

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГИДРАТОСОДЕРЖАЩИХ ПОРОДАХ ПРИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С МОРСКИМИ СООРУЖЕНИЯМИ И СКВАЖИНАМИ

И.А. Гарагаш
ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, e-mail: garagash@mail.ru

Задачи исследований в 2013г.:

1. Анализ изменений напряженно-деформированного состояния коллектора при извлечении метана из природного газового гидрата путем инъекции в пласт двуокиси углерода, заменяющей часть молекул метана в твердом газовом гидрате.
2. Изучение взаимодействия скважины с гидратосодержащей осадочной толщей.

Введение

Метан при определенных давлениях и температурах образует кристаллогидраты, структура которых зависит от давления и температуры [Макогон, 2010]. В настоящее время установлено, что объемы метана в «твердом» виде сопоставимы с запасами всех остальных, известных на сегодняшний день углеводородов. Извлечение природного газа из гидратов представляет сложную техническую задачу. Существующие способы заключаются в нагревании и декомпрессии гидратов с целью выделения природного газа. Недостаток таких методов состоит в том, что они требуют больших затрат энергии и ведут к разрушению гидратных формаций. Следствием этого может быть исчерпание несущей способности коллектора и бифуркация процесса деформирования, приводящая к локализации деформации в отдельных зонах [Гарагаш, 2012]. Поэтому все большее внимание привлекает третий способ извлечения природного газа из газогидрата, основанный на замещении метана диоксидом углерода (т. е. переформирование гидрата метана в гидрат диоксида углерода). При таком способе добычи гидратная формация остается стабильной и происходит консервация больших количеств диоксида углерода.

Однако и в этом случае наблюдается изменение физических свойств гидрата [Jung et al, 2010]. Механические свойства гидрата (модуль объемного сжатия и модуль сдвига) при замене CH_4 на CO_2 практически не меняются. Увеличивается плотность гидрата, поскольку

плотность гидрата углекислого газа составляет $\rho_{\text{CO}_2} = 1110 \text{ kg/m}^3$, а плотность гидрата метана равна $\rho_{\text{CH}_4} = 929 \text{ kg/m}^3$. Другая особенность состоит в том, что при соединении метана с водой объем гидрата увеличивается и отношение $V_{\text{hyd}}^{\text{CH}_4} / V_{\text{water}} = 1.234$, тогда как в случае соединения с водой диоксида углерода это отношение равно $V_{\text{hyd}}^{\text{CO}_2} / V_{\text{water}} = 1.279$. Следовательно, замена CH_4 на CO_2 приводит к объемному расширению гидрата в порах на величину $\varepsilon = \Delta V / V_{\text{water}} = 0.045$. Если увеличение плотности относительно невелико и не ведет к большим изменениям напряженного состояния, то возникающая дилатансия $\varepsilon = 0.045$ может привести к разрушению коллектора.

Для изучения изменений напряженного состояния коллектора и скважины при извлечении метана из природного газового гидрата путем замещения диоксидом углерода части молекул метана в твердом газовом гидрате созданы геомеханические модели и выполнены численные расчеты, которые показали, что наибольшее влияние на напряженное состояние оказывает эффект дилатансии. Этот процесс сопровождается пластическим течением осадочной толщи и может привести к разрушению коллектора и скважины.

1. Изменение напряженного состояния коллектора при инъекции в пласт двуокиси углерода, заменяющей часть молекул метана в твердом газовом гидрате

При создании расчетной модели будем ориентироваться на строение мощного газогидратного месторождения Маллик, расположенного за Полярным кругом, в дельте реки Маккензи на берегу моря Бофорта (Северо-Западные Территории, Канада). Газогидратная залежь находится под слоем вечной мерзлоты толщиной около 640 м и состоит из последовательности как минимум десяти гидратонасыщенных песчаных прослоек индивидуальной толщиной до 30 м и общей мощностью более 110 м, лежащих в интервале глубин от 890 до 1106 м, в гребне свода региональной антиклинали (рис. 1). Высокая гидратонасыщенность указанных песчаных прослоек, в некоторых случаях превышающая 80% от объема порового пространства, делает Маллик одним из наиболее концентрированных скоплений природных газовых гидратов в мире.

