

# Результаты численного моделирования процессов формирования соляных диапиров в температурном поле \*

А.А. БАЙМУХАМЕТОВ

*Институт механики и машиноведения*  
*им. У.А. Джолдасбекова МОН Республики Казахстан*  
e-mail: nikmar50@mail.ru

Н.И. МАРТЫНОВ

А.Г. ТАНИРБЕРГЕНОВ

## Аннотация

Обсуждаются результаты численного моделирования напряженно-деформируемого состояния осадочного комплекса и подсолевого ложа, формирования нефтегазовых ловушек. Показано, что области нефтегазовых ловушек приурочены к повышенным термическим градиентам.

**Введение.** Изучение формирования солянокупольных структур и мантйных диапиров имеет большое научное и практическое значение, поскольку с последним связано распределение месторождений нефти и газа, а также полезных ископаемых в земной коре. Кроме того, соляные структуры используются в качестве подземных хранилищ нефти и газа, а также "хранилищ-консерваторов" термоядерных отходов.

В Казахстане многие задачи солянокупольной тектоники были поставлены академиком Ж.С. Ержановым, и под его руководством решен ряд задач его учениками. Были разработаны и обоснованы несколько численных методов, позволяющих корректно проследить эволюцию поверхности раздела слоев вплоть до образования соляных линз. Численное моделирование позволило провести детальный анализ механизма формирования солянокупольных структур, выявить закономерности и особенности их формирования, описать ее фазы развития и вид основных характеристик в зависимости от различных физико-геометрических параметров среды. В [1] подведен итог этих многолетних исследований.

В работе [2] показана возможность существования мелкомасштабной тепловой конвекции в верхних горизонтах земной коры. Последняя ока-

---

\*

зывает существенное влияние на распределение и формирование соляных диапиров в осадочном чехле.

В настоящем исследовании обсуждаются результаты численного моделирования напряженно-деформируемого состояния осадочного комплекса и подсолевого ложа, формирования нефтегазовых ловушек. Показано, что области нефтегазовых ловушек приурочены к повышенным термическим градиентам.

В данном исследовании авторы ограничились рассмотрением плоской модели с выделением нефтегазовых ловушек на основе оценки зон, где максимален девиатор касательных напряжений.

Математическая модель и ее численная реализация и обоснование приведены в работах [1,2].

**Результаты численного моделирования.** На рисунках 1а-1е показано формирование основного соляного диапира и вторичных диапиров в различные моменты безразмерного времени. Первоначальное распределение температуры по пространству было задано линейной функцией вертикальной координаты. На верхней стенке поддерживалась нулевая температура, на нижней -  $250^{\circ}\text{C}$ . В двух точках расчетной сетки, моделирующих локальный источник тепла, температура задавалась на  $50^{\circ}\text{C}$  выше. Первоначальная граница раздела – прямая линия. Кроме того, на рисунках 1а, 1в, 1д изображены изотермы  $T=\text{const}$ , а на рисунках 1б,1г,1е изображены изолинии девиатора касательных напряжений  $\tau = \text{const}$ .

Расчеты показали, что величина компонент напряжений для развитой фазы примерно в 2-2,5 раза больше, чем для менее развитой фазы. Верхняя часть надкупольного пространства и самого купола представлена растягивающими горизонтальными напряжениями и сжимающими вертикальными напряжениями. Нижняя часть купола представлена сжимающими напряжениями. Нижняя центральная часть купола характеризуется примерно одинаковой интенсивностью вертикальных напряжений, а наибольшее различие в интенсивности характерно для её периферийной части. Величина касательных напряжений изменяется в 1-1,5 раза, что связано с формированием вихревой зоны. Следует отметить, что распределение напряжений во времени согласуется с механизмом и формированием соляного купола. Аналогичная картина наблюдается в области формирования периферийных куполов.

