

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 2, Number 300 (2015), 36 – 40

**COMPUTER MODELLING OF FORMATION
OF DEEP SALT DIAPIRISM**

A. A. Baymukhvetov, N. I. Martynov, A. G. Tanirbergenov

Institute of mechanics and engineering science of U. A. Dzholdasbekov of MON RK, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: dgpimmash@mail.ru

Key words: salt diapir, crust, sedimentary cover, effective viscosity.

Abstract. On the basis of model of Reley-Taylorovsky instability in approach of Bussinesk with exponential dependence of viscosity on temperature the numerical model of process of formation of salt diapirs at big depths of bowels of the earth is developed and proved. The carried-out then numerical modeling allowed to estimating key parameters, regularities and features of a nonlinear stage of process of formation of a deep salt diapirism. The technique of an assessment of zones of possible oil and gas traps is offered. It is shown that hydro carbonic tanks are attached to zones from the raised temperature gradients.

УДК 551.24

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ
ГЛУБИННОГО СОЛЯНОГО ДИАПИРИЗМА**

А. А. Баймухаметов, Н. И. Мартынов, А. