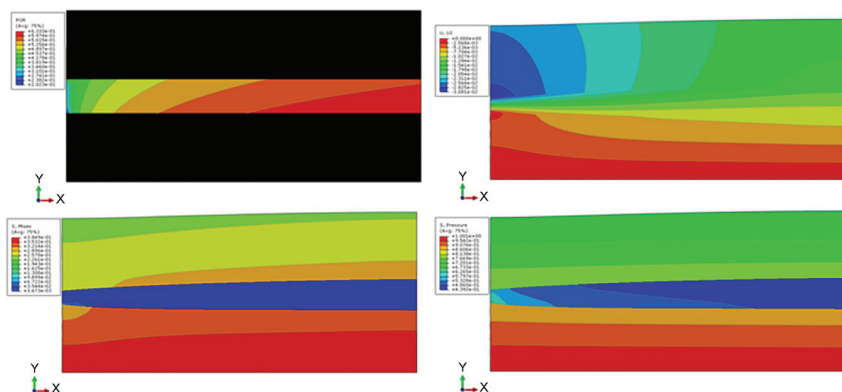


Рис. 3. Деформирование горизонтального пласта-коллектора при изменении пластового давления

рования 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 (рис. 2), в их овализации 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 [6].

Оценка характера и интенсивности нагружения крепи скважины (цементного камня и обсадных колонн), обусловленных нормальными и касательными нагрузками со стороны вмещающего породного массива.

Оценка устойчивости скважин при их строительстве и эксплуатации должны выполняться с учетом изменения начального напряженно-деформированного состояния породного массива, обусловленного разработкой месторождения или эксплуатации подземного хранилища.

Прогноз процессов деформирования пласта-коллектора, прекрывающих и подстилающих горных пород, обусловленных изменением пластового давления при отборе (закачке) нефти и газа (рис. 3, 4). Деформации пласта-коллектора, в том числе необратимые, определяют изменение фильтрационных и емкостных свойств пласта-коллектора, приводят к изменению напряженно-деформированного состояния вышележащей породной толщи вплоть до земной поверхности и, как следствие, возник-

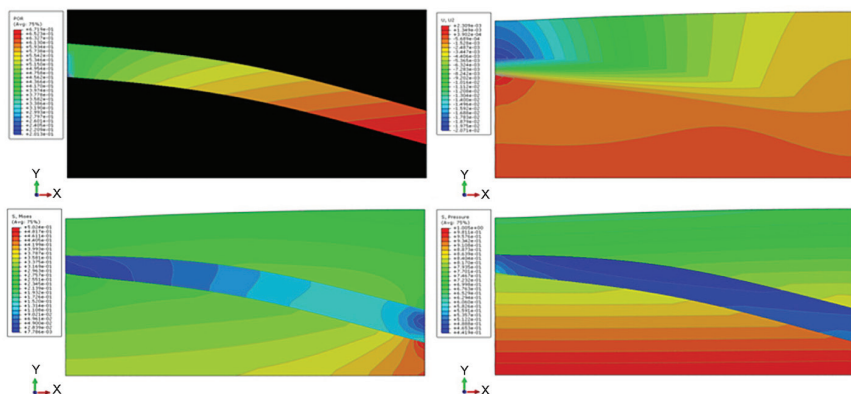


Рис. 4. Деформирование пласта-коллектора сводовой залежи при изменении пластового давления

новению дополнительных нагрузок на скважины, наземные сооружения и объекты [7, 8, 9, 10, 11, 12].

Прогноз разрушения прискважинных областей и пескопроявления при отборе пластового флюида. Эта задача является частной по отношению к предыдущей и отличается от нее степенью детализации. При решении задачи о деформировании и разрушении прискважинной области пласта-коллектора в качестве граничных условий должны использоваться результаты решения задачи о деформировании пласта-коллектора в пределах объекта разработки или подземного хранения.

Определение параметров и прогноз результатов механического воздействия на пласт-коллектор с целью улучшения его коллекторских свойств — гидравлического разрыва пласта (ГРП). Давление гидроразрыва, протяженность и ориентация форми-

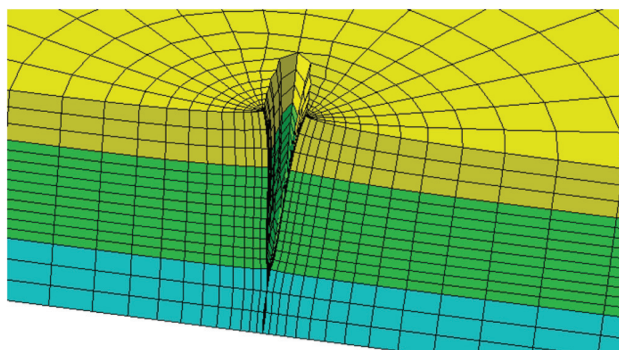


Рис. 5. Формирование трещины гидроразрыва в пласте-коллекторе

рующей трещины (рис. 5) зависят от уровня напряженного состояния пласта-коллектора и неравнокомпонентности его напряженного состояния, определяемых в результате решения предыдущих двух задач.