Сопоставление рисунков 1б, 1г, 1е показывает, что развитая фаза солянокупольного диапиризма характеризуется более интенсивными девиаторами касательных напряжений, чем менее развитая фаза. Отличие местами составляет в 3 и более раза. Наибольшие по величине девиаторы касательных напряжений в развитой фазе наблюдаются в областях надкрылового, подкрылового и нижней центральной частях купола. Следовательно, вероятные нефтегазовые ловушки образуются в примыкающих к крыльям куполов областях. Простая оценка площадей этих областей и дает возможные вероятные объёмы углеводородов.

На рисунках 1а, 1в, 1д изображены изотермы, соответствующие процессу формирования диапиров. Как видно из этих рисунков изотермы высоких

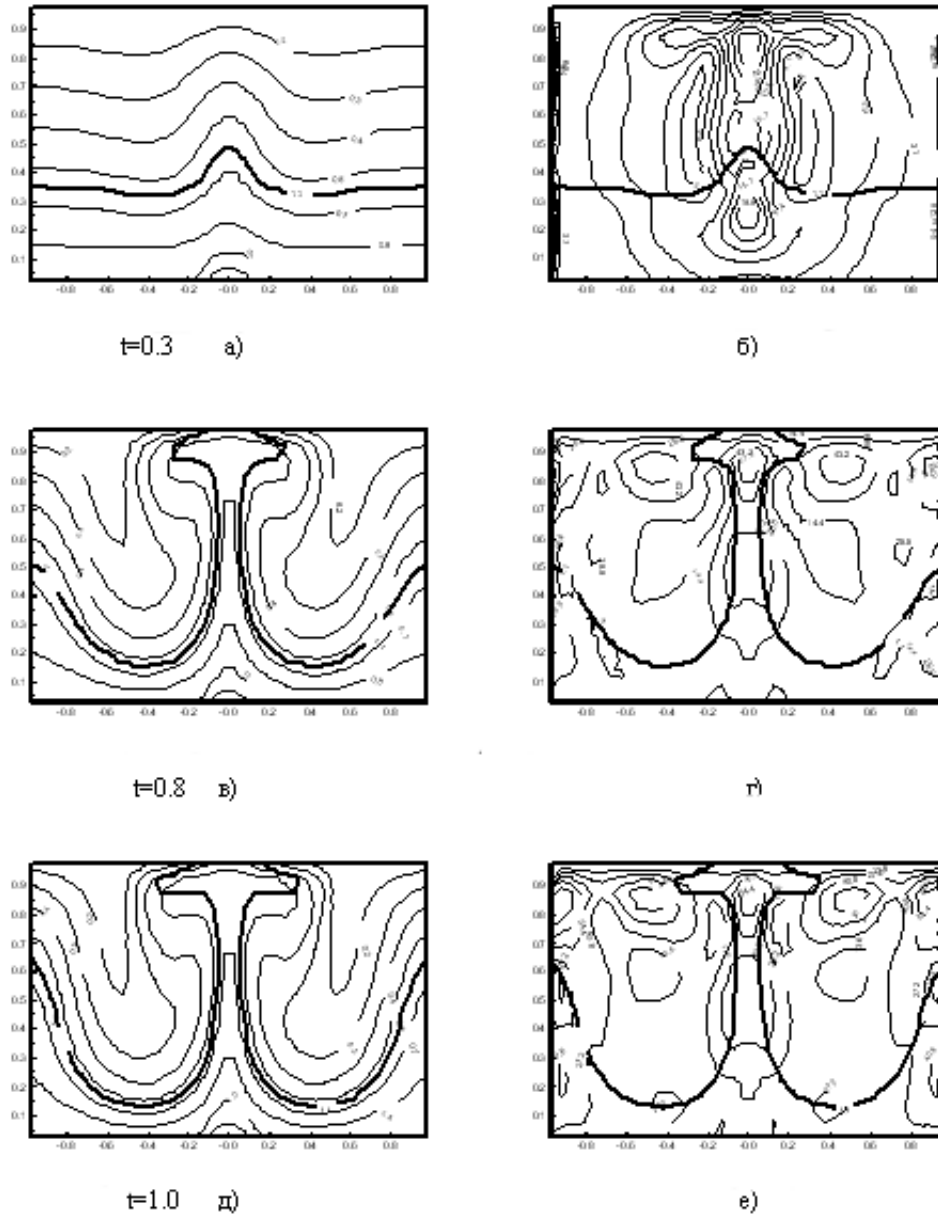


Рис. 1: Формирование диапиров во времени (двухслойная модель) и распределение изотерм и изолиний девиатора касательных напряжений. Динамические вязкости слоев:  $\mu_1 = 10^{18}$ ,  $\mu_2 = 5 \cdot 10^{17}$ .

температур изогнуты сильнее, чем низких. Этот факт указывает на концентрацию движения в областях с повышенной температурой. При развитой гравитационной неустойчивости изотермы сильно изогнуты и диоморфны профилю соляного диапира. Изотермы от 0,3 до 0,5 заполняют область, прилегающую к крыльям соляного купола. Поэтому в этих областях температура повышена на 30 – 90<sup>0</sup>С относительно соседних областей осадочного чехла. Хорошо известно, что величина геотермического градиента является одним из главных параметров и признаков генерации полезных ископаемых [3]. Повышение температуры на 10<sup>0</sup>С увеличивает скорость химической реакции в два раза в средах, благоприятных для выделения углеводородных соединений, в том числе нефти. В работе [3] построены карты распределений геотермического градиента верхней части земной коры и теплового потока Казахстана.

Анализ этих карт показал, что месторождения Западного Казахстана и акватория Аральского моря расположены в зонах с повышенным уровнем геотермического градиента. Распределение изотерм на рисунках 1а, 1в, 1д и распределение зон повышенных девиаторов касательных напряжений на рисунках 1г, 1е количественно подтверждают, что углеводородные запасы привязаны к областям с повышенными температурными градиентами.

Расчеты показали, что на формирование диапиров существенное влияние оказывают локальные источники тепла. При нулевой начальной температуре в осадочном чехле изотермы изгибаются в процессе формирования диапиров, но остаются в теле куполов. Это говорит о том, что процесс гравитационной неустойчивости преобладает над тепловыми эффектами. Конвекция просто не успевает развиваться.

На рисунках 2а-2е показана эволюция формирования соляного диапира в глубоко залегающих осадочных комплексах (на глубинах 6-15 км).

Первоначальное распределение температуры по пространству было задано линейной функцией вертикальной координаты. На верхней стенке подерживалась нулевая температура, на нижней - 380<sup>0</sup>С. В трех точках расчетной сетки, моделирующих локальный источник тепла, температура задавалась на 70<sup>0</sup>С выше. Рисунки 2а, 2в, 2д дают представление о распределении изотерм как в осадочном чехле, так и в теле купола и подсолевого ложа. Рисунки 2б, 2г, 2е дают представление о распределении изолиний девиаторов касательных напряжений. Как видно из этих рисунков, термические градиенты оказывают существенное влияние на формирование подсолевого ложа, сильно деформируя подкупольное пространство (области границ раздела галит-подкупольные осадочные породы). В подсолевом ложе наблюдаются обширные области, в которых повышены и достаточно большие по абсолютной величине девиаторы касательных напряжений. В нижней центральной части купола за счет динамического давления и повышенной температуры осуществляется значительный подсос подсолевого ложа. Поэтому, если в подсолевом ложе присутствуют большие запасы углеводородов, то они будут вследствие дегансии мигрировать в центральную часть подкупольного пространства. Количественная оценка этих объемов позволяет определить вероятные запасы углеводородов.

