

**ПРОГНОЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ
ГОРНОГО МАССИВА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ ШЕРШНЁВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
НЕФТИ
НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

С. В. Гладышев, С. Н. Попов, Д. В. Шустов
Пермский государственный технический университет

В данной статье рассматриваются вопросы безопасности геомеханических процессов при совместной разработке нефти и калийных солей. Задача решалась методом конечных элементов на основании трехмерной геологической модели коллектора.

Проблемы геомеханического характера в последние годы становятся все более острыми. Это связано, прежде всего, с истощением недр и, как следствие, более полным извлечением полезного ископаемого. Также на этом фоне все большее значение приобретает вопрос комплексной разработки месторождений. В частности, в Пермском крае проблема комплексного освоения недр в последнее время приобретает все большую значимость. Как известно, на территории Березниковского и Соликамского районов находятся огромные по площади и значению месторождения солей, а под ними располагаются нефтяные залежи промышленного значения. Подобная совместная разработка является уникальной, и процессы геомеханического характера по данному вопросу являются малоизученными. Для обеспечения безопасности горных работ, а также сохранности объектов на поверхности в данных условиях необходимо знать напряженно-деформированное состояние (НДС) горного массива и характер проявления процесса сдвижения при совместной эксплуатации нефтяных и калийных залежей.

Как известно, точность расчетов при выполнении прогнозирования процесса сдвижения зависит от многих параметров, таких как: правильно подобранная модель деформирования, использование наиболее точных физико-механических свойств пород, правильно построенная конечно-элементная модель, наиболее точно описанная геометрия. Особенностью данной работы является построение точной геометрической трехмерной модели коллектора в программном комплексе ANSYS

для расчета НДС методом конечных элементов на основании геологической модели бобриковского объекта, созданной в IRAP RMS.

Геологическая модель является слишком громоздкой для использования ее в программном комплексе ANSYS при геомеханическом моделировании. В связи с этим на основании исходной геологической модели, с помощью процедуры Upscaling, была построена гидродинамическая модель, содержащая гораздо меньшее количество ячеек. Трехмерные поля распределенных параметров (доля коллектора и нефтенасыщенность) и кровля залежи выводились из программного комплекса IRAP RMS в формате ASCII ECLIPSE GRDECL.

В результате мы получаем три текстовых файла с исходными данными. В одном из них находятся координаты узлов сетки геологической модели коллектора, в двух других – данные по нефтенасыщенности и доле коллектора. Учитывая большое количество узлов разностной сетки, построить конечно-элементную модель в ANSYS вручную является крайне трудоемкой задачей. В связи с этим была написана программа-конвертор на языке программирования в среде Delphi. Посредством данной программы координаты узлов переводились в необходимый формат, воспринимаемый пакетом ANSYS, и уже в нем отстраивалась геометрическая модель бобриковского объекта. Второй задачей являлось определение участков коллектора и неколектора. Граница коллектора определялась на основании данных о нефтенасыщенности и доле коллектора. В данной задаче принималось, что если нефтенасыщенность в элементе более 0,1 и доля коллектора более 0,4, то конечный элемент определялся как коллектор, в противном случае элемент определялся как неколектор. Распределение коллектора–неколектора показано на рис. 1.

Результатом работы программы становится выходной файл, с командами на языке APDL, воспринимаемым пакетом ANSYS. На основании данного файла в программе ANSYS достраивается модель, задаются граничные условия, запускается расчет.

При построении конечно-элементной схемы были учтены нижеизложенные соображения. Массив горных пород района месторождения слагает множество различных по составу пластов и пачек пород, выявленных по данным сейсморазведки и бурения нефтяных скважин. Детальное воспроизведение всех типов пород на расчетной схеме привело бы к значительному усложнению расчета и росту затрат машинного времени. Кроме того, усложнение расчетных схем в связи со значительной неопределенностью контактов пород и их физико-

механических свойств не приносит заметного повышения точности. В связи с этим при составлении расчетной схемы в ней были учтены только основные, укрупненные элементы геологического разреза. На рис. 2 показана общая расчетная схема задачи, отражающая геолого-физическую модель месторождения.

