

Н.И. МАРТЫНОВ

## ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СОЛЯНОГО ДИАПИРИЗМА

Обсуждаются некоторые результаты численного моделирования соляного диапиризма в земной коре и возможные их приложения в разведке, оценке и разработке нефтегазовых месторождений.

На распределение нефти и газа, а также полезных ископаемых в земной коре существенное влияние оказывает процесс формирования солянокупольных структур и мантийных диапиров. Кроме того, соляные структуры используются в качестве хранилищ нефти и газа, а также «хранилищ-консервантов» термоядерных и других промышленных отходов.

Процесс формирования солянокупольных структур в земной коре исследуется на модельных уравнениях гидродинамики ползущих течений Стокса (релей-тейлоровская неустойчивость) с неизвестной заранее эволюцией поверхности раздела сред, либо экспериментальными методами. Следует заметить, что экспериментальное исследование не обеспечивает достаточного подобия реальным тектоническим процессам.

Линейная стадия гравитационной неустойчивости ползущего движения вязкой несжимаемой жидкости достаточно подробно исследована аналитическими методами. Подробный анализ этих исследований дан в [1]. Показано, что существует доминантная длина волны для которой скорость роста возмущений максимальна.

В работах [2-4] изучено влияние совместного действия тектонических сил и неньютоновской вязкокопластической реологии слоев на зарождении и развитие соляных диапиров в земной коре. Это влияние проявляется в неоднородном распределении диапиров по пространству и разномасштабности их характерных размеров. В работе [3] показано, что осесимметричная потеря устойчивости приводит к формированию одиночного соляного купола и кругового вала правильной формы. В трехмерном случае [4] среда ведет себя как жидкость Вейссенберга, что проявляется в зарождении и формировании соляных столбов.

Нелинейная стадия гравитационной неустойчивости ползущих течений Стокса мало изуче-

на. Результаты, относящиеся к некоторым задачам тектоники, преимущественно соляной тектоники, получены лабораторным и численным моделированием. В результате экспериментов, проводившихся на моделях, состоящих из двух слоев аномально-вязких несжимаемых жидкостей различной плотности, было установлено, что область движения разбивается на ячейки Бенара, подобные ячейкам при тепловой стационарной конвекции. Было показано, что развитие неустойчивости приводит к образованию диапиров, установлены качественные и количественные характеристики развития гравитационной неустойчивости.

Численное моделирование формирования и развития соляных диапиров встречается с определенными трудностями при описании раздела слоев и их эволюции, особенно в развитой фазе. Насколько автору известно, ему посвящено не более трех десятков работ. Первые работы в этом направлении посвящены плоским и осесимметричным задачам и выполнены, в основном, в 80-х и в начале 90-х гг. прошлого столетия. Подробная библиография приведена в [5]. Расчеты проводились консервативно-разностными методами с использованием монотонных разностных схем, либо методом конечных элементов. Не обсуждая достоинства тех или иных методов, заметим, что численное моделирование позволяет детализировано оценить кинематические и силовые характеристики течения, что экспериментальными методами затруднительно. С появлением быстродействующих процессоров, позволяющих распараллеливать вычисления, появилась возможность рассчитывать трехмерные течения.

В настоящей работе излагаются некоторые прикладные аспекты исследований математического моделирования соляного диапиризма в земной коре. Указываются возможные приложения

этих исследований в разведке, оценке и разработке нефтегазовых месторождений.

### Постановка задачи, численный метод.

В области  $\Omega$ , (занятой двухслойной жидкостью, где плотность верхней жидкости больше нижней, что и вызывает гравитационную неустойчивость) требуется определить вектор скорости  $\vec{V} = (U, V, W)$ , давление  $P$ , плотность  $\rho$ , динамическую вязкость  $\mu$  в момент времени  $t \in [0, T]$ , удовлетворяющие системе уравнений:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial P}{\partial x} + \gamma \left[ 2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial W}{\partial x} \right) \right] = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} -\frac{\partial P}{\partial y} + \gamma \left[ 2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial W}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial V}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial W}{\partial y} \right) \right] = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} -\frac{\partial P}{\partial z} + \gamma \left[ 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial W}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial V}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial W}{\partial y} \right) \right] - \rho = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + U \frac{\partial \rho}{\partial x} + V \frac{\partial \rho}{\partial y} + W \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + U \frac{\partial \mu}{\partial x} + V \frac{\partial \mu}{\partial y} + W \frac{\partial \mu}{\partial z} = 0, \quad (6)$$

начальным и граничным условиям на границе  $\partial\Omega$ :

$$\rho(x, y, z, 0) = \rho_0(x, y, z), \quad 0 < \rho_2 \leq \rho_0(x, y, z) \leq \rho_1 \quad (7)$$

$$\mu(x, y, z, 0) = \mu_0(x, y, z), \quad 0 < \mu_2 \leq \mu_0(x, y, z) \leq \mu_1 \quad (8)$$

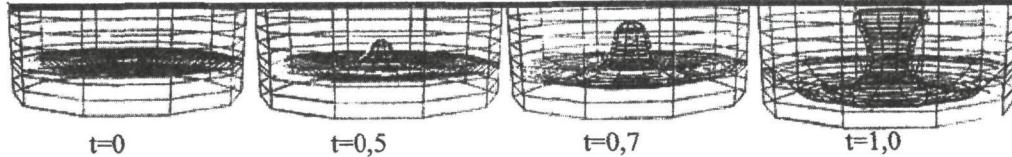
$$U|_{\partial\Omega} = V|_{\partial\Omega} = W|_{\partial\Omega} = 0. \quad (9)$$

Кроме условий (9) можно рассматривать граничные условия скольжения, а также условия симметрии на боковых стенках.

Система уравнений (1)-(9) записана в безразмерном виде. Коэффициент  $\gamma$  в уравнениях представляет собой отношение числа Фруда к числу Рейнольдса,  $\gamma = v_* U_* / (L_*^2 g)$ . Здесь  $v_*$ ,  $U_*$ ,  $L_*$  - характерные параметры среды соответственно: кинематическая вязкость, скорость и геометрический размер области. В задачах гравитационной неустойчивости отсутствует характерный масштаб скорости, поэтому в качестве последнего в работе принимается вязкая скорость  $U_* = g^{\frac{1+n}{2}} L_*^{\frac{1+3n}{n}} v_*^{-n}$ , где  $n$  - произвольное число. Выбирая  $n$  определенным образом, получим необходимый масштаб скорости рассматриваемой модели.

Начально-краевой задаче (1)-(9) поставлена в соответствие разностная начально-краевая задача, записанная на разнесенных сетках в дивергентной форме. Это является необходимым и достаточным условием сходимости разностного решения к точному. Уравнения (5),(6) аппроксимируются явной монотонной схемой против потока, а разностный аналог уравнений (1)-(4) реализуется итерационным методом по схеме расщепления по физическим процессам. Более подробно численный метод изложен в работе [5].

На рисунке 1 показано формирование во времени осесимметричного соляного диапира, где  $\rho_1, \rho_2, \mu_1, \mu_2, h_1, h_2$  - плотности, динамические вязкости, мощности слоев осадочного чехла и галита, соответственно,  $R$ -радиус области.



$$\mu_1 = 5 \cdot 10^{18} \text{ П}, \quad \rho_1 = 2,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, \quad h_1 = 6 \text{ км}, \quad \mu_2 = 10^{18} \text{ П}, \quad \rho_2 = 2,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, \quad h_2 = 3 \text{ км}, \quad R = 18 \text{ км}.$$

Рис. 1. Профили соляного купола в различные моменты безразмерного времени

## Основные закономерности и особенности формирования солянокупольных структур в земной коре

Численное моделирование (плоской, осесимметричной и пространственной моделей) и последующий анализ гравитационной неустойчивости позволили установить, что движение легкой и тяжелой жидкостей происходит в ячейках, напоминающих бенаровские при тепловой стационарной конвекции, но имеет прерывистый режим. Легкая жидкость, поднимаясь вверх, там и остается, а тяжелая, опускаясь, замыкает ячейку снизу. Движение жидкости заканчивается, как только легкая жидкость поднимается наверх, и инверсия плотностей исчезнет.