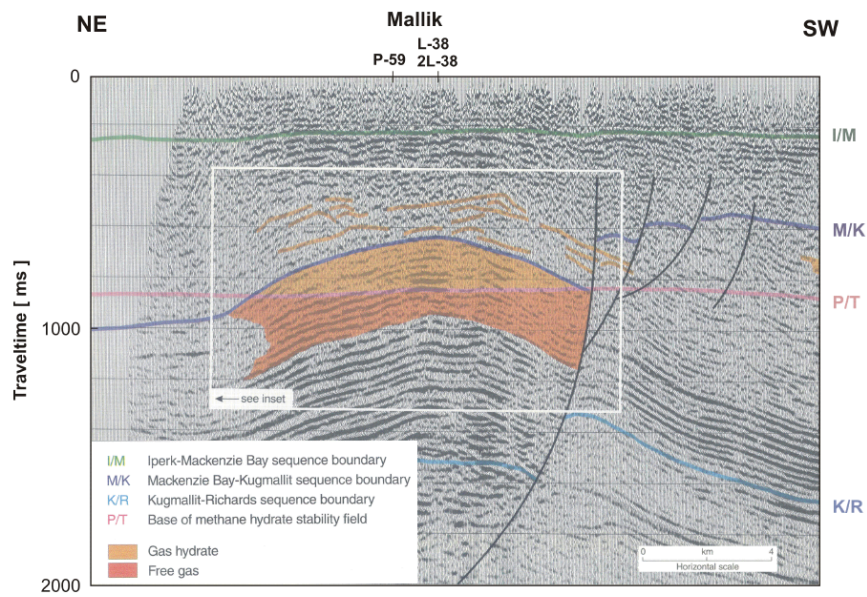


Рис. 1. Сейсмический профиль через месторождение Маллик. Оранжевым цветом показано скопление газогидратов

Для изучения поведения коллектора в условиях замещения метана углекислым газом рассмотрим трехмерную модель, представленную на рис. 2. Характерные размеры модели соответствуют месторождению Маллик. Серым цветом обозначены зоны, в пределах которых уменьшается поровое давление.

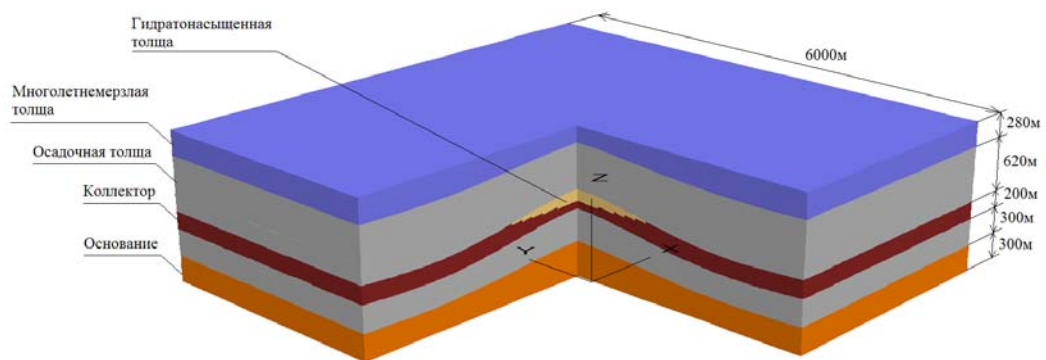


Рис. 2. Расчетная схема месторождения

Деформируемая среда, моделируемая с помощью программного пакета FLAC^{3D*}, в каждый момент времени удовлетворяет уравнениям движения

$$\sigma_{ij,j} + M_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2},$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, M_i – массовые силы, ρ – плотность, u_i – смещения.

Будем исходить из того, что вмещающая среда и месторождение ведут себя как упругопластический пористый материал с предельным условием Кулона – Мора.

Прежде чем подвергнуть резервуар изменению порового давления, было смоделировано его начальное напряженное состояние, сформировавшееся под действием сил собственного веса. Начальное распределение средних напряжений (первый инвариант тензора напряжений) и максимальные касательные напряжения показаны на рис. 3а и 3б соответственно. Поскольку система имеет две вертикальные плоскости симметрии, показан только сегмент модели.

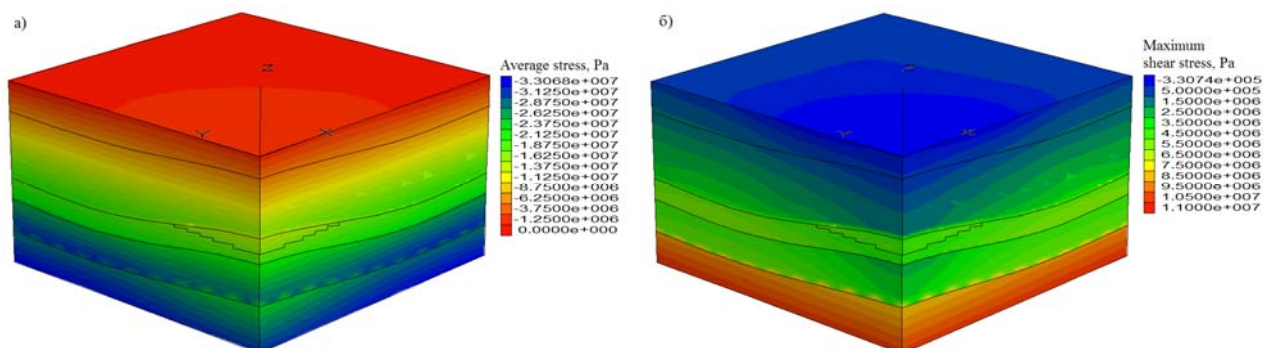


Рис. 3. Начальное распределение средних напряжений (а) и максимальных касательных напряжений (б)

Заметим, что куполовидное строение толщи и более жесткое газогидратное включение накладывают свой отпечаток на распределение напряжений.