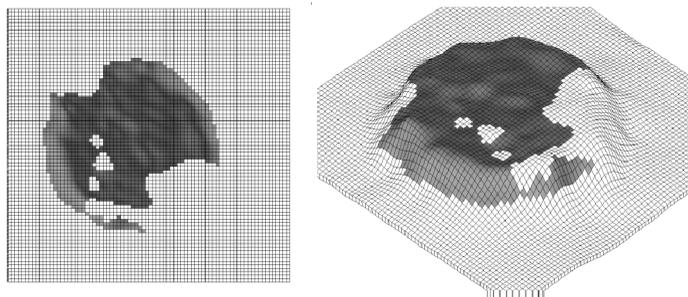


Рис. 1. Конечно-элементная модель пласта с разделением на коллектор (темный) и неколлектор (белый)

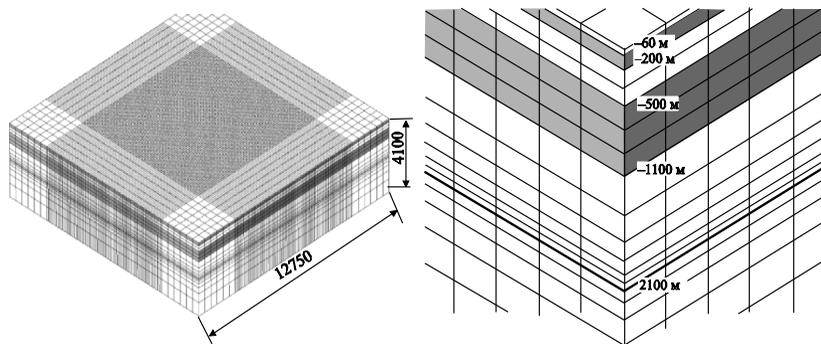


Рис. 2. Конечно-элементная модель горного массива

Исходными данными для расчета сдвижений и деформаций горного массива и земной поверхности являются, прежде всего, геологические и структурно-тектонические особенности, физико-механические свойства вмещающих пород, пород-коллекторов и параметры их естественного напряженного состояния.

Для определения упругих и прочностных свойств продуктивной толщи проводились лабораторные испытания образцов керна (табл. 1).

Таблица 1

**Результаты испытаний образцов бобриковского объекта,
скв. № 79 Шершнёвского месторождения**

№ образ-ца	Проч-ность кубиче-ского образца (МПа)	Проч-ность на сжа-тие (МПа)	Мо-дуль дефор-мации (ГПа)	Ко-эфф. Пуас-сона	Проч-ность на рас-тяжение (МПа)	Динам. модуль упругости (ГПа) (атм. условия)	
						Горный инсти-тут	«ПермНИ-ПИНЕФТЬ»
1	92,6	74,1	20,2	0,22	1,2	23,1	28,0
2	65,6	52,5	11,9	–	2,0	21,8	24,7
3	61,5	49,2	16,4	–	1,0	25,1	28,2
4	60,6	48,5	14,8	–	1,4	23,3	28,2
5	66,9	53,5	17,7	–	2,6	23,1	27,2
6	72,2	57,8	19,8	–	1,3	19,4	25,3
Сред-нее	69,8	55,9	16,8		1,6	22,6	26,9

Перед использованием полученных данных непосредственно в расчетах необходимо учесть следующее важное обстоятельство. В механике горных пород хорошо известен тот факт, что точечные испытания не моделируют поведение массива горных пород в целом, т. е. результаты лабораторных испытаний образцов керна пород не характеризуют прочность и упругость всего горного массива. Влияние слоистости, трещиноватости, других структурных особенностей приводит к тому, что прочность и модуль упругости массива может более чем на порядок быть меньше соответствующих величин для образца [1], [2].

В связи с этим для перехода от свойств в образце к свойствам в массиве использовались следующие два подхода. Первый подход заключался в оценке прочностных свойств массива горных пород путем использования так называемого коэффициента структурного ослабления $K_{стр}$, который показывает степень уменьшения прочности в массиве пород по сравнению с образцом. Величину коэффициента структурного ослабления можно оценить по результатам испытаний на прочность породных образцов различных размеров. Обширный материал на эту тему имеется в работе З. Бенявски [3]. Основной вывод таких испытаний состоит в том, что при увеличении размеров образца породы его прочность уменьшается, асимптотически приближаясь к некоторой величине, которая и характеризует свойства массива. При этом

предельный размер образца, при котором достигается асимптотическая прочность, составляет для разных пород от 1,0 до 1,5 м. На рис. 3 представлена зависимость асимптотического уменьшения прочности в массиве по отношению к прочности образца, составленная по данным З. Бенявски [3].