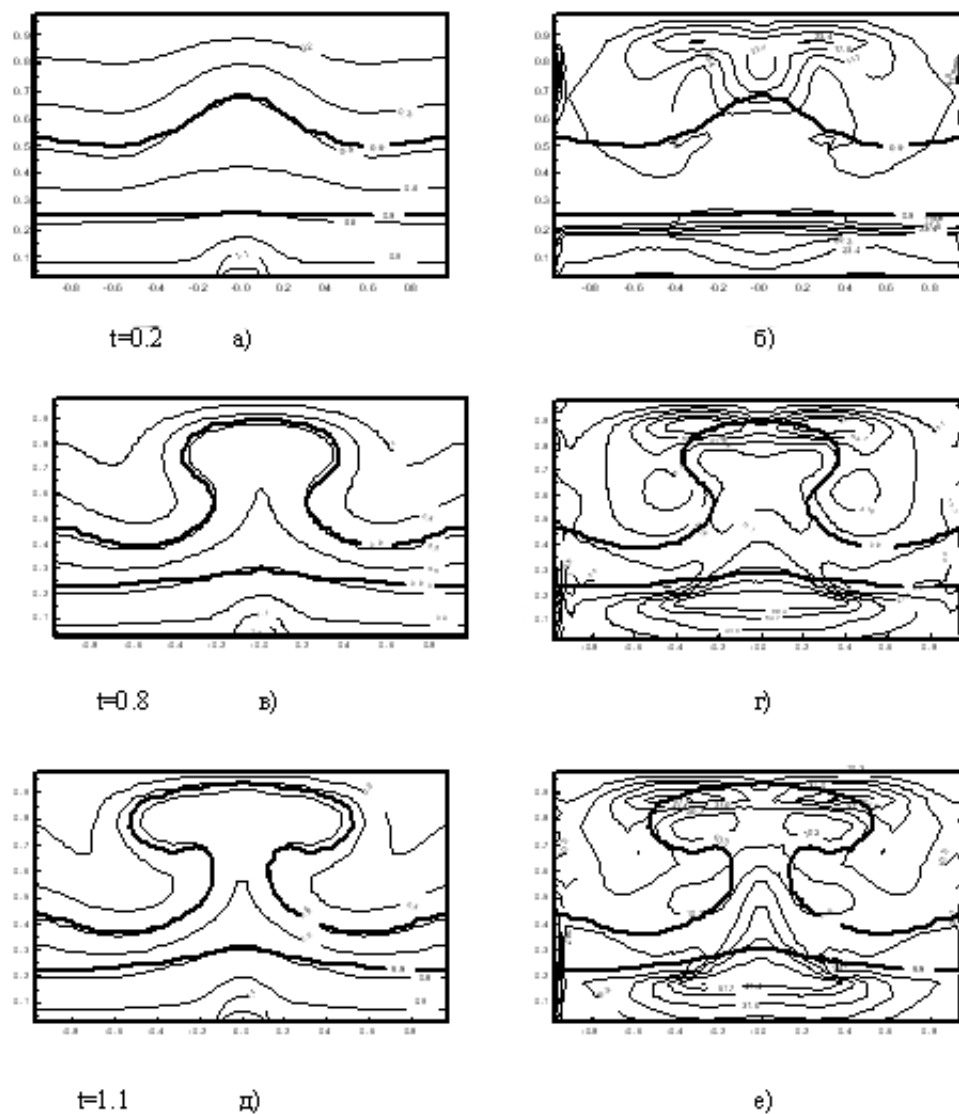


Рис. 2: Формирование соляного купола во времени (трехслойная модель) и распределение изотерм и изолиний девиатора касательных напряжений. Динамические вязкости слоев:  $\mu_1 = 2.6 \cdot 10^{19}$ ,  $\mu_2 = 2.2 \cdot 10^{18}$ ,  $\mu_3 = 2.6 \cdot 10^{20}$ .

## Список литературы

- [1] Мартынов Н.И., Танибергенов А.Г. Численное моделирование условий формирования солянокупольных структур в земной коре // Математический журнал. 2006. Т. 6, № 1. С. 67–73.
- [2] Жантаев Ж.Ш., Мартынов Н.И., Танибергенов А.Г. Формирование соляных диапиров в температурном поле // Журнал Проблемы эволюции открытых систем. 2009. Т. 2, вып. 14. С. 11–17.
- [3] Жантаев Ж.Ш. О характере изменения мощности земной коры в зависимости от величины геотермического градиента // Материалы Российско-Казахстанского симпозиума по вопросам геодинамики. 2007. С. 14–23.