* Itasca Consulting Group, Inc. 2006. FLAC3D – Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. Ver. 3.1. User's Manual. Minneapolis: Itasca.

После того как произойдет вытеснение метана диоксидом углерода, вес газогидрата увеличится. Исходя из пористости 0.3 и полагая полное замещение метана, вычислим изменения напряжений и деформаций в системе. На рис. 4 показаны приращения средних напряжений и максимальных касательных напряжений. Очевидно, что изменения приурочены к включению газогидрата, но вследствие малости относительных приращений плотности изменения невелики и не превышают десятка килопаскалей. Также невелики и изменения деформаций (рис. 5) и смещений (рис. 6).

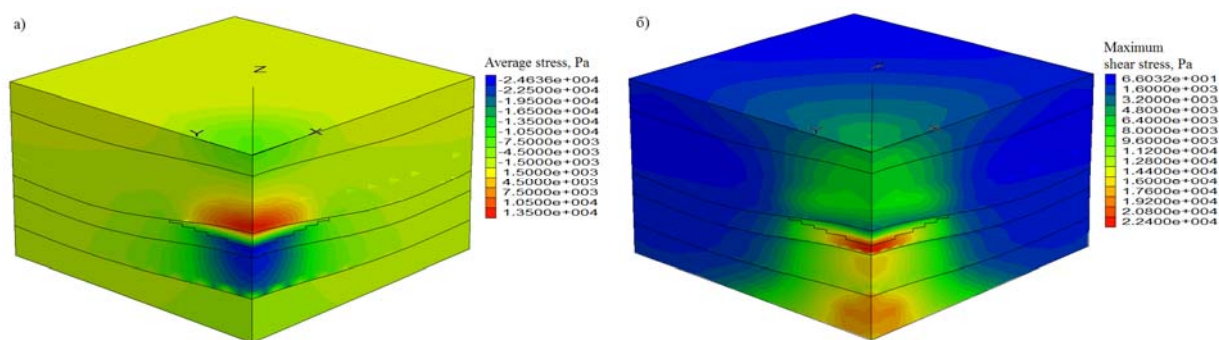


Рис. 4. Распределение средних напряжений (а) и максимальных касательных напряжений (б) при увеличении плотности гидрата в результате замещения метана диоксидом углерода

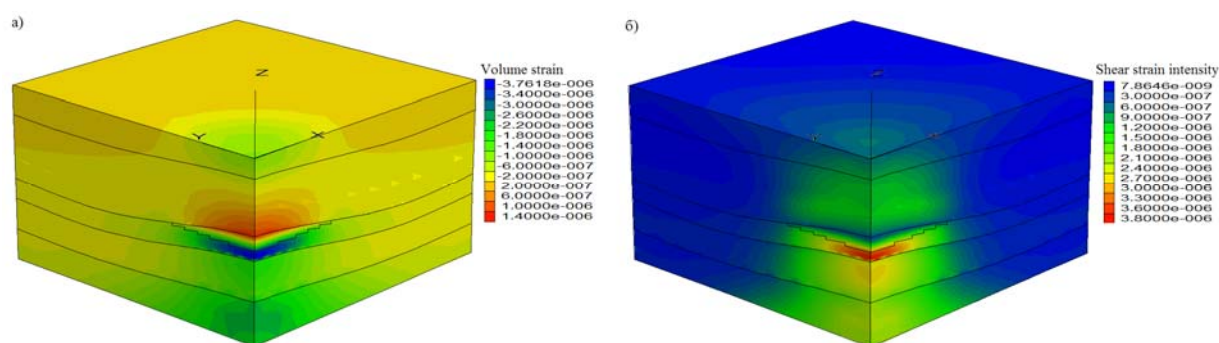


Рис. 5. Распределение объемных деформаций (а) и интенсивности сдвиговых деформаций (б) при увеличении плотности гидрата в результате замещения метана диоксидом углерода

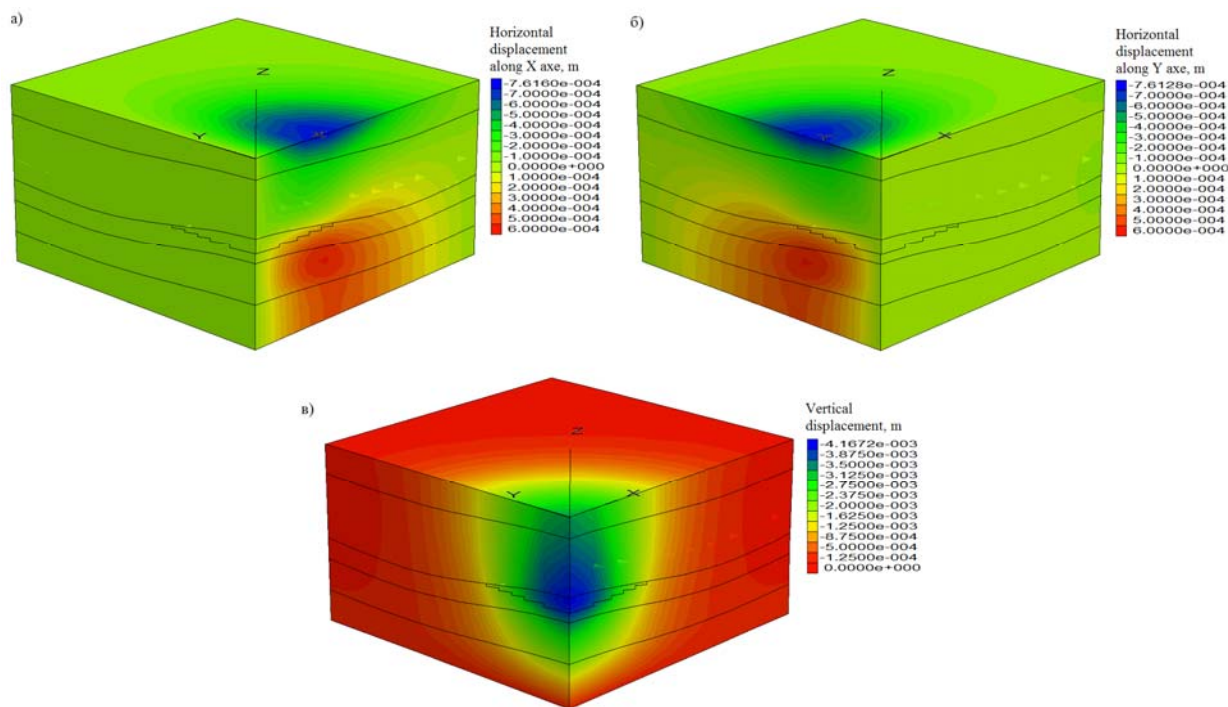


Рис. 6. Распределение горизонтальных (а, б) и вертикальных (в) смещений при увеличении плотности гидрата после замещения метана диоксидом углерода

Наибольшее влияние на напряжения и деформации оказывает дилатансия гидратов. На рис. 7 показано распределение приращений средних напряжений и максимальных касательных напряжений. Видно, что в этом случае изменения измеряются мегапаскалями. Причем они сконцентрированы внутри газогидратного включения. Большая пластическая зона, охватывающая включение, свидетельствует о том, что процесс деформирования был нелинейным.

Распределение объемных деформаций и сдвиговой деформации (рис. 8) также велико и имеет тот же характер, что и средние напряжения и максимальные касательные напряжения.

Как следует из рис. 9, вертикальный подъем поверхности может достигать 1 м, а максимальные горизонтальные смещения составляют около 0,5 м.