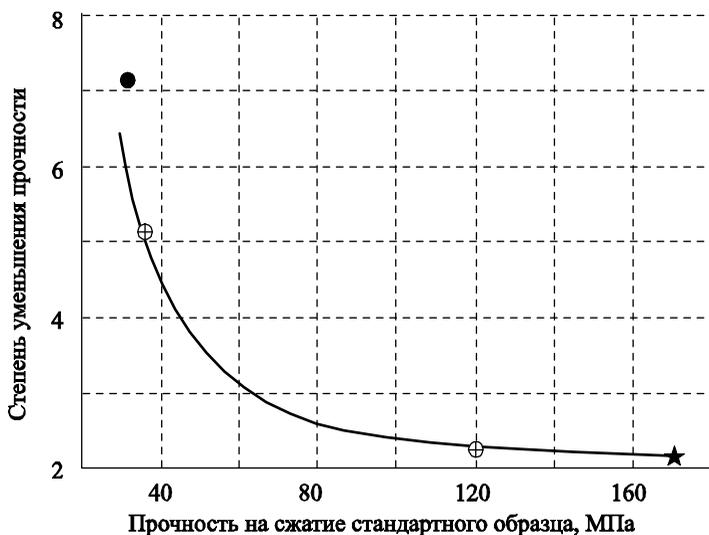


Рис. 3. Уменьшение прочности в массиве для некоторых горных пород

- – железная руда;
- ⊕ – диорит;
- – уголь;
- ★ – туф;

Второй подход заключался в определении свойств в массиве путем использования эмпирической методики К. Л. Тер-Микаэляна [4], которая связывает модуль упругости массива с коэффициентом крепости породы по Протодяконову (т.е. с прочностью на одноосное сжатие).

Предложенная К. Л. Тер-Микаэляном эмпирическая формула имеет следующий вид:

$$E = 10 f^4 (1-\nu) (26-f)^{-1},$$

где E – модуль упругости массива, МПа;
 f – коэффициент крепости по Протодьяконову;
 ν – коэффициент Пуассона.

Таким образом, используя различные эмпирические методы и результаты ранее выполненных испытаний образцов, можно произвести оценку физико-механических свойств пород-коллекторов месторождения по пределу прочности на одноосное сжатие (табл. 1), по рис. 3. находится коэффициент структурного ослабления $K_{стр}$. Далее, на основании модуля упругости в образце по формуле $E = E_0 / K_{стр}$ находится модуль упругости в массиве. Также находится модуль упругости по формуле Тер-Микаэляна.

Вмещающим породам задавались табличные значения физико-механических свойств согласно табл. 2, которые были получены для пород территории ВКМКС в более ранних работах из условия совпадения замеренных сдвижений земной поверхности и сдвижений полученных расчетным путем [5]. Для коллекторов приняты параметры, рассчитанные по формуле К. Л. Тер-Микаэляна с целью придания расчетам некоторого запаса надежности.

Весьма важным фактором при задании граничных условий является учет исходного напряженного состояния массива. При выполнении данных расчетов принималось исходное поле напряжений в соответствии с гипотезой А. Н. Динника о реализации в массиве только вертикальных перемещений.

Как известно, непосредственной причиной деформаций коллекторов и окружающих горных пород является падение пластового давления вследствие откачки флюидов. Естественно, что падение пластового давления является важнейшим параметром, который определяет уплотнение коллектора и деформации поверхности и массива горных пород. Падение пластового давления зависит от многих факторов и определяется как геологическими особенностями месторождения, так и применяемой системой разработки. Текущее пластовое давление является важнейшим технологическим параметром, поэтому его величина постоянно контролируется в ходе разработки нефтяных месторождений.

Физико-механические свойства пород

№ п/п	Тип пород	Мощность слоя, м	Модуль упругости, МПа		Коэффициент Пуассона	Объемный вес, МН/м ³
			По К. Л. Тер-Микаеляну	С учетом коэф. стр. ослабления		
1	Четвертичные отложения	60	500	–	0,40	0,018
2	Соляно-мергельная и терригенно-карбонатная толщи	140	1800	–	0,40	0,024
3	Каменная соль	300	4500	–	0,30	0,022
4	Глинисто-ангидритовая толща, филипповский горизонт, артинские отложения	600	3000	–	0,30	0,025
5	Карбонатные породы	3000	6000	–	0,26	0,027
6	Коллекторы	4–12	2000	10 500	0,22	0,020

На нефтяных месторождениях территории ВКМКС величина падения пластового давления обычно колеблется в пределах 5–10 МПа, в отдельные промежутки времени в некоторых случаях возможно большее падение давления. В дальнейшем по мере развития процессов заводнения происходит частичное восстановление исходного пластового давления. Это говорит о том, что наибольшие деформации пород-коллекторов и, соответственно, наибольшие оседания земной поверхности возможны в период наибольшего снижения пластового давления, т. е. на начальном этапе обработки месторождения.

