

УДК 622.02+532.5

А.Г.ТАНИРБЕРГЕНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ СОЛЯНОГО КУПОЛА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЛЬЕФА ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА СЛОЕВ

Введение. Согласно гравитационной теории, соль под длительной постоянной нагрузкой, даже совсем незначительной, ведет себя как очень вязкая жидкость. Такой процесс называется течением; он настолько медленный, что заметно проявляется только в геологическом масштабе времени [1, 2]. В связи с этим для исследования движения соляного купола используется модель сильновязкой неоднородной несжимаемой жидкости. Предшествующие работы [5-7] ограничены рассмотрением двухслойной среды, когда соль поконится на твердом основании и перекрыт более плотной породой.

Исследование гравитационной неустойчивости в трехслойной среде имеет важное значение, так как в природных условиях соль, в основном, расположена между двумя более плотными и вязкими надсолевыми и подсолевыми породами.

Постановка задачи. Начально-краевая задача, описывающая движение неоднородной сильновязкой несжимаемой жидкости в поле силы тяжести, в плоской постановке формулируется следующим образом. В прямоугольной области W требуется определить вектор скорости \vec{V} (U, V), давление P , плотность ρ , динамическую вязкость μ в момент времени $t \in [0, T]$, удовлетворяющих системе уравнений:

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

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

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

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

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

начальным и граничным условиям

$$\rho(x, y, 0) = \rho_0(x, y), \quad 0 < \rho_2 \leq \rho_0(x, y) \leq \rho_1, \quad (6)$$

$$\mu(x, y, 0) = \mu_0(x, y), \quad 0 < \mu_2 \leq \mu_0(x, y) \leq \mu_1, \quad (7)$$

$$U|_{\partial\Omega[0, T]} = V|_{\partial\Omega[0, T]} = 0, \quad (8)$$

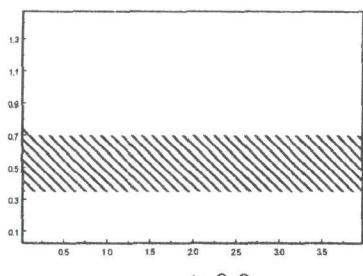
Начально-краевая задача (1) – (8) записана в безразмерном виде. Здесь U, V – соответственно горизонтальная и вертикальная составляющие скорости. Система уравнений (1) – (3) описывает движение неоднородной сильновязкой несжимаемой жидкости в поле силы тяжести, т.е. течение Стокса, а уравнения (4), (5) учитывают сохранение плотности и вязкости в любой момент времени. Коэффициент A равен отношению числа Фруда к числу Рейнольдса, $A = v_* \cdot U_*/(l_*^2 \cdot g)$. Здесь g – ускорение свободного падения, v_*, U_*, l_* – характерные параметры среды, соответственно кинематическая вязкость, скорость и линейный размер области.

Численный метод решения. Для численного решения систем уравнений (1)–(3) используется итерационный процесс, основанный на схеме расщепления по физическим процессам [3]. Для численного решения (4) и (5) используется консервативная схема разности против потока, при этом шаг по времени τ выбирается с учетом устойчивости и монотонности схемы [4].

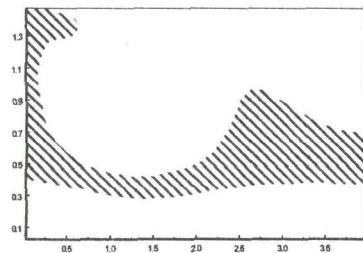
Анализ результатов расчета. Для численного исследования механизма формирования соляного купола рассмотрена модель трехслойной среды, в случае, когда менее плотный слой (соль) расположен между двумя более плотными слоями. В модели считается, что каждый слой однороден по плотности и вязкости и различные слои могут быть разной мощности, плотности и вязкости. Нумерация слоев принята сверху вниз. Параметры каждого слоя записываются с нижним индексом, обозначающим его номер, например, μ_2, ρ_2, h_2 – соответственно вязкость, плот-

нность и мощность второго слоя, т. е. соли. Если в рассматриваемой модели границы раздела слоев ровные, то в области сколь угодно долго наблюдается неустойчивое равновесие. Это связано с тем, что горизонтальная составляющая градиента давления в области равна нулю. Для куполообразования необходимы неровности на границах раздела слоев. В связи с этим проведены два варианта расчетов, в которых неровности за-

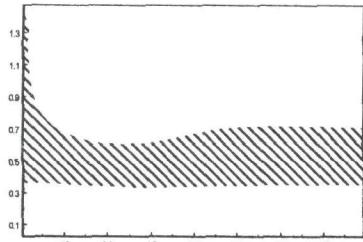
даются только на одной из границ раздела. В первом варианте неровность в виде небольшого вздутия из соли задана на границе между первым и вторым слоями. Во втором варианте неровность задана на границе между вторым и третьим слоями, моделирующая сложный рельеф подсолевого слоя. Расчеты показывают, что в обоих случаях в среде развивается гравитационная неустойчивость (рис. 1 и 2).