Результаты расчетов позволили выделить три характерные фазы развития гравитационной неустойчивости. Первая – линейная фаза, когда на границе раздела сред появляются малые хаотические возмущения разной длины волн, среди которых довольно скоро определяются доминирующие. На второй фазе развития гравитационной неустойчивости, когда явно выделилась доминантная мода спектра возмущения границы раздела, происходит относительно быстрое внедрение легкой жидкости в тяжелую. При этом граница раздела слоев имеет профиль, напоминающий нормальное (гауссово) распределение, либо вид уединенной волны (солитона), а затем происходит ее перестройка. В результате образуется выступ округлой формы, который со временем вытягивается, приобретая ствол, связывающий его с питающим слоем легкой жидкости. В верхней части выступа налицо либо округлая, либо приплюснутая, либо вытянутая капля (или купол). Внедрение тяжелой жидкости в легкую происходит с образованием краевого прогиба возрастающей глубины. На третьей фазе развития неустойчивости увеличение краевого прогиба способствует перекрытию движения частиц легкой жидкости в нижнем слое из периферии в центральную часть ячейки, а всплывающая под действием архимедовых сил масса легкой жидкости вытягивает ствол, нижняя часть которого быстро сужается. В результате образуется шейка. Наличие шейки говорит о том, что всплывающая в центральной части ячейки масса легкой жидкости готовится к отрыву. Затем происходит отрыв от основного питающего слоя, что и объясняет механизм образования соляных линз в земной коре.

В процессе оттока легкой жидкости в основной купол вокруг последнего, со временем, образуются компенсационные прогибы, которые способствуют зарождению вторичных куполов. Т.е. развитие одних куполов становится причиной возникновения и роста других (вторичных), а те, в свою очередь, третьих и т.д.. Все эти купола находятся на разной стадии развития, а по происхождению их следует отнести к одному семейству. Подобная картина наблюдается при лабораторном моделировании и в натурных наблюдениях.

Исследовано влияние физико-геометрических параметров слоев, граничных условий на основные характеристики релей-тейлоровской неустойчивости и формы диапиров [5].

Сравнительный анализ развития плоской гравитационной неустойчивости с пространственной при одинаковых механико-геометрических параметрах показывает: характеристики роста соляного купола (скорость роста, форма купола) в осесимметричной модели отличаются от характеристик роста соляного купола в плоской модели.

В осесимметричном случае купол вплоть до достижения верхней стенки принимает столбообразную форму, при этом поперечный размер его ствола широкий и, примерно, равен первоначальной мощности соли. В плоском случае в те же моменты времени свод купола, не достигая верхней стенки, растекается в горизонтальные стороны, а ствол сильно отжимается тяжелой жидкостью, т.е. купол приобретает грибообразную форму.

Процесс гравитационной неустойчивости протекает быстрее в плоской модели, чем в пространственной.

С целью выяснения влияния подсолевого ложа на рост соляных куполов была проведена серия расчетов для трехслойной среды, в которой соль расположена между двумя более плотными породами. Установлено, что характер перемещения соли в трехслойной среде сильно отличается от двухслойной, поскольку подошва соли скреплена с деформированным основанием, которая в процессе неустойчивости вовлекается в движение вверх по тем же каналам, что и соль, хотя плотность соли меньше плотности подсолевого слоя. Это объясняется тем, что соляной купол, двигаясь вверх, вытесняет тяжелый надсолевой слой вниз, вследствие чего под куполом создается область пониженного давления, куда и перетекает часть подсолевого слоя. Следует отметить, что когда вязкость подсолевого слоя на-

много больше вязкости соли и надсолевых пород, то процесс развития неустойчивости будет происходить так же, как и в двухслойной модели, т.е. подсолевой слой не деформируется. Показано, что на фоне гравитационной неустойчивости возникает дополнительный момент (образованный за счет наклона поверхности раздела), способствующий повороту всплывающей соли в сторону уменьшения толщины соляного массива.

Сопоставление численных расчетов с результатами лабораторного моделирования, геологическими данными образования соляных структур позволило установить, что формы соляных куполов, их развитие в природной обстановке и в численных моделях определяются одинаковыми факторами.