Поэтому при выполнении расчетов достаточным является определение максимального оседания земной поверхности при обработке месторождения на первоначальном этапе в упругом режиме, т.е. при падении пластового давления в залежи в среднем на 10 МПа. Численный расчет состоит из двух этапов. На первом этапе рассчитывается исходное напряженное состояние горного массива, на втором этапе к эле-

ментам, моделирующим коллектор, прикладывается падение пластового давления. Для получения сдвижений горного массива, возникающего вследствие разработки нефтяных залежей, берется разница между вторым и первым этапом. На рис. 4 показано оседание земной поверхности и деформации коллектора при отработке Шершнёвского месторождения в упругом режиме.

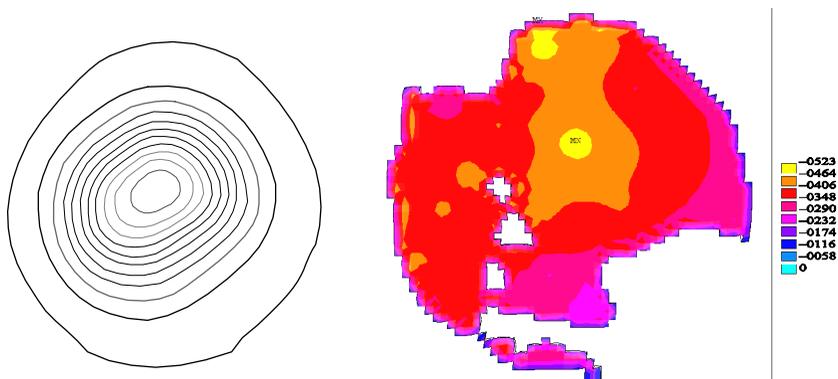


Рис. 4. Изолинии оседаний земной поверхности и величины деформации коллектора, м.

**A = -038; B = -034; C = -031; D = -027; E = -024; F = -021; G = -017;
H = -014; I = -010; J = -007; K = -004; L = 0**

Максимальное рассчитанное оседание земной поверхности на участке плоского дна мульды сдвижения составило 38 мм. Максимальные оседания в районе продуктивной толщи, на уровне кровли коллектора Бб, также малы и составляют 52,3 мм. Как и ожидалось, полученные оседания незначительны, что объясняется малой мощностью бобринского пласта Шершнёвского месторождения.

Произведем оценку влияния отработки месторождения на сохранность водозащитной толщи (ВЗТ) калийной залежи. Для этого исследуем вопрос об изменении касательных напряжений на уровне ВЗТ вследствие отработки, считая, что именно дополнительными касательными напряжениями можно оценить вклад влияния отработки месторождения на возникновение нарушений массива в виде сдвига. На рис. 5 приведен график распределения дополнительных касательных напряжений на уровне ВЗТ, при этом дополнительные напряжения

вычислялись как разница между начальными касательными напряжениями и напряжениями, возникшими вследствие отработки.

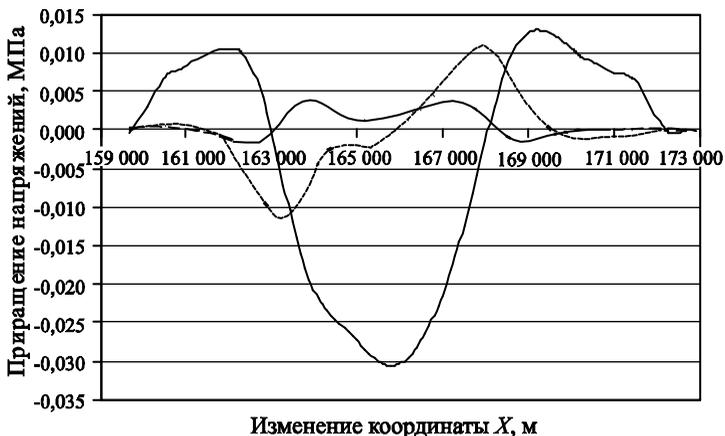


Рис. 5. Приращений напряжений на горизонте расположения соляной толщи (300 м):
 $-\Delta\tau_{xz}$; — $-\Delta\sigma_z$; — $-\Delta\sigma_x$