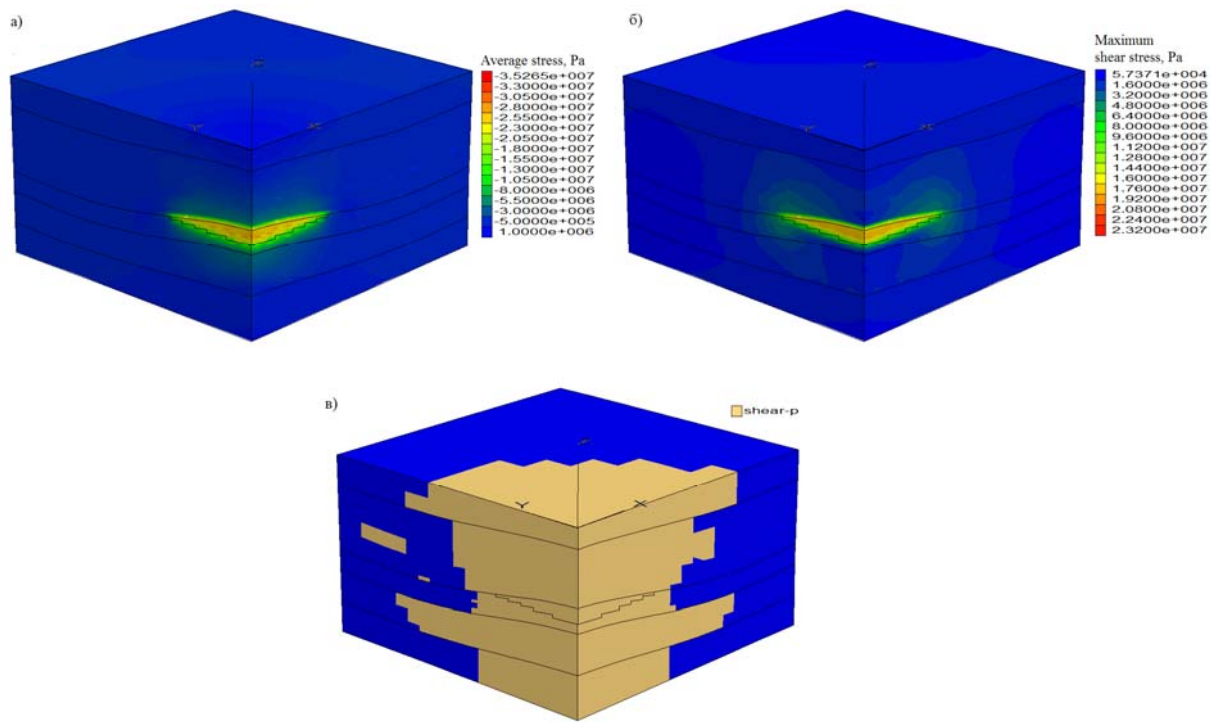


Рис. 7. Распределение средних напряжений (а) и максимальных касательных напряжений (б) при дилатансии гидрата в результате замещения метана диоксидом углерода; в) распределение зон пластического течения

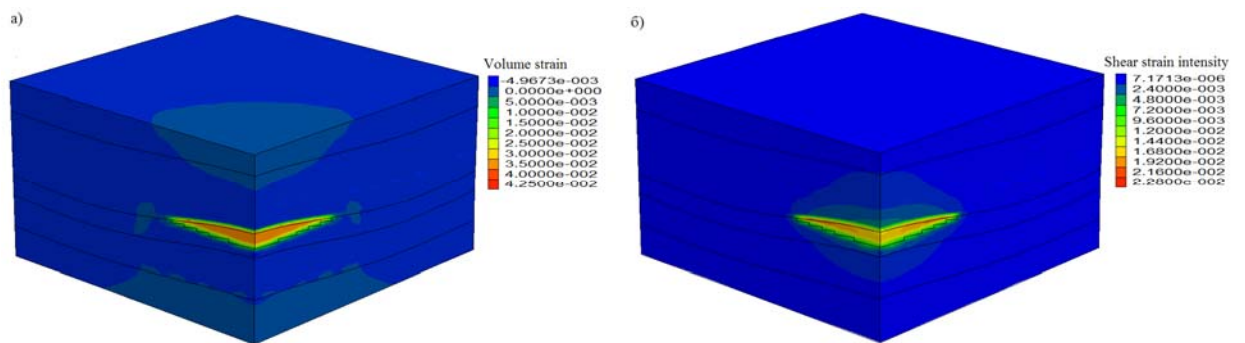


Рис. 8. Распределение объемных деформаций (а) и интенсивности сдвиговых деформаций (б) при дилатансии гидрата в результате замещения метана диоксидом углерода