### Перспективы приложения

Анализ осесимметричных и пространственных механизмов гравитационной неустойчивости может объяснить формирование куполов гигантов, кольцевых массивов и линейных гряд, характерных для солянокупольной тектоники Прикаспийской впадины [6].

Начально-краевая задача (1)-(9) корректна при обратном течение времени, т.е. можно восстановить предысторию формирования куполов. Это даст дополнительную геолого-морфологическую информацию, которая может быть использована в геологоразведке[6]. Возможно провести проводку эксплуатационных скважин с наклонной криволинейной траекторией в обход слабопрочного соляного купола, предотвращая прихват бурильных колонн[7].

При известном профиле верхней шапки купола компьютерное моделирование позволяет детализировано отбить подкрыловое пространство куполов, что сейсмическими методами затруднительно. Кроме того, знания физических параметров подсолевого ложа позволяет разведать и оценить возможные подсолевые ловушки нефти и газа.

На фоне пластового давления девиаторы касательных напряжений в нефтеносных пластах играют основополагающую роль при формировании нефтегазовых ловушек. Изменение же положения экстремальных значений девиаторов напряжений может указать направления миграции нефти, которая проявляется в том, что в подкарнизной части соляных куполов нефть внезапно исчезает в процессе добычи. Рациональное использование распределения поля девиаторов

напряжений позволит оптимально вести как разветку, так и добывчу углеводородов, с существенным снижением материальных затрат. Сюда относятся задачи оптимального размещения нагнетательных скважин, проведение гидравлического разрыва пласта, повышение коэффициента нефтеотдачи пластов. Могут быть сформулированы задачи фильтрации и вытеснения, выработаны меры по уменьшению смятия обсадных колонн, с учетом неоднородного распределения девиаторов напряжений. Наконец можно развить экологически безопасную технологию строительства глубоких и сверхглубоких скважин в соляно-купольных структурах[8].

Это не полный перечень тех приложений компьютерного моделирования формирования соляных диапиров, который в конечном счете приведет к эффективному повышению нефтеотдачи пластов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ержанов Ж.С., Егоров А.К., Гарагаш И.А., Исказбаев А., Коксалов К. Теория складкообразования в земной коре. М: Наука, 1975, 239с.
2. Мартынов Н.И., Танирбергенов А.Г. Гравитационная неустойчивость ненытоновской вязкопластической среды. Математический журнал, 2006, т.6, №4(22), с.71-79.
3. Мартынов Н.И., Танирбергенов А.Г. Релей-тейлоровская неустойчивость ползущих течений с осевой симметрией и усложненной реологией. Известия НАН РК, 2007, сер.Ф.-м., №1(251), с.39-44.
4. Мартынов Н.И., Танирбергенов А.Г. Особенности начальной стадии диапирисма. Ж. Поиск, 2007, №1,
5. Мартынов Н.И., Танирбергенов А.Г. Численное моделирование формирования соляных диапиров в земной коре. Математический журнал, 2006, т.6, №1(19), 67-73с.
6. Геология регионов Каспийского и Аральского морей./ Под ред. Г.Р.Бекжанова. Алматы: Изд. «КазГЕО», 2004, 472с.
7. Айталиев Ш.М., Кудайкулов А.К., Мардонов Б.М. Механика прихвата бурильных колонн в нефтегазовых скважинах. Атырау-Алматы: Изд. «Эверо», 1999, 82с.
8. Каиров Г.Б. Экологически безопасная технология строительства глубоких разведочных скважин. М.: Изд. ВНИИОЭНГ, 1996, 204с.

### Резюме

Жер қабығындағы тұзды диапиризмі сандық модельдеудің кейір нәтижелері жөне оларды газ-мұнай кен орындарын барлауда, бағалауда жөне де жетілдіруде пайдалану мүмкіндіктері талқыланады.

### Summary

Some results of hydrochloric diapirism numerical modeling in an earth's crust and their probable appendices in investigation, an estimation and development of oil-and-gas deposits are discussed.

Институт космических исследований РК,

г.Алматы

Поступила 21.01.08