Из рис. 5 видно, что максимальная величина дополнительных касательных напряжений на уровне ВЗТ не превышает 0,013 МПа. По данным результатов испытаний предел прочности на сдвиг для соляных пород изменяется в диапазоне 1–2 МПа. Таким образом, становится ясным, что вклад, вносимый извлечением углеводородов на формирование сдвиговых нарушений в ВЗТ, составляет 0,6–1,2 %. При этом максимальные величины дополнительных сдвигающих напряжений приурочены к границе приложения падения пластового давления в коллекторе. С целью подтверждения полученного вывода оценим влияние изменения горизонтальных деформаций растяжения на сохранность соляной толщи, т.к. известно, что опасность возникновения вертикальных трещин отрыва связана с формированием горизонтальных деформаций растяжения. Согласно результатам испытаний, для соляных пород критические значения деформаций растяжения составляют порядка 1–2 мм/м. На рис. 6 представлен график дополнительных горизонтальных деформаций вследствие отработки залежи на уровне соляной толщи. Из рис. 6 видно, что максимальные горизонтальные деформации растяжения не превышают величины 0,003 мм/м, что почти на три порядка меньше допустимых величин. Таким обра-

зом, можно сделать окончательный вывод о том, что обработка Шершнёвского месторождения практически не влияет на сохранность ВЗТ.

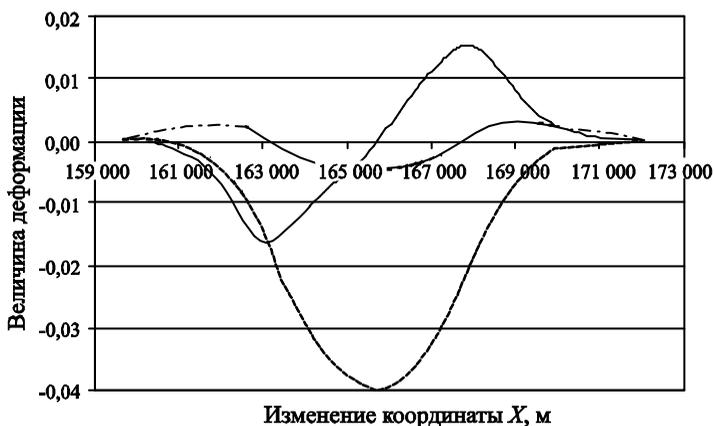


Рис. 6. Деформации горного массива на горизонте расположения соляной толщи (300 м):

----- η, м; — — — ε, мм/м; — ι, мм/м

Рассмотрим вопрос о влиянии добычи нефти на состояние междукамерных целиков. Для этого проанализируем возникающие дополнительные величины вертикальных нагрузок на уровне калийной залежи. На рис. 6 представлен график дополнительных вертикальных напряжений. Положительные значения соответствуют уменьшению нагрузки, отрицательные – увеличению. Отметим, что над обрабатываемыми пластами возникает зона разгрузки, в краевой части нефтяных пластов, наоборот, наблюдается увеличение вертикальной компоненты, однако величина прироста достаточно мала и составляет порядка 0,004 МПа. Известно, что несущая способность междукамерных целиков в зависимости от их геометрических размеров при длительном приложении нагрузки колеблется от 8 МПа у податливых целиков до 26–30 МПа у жестких. Становится ясным, что дополнительная нагрузка на междукамерные целики вследствие разработки нефтяных залежей ничтожно мала и составляет порядка 0,05 % от длительной несущей способности. Отметим, что данные выводы аналогичны выводам, полученными сотрудниками ГИ УрО РАН при анализе того вклада, который дает

добыча нефти на месторождении им. Архангельского в НДС междукамерных целиков.

При решении задачи нахождения НДС горного массива при разработке бобриковского продуктивного объекта Шершнёвского месторождения нефти была построена точная геометрическая трехмерная модель коллектора на основании геологической модели, для чего была написана универсальная программа-конвертор. По результатам расчета можно сделать вывод, что вследствие разработки данного месторождения вредного воздействия на ВЗТ и междукамерные целики Верхнекамского месторождения калийных солей с геомеханической точки зрения оказываться не будет, оседания на земной поверхности незначительны и в месте максимума составляют 38 мм.

Список литературы

1. Турчанинов И. А. Основы механики горных пород / И. А. Турчанинов, М. А. Иофис, Э. В. Каспарьян. – СПб: Недра, 1989. – 488 с.
2. Wittke W. Rock Mechanics, Theory and Applications with case histories. – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokio, Hongkong, Barcelona. – 1990a.
3. Фадеев А. Б. Прочность и деформируемость горных массивов / А. Б. Фадеев. – М.: Недра, 1979. – 270 с.
4. Тер-Микаелян К. Л. О связи удельного коэффициента отпора и модуля деформации горных пород с коэффициентом крепости по М. М. Протодьяконову / К. Л. Тер-Микаелян // Труды Гидропроекта, 1974. – Вып. 33. – С. 116–122.
5. Кашников Ю. А. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья / Ю. А. Кашников, С. Г. Ашихмин. – М.: Недра, 2007. – 467 с.