В настоящее время отсутствует единый методический подход к геомеханическому обоснованию технологических решений по созданию и эксплуатации ПХГ в структурах, учитывающий геомеханические особенности формирования структурных ловушек и прогноз механического поведения пород-коллекторов при циклических закачке и отборе газа. Такое геомеханическое обоснование может быть выполнено на основании геомеханической модели ПХГ, которая наряду с геологической моделью должна разрабатываться на стадии геолого-разведочных работ и корректироваться на стадиях обустройства и эксплуатации хранилища.

Наибольшим опытом создания геомеханических моделей месторождений, связанных в единый комплекс с геологическими и технологическими моделями, обладают зарубежные сервисные компании. Однако, использование в полном объеме зарубежных разработок представляется нецелесообразным, учитывая режим санкций и политику отечественного импортозамещения. Существующие же отечественные разработки направлены на решение частных геомеханических задач и не отличаются универсальностью.

В качестве эффективного методического приема по подготовке структур и постановке на них поисково-разведочных работ был разработан новый вариант оперативного метода палеоструктурного анализа, позволяющий выявлять основные структурообразующие этапы в истории развития локальных поднятий по ограниченному числу пробуренных скважин. Разработанный метод предполагает заложение поисково-разведочных скважин в зонах минимальных значений толщин выделяемого интервала разреза («информативные мощности»), соответствующих последней фазе наиболее интенсивного роста складки, что является принципиально новым. Предлагаемый способ позволяет по минимальному количеству пробуренных скважин (2–3) выделить в изучаемом разрезе интервал отложений, соответствующий завершаемому основному этапу формирования структурной ловушки и, в соответствии с изменением этих мощностей, корректировать местоположение последующих поисковых скважин или своевременно прекращать бурение заведомо законтурных скважин [5].

На основании вышесказанного можно сформулировать следующие основные задачи исследований:

- геомеханическое обоснование применения метода палеоструктурного анализа для количественной оценки начального напряженного состояния пласта-коллектора на основании многовариантного численного моделирования;
- геомеханическое обоснование прогноза изменения напряженно-деформированного состояния и фильтрационно-емкостных свойств пласта-коллектора при циклической эксплуатации ПХГ на основании многовариантного численного моделирования;
- разработка рекомендаций по использованию в геомеханических моделях параметров, характеризующих механические и фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов, и их определению по данным геофизических, экспериментальных и промысловых исследований;
- разработка рекомендаций по применению в геомеханических моделях программных продуктов, реализующих численное моделирование напряженно-деформированного состояния пласта-коллектора;
- разработка рекомендаций по выполнению геомеханического моделирования пород-коллекторов при эксплуатации ПХГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мори В., Фурментро Д.* Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти. — М.: Мир, 1994. — 416 с.
2. *Шахов Д. С.* Программное обеспечение для решения комплексных задач геомеханического моделирования (Schlumberger Information Solutions) // Нефтяное хозяйство. — 2014. — № 12. — С. 142–143.
3. *Кашиников Ю. А., Гладышев С. В., Шустов Д. В., Якимов С. Ю., Комаров А. Ю., Тинакин О. В.* Геолого-геомеханическая модель Астраханского газоконденсатного месторождения // Газовая промышленность. — 2012. — № 3. — С. 29–33.
4. *Ковалев А. Л., Шеберстов Е. В.* Геомеханическая модель горного массива, содержащего разрабатываемую нефтегазовую залежь или подземное хранилище газа // Вести газовой науки. — 2013. — № 1. — С. 204–215.
5. *Хан С. А., Давыдов А. Н.* Совершенствование метода палеоструктурного анализа для повышения эффективности эксплуатации нефтегазовых месторождений и ПХГ. — М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2013. — 138 с.
6. *Zhang J.* Borehole stability analysis accounting for anisotropies in drilling to weak bedding planes // International journal of rock mechanics and mining sciences. — 2013. — № 60. — P. 160–170.
7. *Желтов Ю. П.* Механика нефтегазоносного пласта. — М.: Недра, 1975. — 216 с.

8. Павлова Н. Н. Деформационные и коллекторские свойства горных пород. — М.: Недра, 1975. — 240 с.
9. Добрынин В. М. Деформация и изменение физических свойств коллекторов нефти и газа. — М.: Недра, 1970. — 240 с.
10. Biot M. A. General Theory of three dimensional consolidation. Y. Appl. Physics, vol. 26, 1955, pp. 155–165.
11. Brandt H. A. Study of speed of sound in porous granular media. J. of Appl. Mechanics, vol. 22, N 1, 1955.
12. Петров А. И., Шеин В. С. О необходимости учета современной геодинамики при оценке и пересчете промышленных запасов нефти и газа // Геология нефти и газа. — 2001. — № 3. — С. 6–14.
13. Yuping Zh. A micromechanics-based damage constitutive model of porous rocks // International journal of rock mechanics and mining sciences. — 2016. — № 91. — Pp. 1–6.
14. Chia-Chi Chiu, Meng-Chia Weng, Tsan-Hwei Huang Modeling rock joint behavior using a rough-joint model // International journal of rock mechanics and mining sciences. — 2016. — № 89. — Pp. 14–25.
15. Rakesh Kumar, Abhiram Kumar Verma Anisotropic shear behavior of rock joint replicas // International journal of rock mechanics and mining sciences. — 2016. — № 90. — Pp. 62–73. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Хлопцова Мария Валерьевна — научный сотрудник,
e-mail: m.khloptsova@gazpromgeotech.ru,
ООО «Газпром геотехнологии».