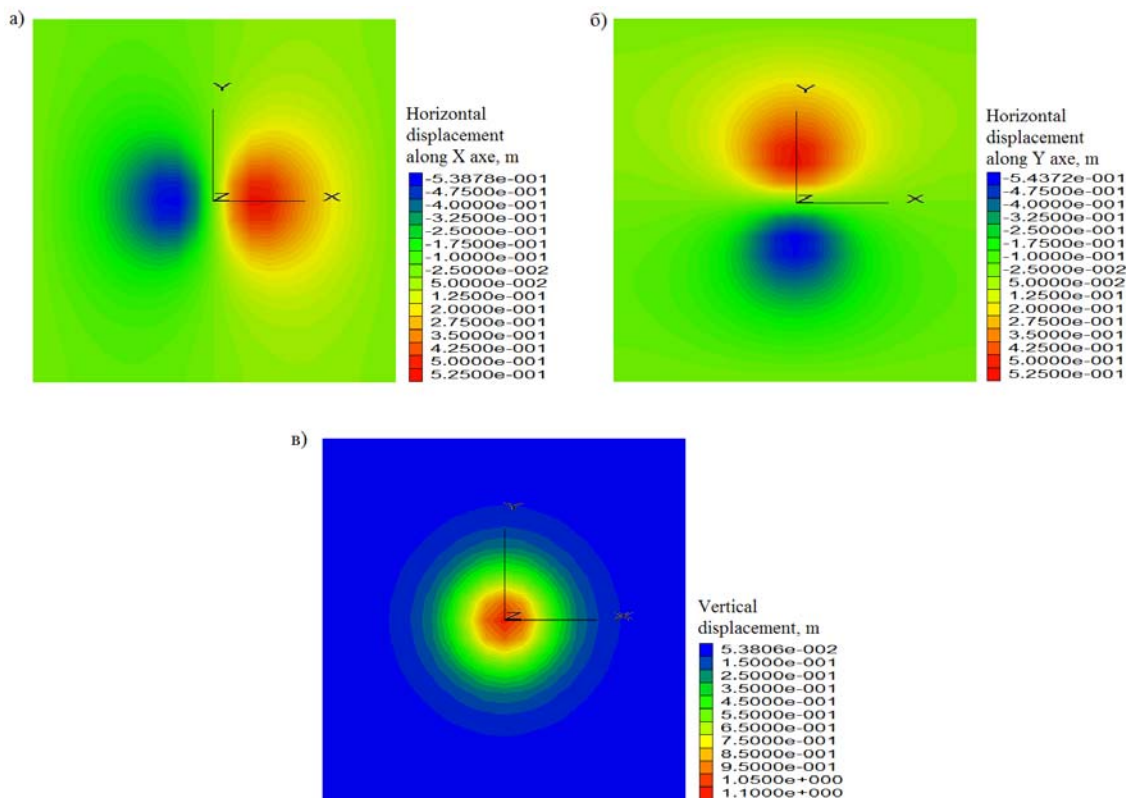


Рис. 9. Распределение на поверхности горизонтальных (а, б) и вертикальных (в) смещений при дилатансии гидрата после замещения метана диоксидом углерода

2. Изменение напряженного состояния скважины при дилатансии гидрата в результате замещения метана диоксидом углерода

Изучим напряженно-деформированное состояние необсаженной скважины, показанной на рис. 10а. Скважина радиусом 5 см проходит через осадочную толщу на глубине 1000 м и пересекает газогидратное включение. Забой скважины расположен на контакте включения с осадочной толщей. Диоксид углерода диффундирует во включение. Нормированное распределение гидрата углекислого газа, использованное для расчета, показано на рис.10б.

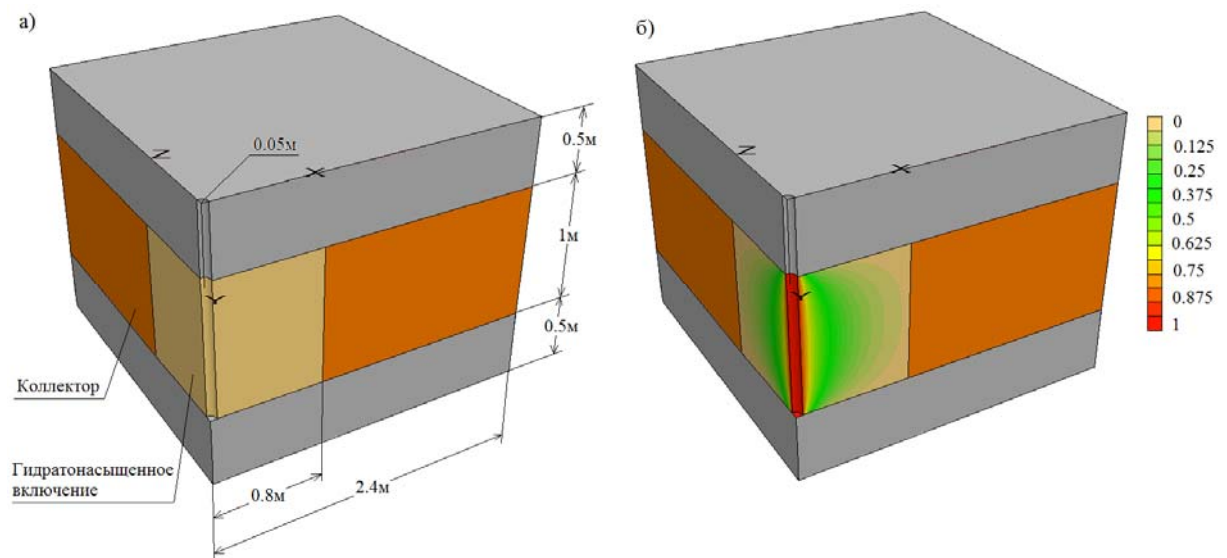


Рис. 10. Расчетная схема скважины

Сначала, как и в предыдущем случае, рассчитывается начальное распределение напряжений. Предполагается, что по вертикали действует напряжение $\sigma_{yy} = -1.85 \cdot 10^7 \text{ Pa}$, а распределение напряжений в плоскости анизотропно – $\sigma_{xx} = -1.0 \cdot 10^7 \text{ Pa}$, $\sigma_{zz} = -2.0 \cdot 10^7 \text{ Pa}$.