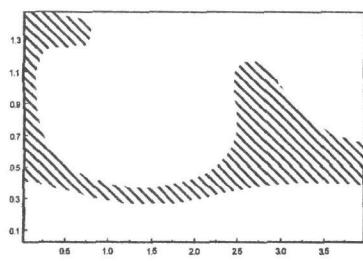
t=0.0



t=0.7



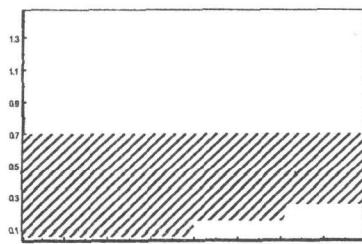
t=0.3



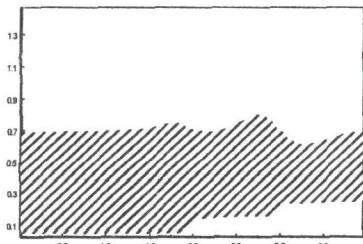
t=0.9

Рис. 1. Эволюция границы раздела слоев (трехслойная модель). Параметры модели:

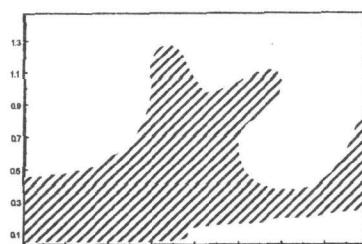
$$\mu_1 = 2,6 \cdot 10^{19} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}), \rho_1 = 2,6 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3, h_1 = 5000 \text{ м}; \quad \mu_2 = 2,2 \cdot 10^{18} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}), \rho_2 = 2,2 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3, h_2 = 2000 \text{ м}; \\ \mu_3 = 2,6 \cdot 10^{19} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}), \rho_3 = 2,6 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3, h_3 = 2000 \text{ м}$$



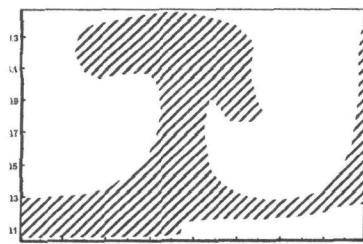
t=0.0



t=0.3



t=0.7



t=0.9

Рис. 2. Эволюция границы раздела слоев (трехслойная модель). Параметры модели те же, что на рис. 1.

В первом варианте, в силу задания небольшого вздутия из соли, нагрузка со стороны вышележащего надсолевого слоя на любое горизонтальное сечение области, занимаемое солью, будет неравномерной: давление в центре сечения будет меньше, чем по краям. Вследствие этого, соль перетекает вверх через заданное возмущение, формируя со временем из него купол. Во втором варианте происходит вначале незначительное выравнивание границы раздела между вторым и третьим слоями, за счет стекания под действием силы тяжести тяжелого подсолевого слоя. При этом соль вытесняется вверх и в силу несжимаемости среды на границе между первым и вторым слоями образует вздутие, из которого в дальнейшем и образуется соляной купол.

Заключение. Анализ численных результатов позволяет сделать вывод о том, что различные формы соляных куполов (естественных ловушек нефти) в природной обстановке - это результат влияния первоначального рельефа границы раздела слоев между надсолевыми породами и солью или между солью и подсолевыми породами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Косыгин Ю.А. Основы тектоники нефтеносных областей. М.: Гостоптехиздат, 1952, 511с.
2. Рамберг Х. Сила тяжести и деформаций в земной коре. Пер. с англ. -М.: Недра, 198, 400с.
3. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Наука, 1984, 520с.
4. Роуч Х. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980, 616с.
5. 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, p. 176-180.
6. Zaleski S., Julien P. Numerical simulation of Rayleigh-Taylor instability for single and multiple salt diapirs // Tectonophysics. 1992. V. 206. p. 55-69.
7. Орунханов М.К., Танирбергенов А.Г. Численное моделирование процесса формирования нефтяных соляных куполов. // Нефть и газ, 2000, №2, 25-37с.

Резюме

Үш қабатты ортада тұз күмбезінің пайда болу механизмы зерттелген.

Summary

The mechanism of formation of a hydrochloric dome in the three-layer environment is investigated.

Поступила 5.03.08