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 4, pp. 107–116.

UDC
622.691.24:
622.276

M.V. Khloptsova

PROBLEMS OF GEOMECHANICAL MODELING IN MINERAL MINING AND UNDERGROUND STORAGE OPERATION

Underground gas storage is a complex system, created in geological structures, characterized by the presence of porosity and a high permeability for fluids, ensuring the existence of structures in hydrodynamic systems. Rocks that form natural geological reservoir for underground gas storage in the process of UGS operation are under long-term cyclic loading, due to the periodic injection and selection of the stored product. With such loading, it may develop and accumulate in rocks residual (irreversible) deformation, that can cause irreversible change of the capacitive-filtration properties of rocks, it is necessary to consider technological solutions for the creation and operation of UGS. In recent years, russian scientists and experts started work on the creation of the geomechanical field models. It's safe to say that this work will develop, given the existing trend away from foreign technology, including computer, have arisen not only due to sanctions but also due to the high cost of actual software products and their technical support. Currently there is no uniform methodical approach to geomechanical substantiation of technological solutions for the creation and operation of UGS in the structures, taking into account geomechanical characteristics of the formation of structural

traps and prediction of the mechanical behaviour of reservoir rocks under cyclic injection and gas extraction. Such geomechanical substantiation can be made based on the geomechanical model of the underground storage facilities, which, along with the geological model, should be developed at the stage of geological prospecting and adjusted at the stages of construction and operation of the repository. The paper reviews and outlines the main objectives of geomechanical modeling in field development and operation of underground storages.

Key words: geomechanics, modeling, mining, geomechanical model, sustainability estimation, deformation, reservoir, the stress state.

AUTHOR

Khloptsova M.V., Researcher,
e-mail: m.khloptsova@gazpromgeotech.ru,
LLC «Gazprom Geotechnology»,
123290, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Mori V., Furmentro D. *Mekhanika gornykh porod primenitel'no k problemam razvedki i dobychi nefii* (Rock mechanics in the context of oil exploration and recovery), Moscow, Mir, 1994, 416 p.
2. Shakhov D.S. *Neftyanoe khozyaystvo*. 2014, no 12, pp. 142–143.
3. Kashnikov Yu.A., Gladyshev S.V., Shustov D.V., Yakimov S.Yu., Komarov A.Yu., Tinakin O.V. *Gazovaya promyshlennost'*. 2012, no 3, pp. 29–33.
4. Kovalev A.L., Sheberstov E.V. *Vesti gazovoy nauki*. 2013, no 1, pp. 204–215.
5. Khan S.A., Davydov A.N. *Sovershenstvovanie metoda paleostruktornogo analiza dlya povysheniya effektivnosti ekspluatatsii neftegazovykh mestorozhdeniy i PKhG* (Improvement of paleostructure analysis to enhance efficiency of oil and gas field recovery and underground gas storage operation), Moscow, OOO «Gazprom VNIIGAZ», 2013, 138 p.
6. Zhang J. Borehole stability analysis accounting for anisotropies in drilling to weak bedding planes. *International journal of rock mechanics and mining sciences*. 2013, no 60. Pp. 160–170.
7. Zheltov Yu.P. *Mekhanika neftegazonosnogo plasta* (Mechanics of oil and gas reservoir), Moscow, Nedra, 1975, 216 p.
8. Pavlova N.N. *Deformatsionnye i kollektorskie svoystva gornykh porod* (Deformation and reservoir characteristics of rocks), Moscow, Nedra, 1975, 240 p.
9. Dobrynin V.M. *Deformatsiya i izmenenie fizicheskikh svoystv kollektorov nefiti i gaza* (Deformation and alteration of physical properties in oil and gas reservoirs), Moscow, Nedra, 1970, 240 p.
10. Biot M.A. General Theory of three dimensional consolidation. *Y. Appl. Physics*, vol. 26, 1955, pp. 155–165.
11. Brandt H.A. Study of speed of sound in porous granular media. *J. of Appl. Mechanics*, vol. 22, N 1, 1955.
12. Petrov A.I., Shein V.S. *Geologiya nefiti i gaza*. 2001, no 3, pp. 6–14.
13. Yuping Zh. A micromechanics-based damage constitutive model of porous rocks. *International journal of rock mechanics and mining sciences*. 2016, no 91, pp. 1–6.
14. Chia-Chi Chiu, Meng-Chia Weng, Tsan-Hwei Huang Modeling rock joint behavior using a rough-joint model. *International journal of rock mechanics and mining sciences*. 2016, no 89, pp. 14–25.
15. Rakesh Kumar, Abhiram Kumar Verma Anisotropic shear behavior of rock joint replicas. *International journal of rock mechanics and mining sciences*. 2016, no 90, pp. 62–73.