Затем выполняется расчет напряжений и деформаций, вызываемых дилатансией гидратного включения (см. рис. 10б).

На рис. 11 показано распределение приращений средних напряжений и максимальных касательных напряжений. Видно, что максимальные касательные напряжения ориентированы вдоль оси Z по направлению максимального сжатия (см. рис. 11б). В этом же направлении вытянута и зона пластического течения (см. рис. 11в).

Распределение объемной и сдвиговой деформаций приведено на рис. 12. Соответствующие им смещения показаны на рис. 13.

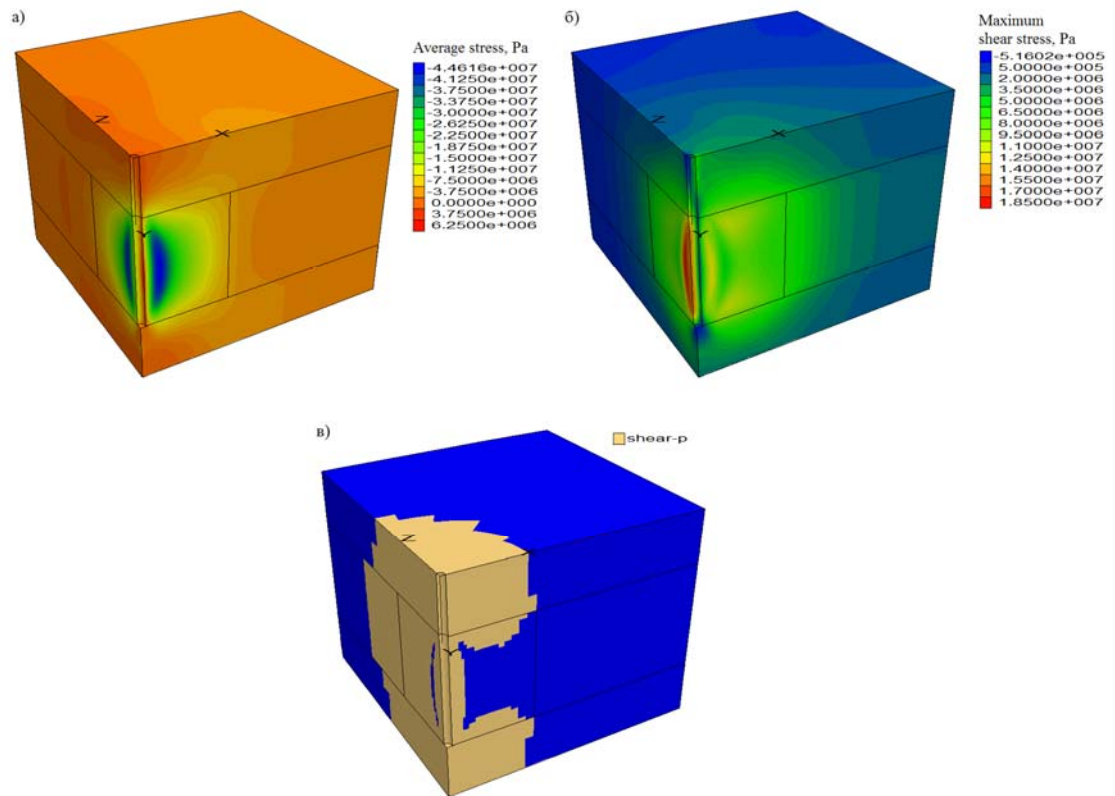


Рис. 11. Распределение средних напряжений (а) и максимальных касательных напряжений (б) при дилатансии гидратного включения в окрестности скважины в результате замещения метана диоксидом углерода; в) распределение зон пластического течения

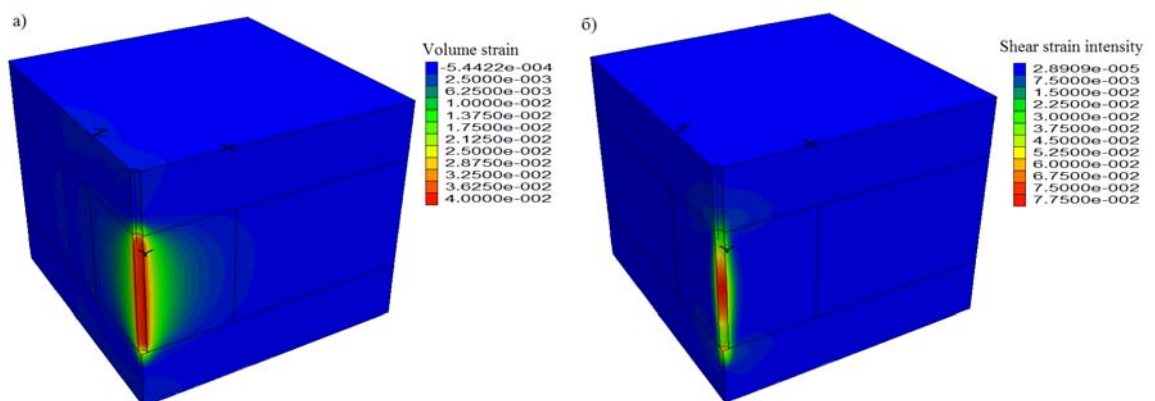


Рис. 12. Распределение объемных деформаций (а) и интенсивности сдвиговых деформаций (б) при дилатансии гидратного включения в окрестности скважины в результате замещения метана диоксидом углерода

