

УДК 622.02+532.5

Численное моделирование условий формирования солянокупольных структур в земной коре.

К.ф.-м.н. Мартынов Н.И., к.ф.-м.н. Танирбергенов А.Г.
Институт механики и машиноведения МОН РК,
г. Алматы, Республика Казахстан.

Аннотация: Анализируются результаты численного моделирования тейлоровской неустойчивости течений Стокса.

Введение

Многие медленные технологические и природные процессы изучаются на модельных уравнениях гидродинамики неоднородной вязкой несжимаемой жидкости. Среди подобных исследований особое место занимает задача изучения ползущих движений (стоксовых течений) в поле силы тяжести и ее тейлоровской неустойчивости - особенно нелинейной фазы при неизвестной заранее эволюции поверхности раздела сред. К ним относятся задача изучения условий формирования соляно-купольных структур и мантийных диапиров в земной коре, которое имеет большое научное и практическое значение, поскольку с последними связано распределение нефти и газа, а также полезных ископаемых в земной коре.

Следует подчеркнуть, что экспериментальное изучение не обеспечивает достаточное подобие реальных тектонических процессов [2-5], а расчеты производятся, как правило, численными методами. Работы в этом направлении немногочисленны и имеют определенные трудности описания поверхности раздела слоев, их эволюции, особенно в развитой фазе и они ограничены в основном плоской моделью [6-11].

В настоящей работе обсуждаются результаты численных расчетов условий формирования солянокупольных структур в земной коре, основанные на плоской, осесимметричной и трехмерной моделях тейлоровской неустойчивости.

1. Постановка задачи и численный алгоритм

В области Ω , представляющий собой параллелепипед, требуется определить вектор скорости $\vec{V} \approx (U, V, W)$, давление P , плотность ρ , динамическую вязкость μ в момент времени $t \in [0, T]$, удовлетворяющие системе уравнений:

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

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

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

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

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

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

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 также граничные условия симметрии на всех боковых стенках параллелепипеда.

Система уравнений (1)-(9) записана в безразмерном виде. Коэффициент γ в уравнениях представляет собой отношение числа Фруда к числу Рейнольдса, $\gamma = \nu_* U_* / (L_*^2 g)$. Здесь

ν_* , 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 $U_* = g^{\frac{1+n}{2}} L_*^{\frac{1+3n}{n}} \nu_*^{-n}$, где n – произвольное число. Выбирая n определенным образом,

получим необходимый масштаб скорости рассматриваемой модели.

Аналогичным образом формулируется плоская и осесимметричная задачи.

В работах [10-13] разработаны и реализованы разностные методы решения указанных выше задач. В основу алгоритмов положен метод расщепления по физическим процессам [14]. При этом для плоской и пространственной задач метод расщепления реализован в естественных переменных (скорость, давление), а для осесимметричной – дополнительно вводится функция тока, позволяющая явным образом вычислить давление и ускорить скорость сходимости итерационного процесса. Разностные схемы записаны в дивергентном виде, что является необходимым условием сходимости разностного решения к точному в случае разрывных коэффициентов. Для решения уравнений неразрывности (5), (6) используется консервативная схема донорной ячейки, а шаг по времени выбирается с учетом условия устойчивости и монотонности схемы [15].

На рис.1 приведена эволюция границы раздела слоев для трехмерной модели в центральном сечении (горизонтальные размеры области в направлении осей ox и oy одинаковы), где h_1, h_2 ; ρ_1, ρ_2 ; μ_1, μ_2 – мощности, плотности, динамические вязкости надсолевых пород и каменной соли (галита), соответственно.

Основные закономерности и особенности формирования солянокупольных структур в земной коре.

Численное моделирование (плоской, осесимметричной и пространственной моделей) и последующий анализ тейлоровской 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 тейлоровской 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 тейлоровской 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 натуральных наблюдениях [1-4].

При исследовании влияния мощностей слоев на характер перемещения установлены следующие зависимости. Если увеличивать мощность соли, оставляя при этом мощность надсолевых пород неизменной, то поперечные размеры соляных куполов увеличиваются, а расстояния между куполами уменьшаются. Если увеличивать мощность надсолевых пород, оставляя при этом мощность соли неизменной, то поперечные размеры куполов уменьшаются, а расстояния между куполами увеличиваются. Соляной купол растет быстрее в той среде, где имеются большие мощности соли и надсолевых пород.

Пусть M – отношение вязкости надсолевых пород к вязкости соли. Как показывает серия расчетов с увеличением M купола приобретают шарообразную форму, с уменьшением M – столбообразную; с ростом M процесс тейлоровской неустойчивости замедляется. При $M=1$ решение носит «автомодельный характер», что означает для двух разных вариантов независимо от величины порядка вязкостей слоев можно подобрать такие моменты времени, что картины течения будут идентичными.

Различие граничных условий на боковых стенках области на развитие неустойчивости проявляется в следующем. В случае идеального скольжения основная масса соли перетекает вверх через центральный купол; в то время как условия прилипания способствуют тому, что соль перемещается вверх не только через центральный купол, но и через зародившиеся на краю прогибов периферийные купола.

Установлено, что при уменьшении отношения плотностей слоев процесс развития неустойчивости замедляется и наоборот, а отношение плотностей слоев не влияет на форму куполов.

Сравнительный анализ развития плоской тейлоровской неустойчивости с пространственной при одинаковых механико-геометрических параметрах показывает что: 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 тейлоровской 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. Было установлено, что характер перемещения соли в трехслойной среде сильно отличается от двухслойной, поскольку подошва соли сцеплена 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 намного 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.

Изучено влияние наклона поверхности раздела для двухслойной модели. Показано, что на фоне тейлоровской неустойчивости возникает дополнительный момент (образованный за счет наклона поверхности раздела), способствующий повороту всплывающей соли в сторону уменьшения толщины соляного массива. Подобная особенность характерна для солянокупольной тектоники Прикаспийской впадины [1].

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

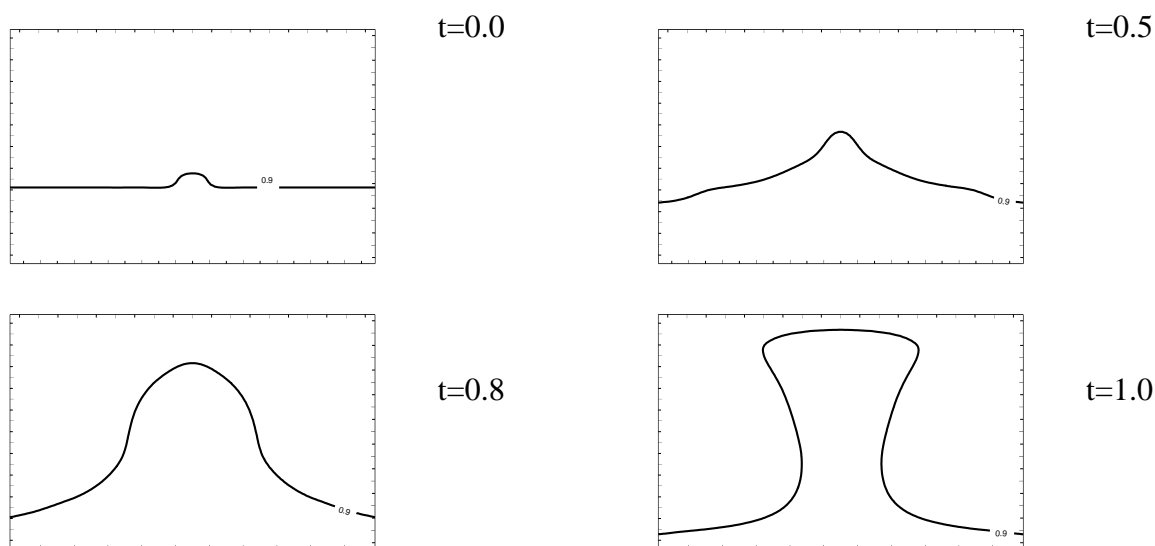


Рис. 1. Эволюция границы раздела слоев (пространственная модель). Параметры модели: $\mu_1 = 5 \cdot 10^{17} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$, $\rho_1 = 2,5 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ $h_1 = 6 \text{ км}$,
 $\mu_2 = 2,5 \cdot 10^{17} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$, $\rho_2 = 2,2 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ $h_2 = 3 \text{ км}$.

Список литературы

1. Косыгин Ю.А. Основы тектоники нефтеносных областей. М.: Гостоптехиздат, 1952.
2. Рамберг Х. Сила тяжести и деформаций в земной коре. Пер. с англ. –М.: Недра, 1985.
3. Паркер Т.Д., Мак-Доуэлл А.Н. Экспериментальное изучение солянокупольной тектоники. – В кн. Вопросы экспериментальной тектоники. М, 1957.
4. Сычева –Михайлова А.М. Механизм тектонических процессов в обстановке инверсии плотности горных пород. М.1973г.
5. Гуревич Г.И. Об исходных предпосылках подхода к моделированию в тектонике. В кн. Некоторые вопросы механики деформируемых сред. М. 1959.

6. Howard J.C. Monte Carlo simulation model for piercement salt domes. Kansas. Geol. Surv. Computer. Contrib., 1968, №22.
7. Nasir N.E., Dabboosy O.B The dynamics salt-dome evolution. –Tectonophysics, 1978, v 47, №1.
8. Woid W.D., Neugebauer H.J. Finite element models of density instabilities by means of bicubic spline interpolation.-Phys. Earth Planet. Inter., 1980, v. 21.
9. Мясников В.П., Новиков В.Л., Сазонов Ю.В. Прямая задача моделирования соляных куполов. ДАН СССР, 1980, т.254, №5.
10. Ержанов Ж.С., Мартынов Н.И. Тейлоровская неустойчивость двумерного ползущего движения границы раздела вязких несжимаемых жидкостей. Изв. АН КазССР, сер. ф-мат. 1985, №5.
11. Орунханов М.К., Танирбергенов А.Г. Численное моделирование процесса формирования нефтяных соляных куполов. // Нефть и газ, 2000, №2.
12. Орунханов М.К., Танирбергенов А.Г. Численное моделирование процесса пространственного движения соляного купола. // Вычислительные технологии. Т. 7, 2002г., Новосибирск-Алматы.
13. Мартынов Н.И., Танирбергенов А.Г. Численное исследование тейлоровской неустойчивости ползущих движений Стокса. // Вопросы прикладной физики и математики, Алматы, 2003г.
14. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Наука, 1984.
15. Роуч Х. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980.