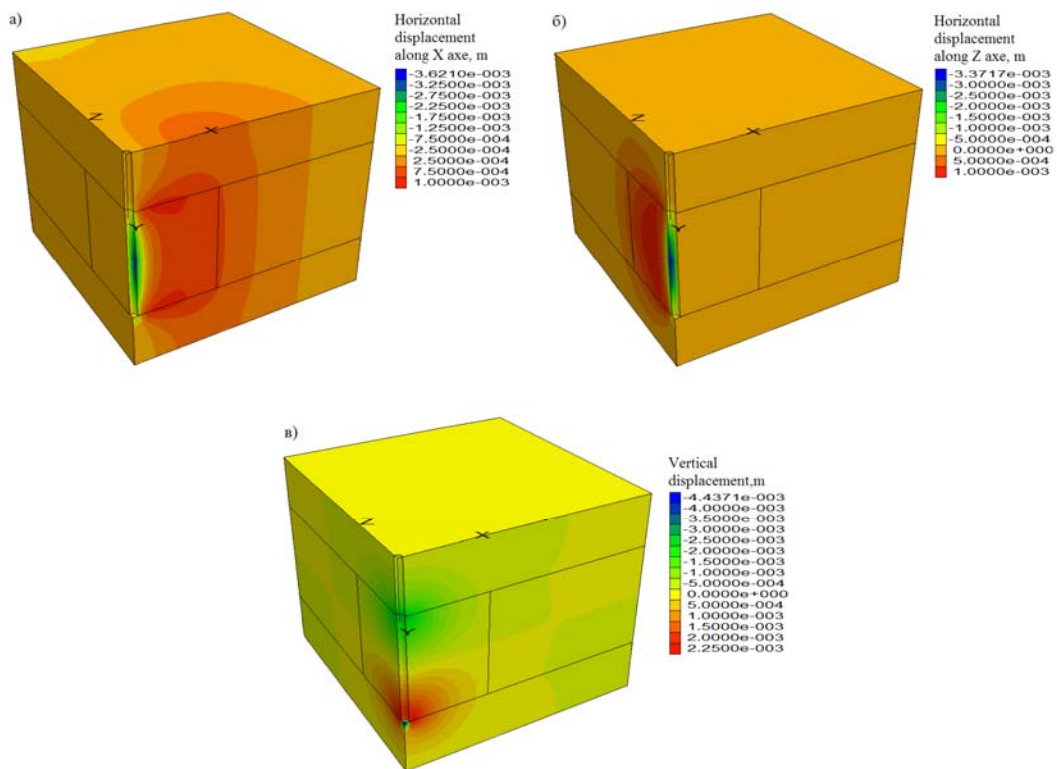


Рис. 13. Распределение горизонтальных (а, б) и вертикальных смещений (в) при дилатансии гидратного включения в окрестности скважины в результате замещения метана диоксидом углерода

Анализ рис. 13 показывает, что дилатансия включения существенно изменяет напряженное состояние в окрестности скважины и вызывает ее пластическое деформирование. Это может привести к разрушению скважины.

Заключение

Замещение в газогидрате молекул метана CH_4 диоксидом углерода CO_2 приводит к объемному расширению гидрата в порах на заметную величину. В результате в пределах газогидратного включения значительно возрастают средние и касательные напряжения. Процесс деформирования при этом развивается нелинейно и возникает большая пластическая зона, охватывающая включение и прилегающие породы, что может вызвать разрушение

коллектора и скважины. Вертикальный подъем поверхности над разрабатываемым месторождением может достигать 1 м.

ЛИТЕРАТУРА

- Гарагаш И.А.* Моделирование геомеханических процессов при эксплуатации месторождений газа в многолетнемерзлых и гидратосодержащих породах // Электрон. науч. журнал «Георесурсы, геознергетика, геополитика». 2012. Вып. 2(6). – Режим доступа: <http://oilgasjournal.ru>.
- Макогон Ю.Ф.* Газогидраты. История изучения и перспективы освоения // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2010. № 2. С. 5–21.
- Jung J.W., Nicolas Espinoza D., Carlos Santamarina J.* Properties and phenomena relevant to CH₄-CO₂ replacement in hydrate-bearing sediments // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115, issue B10.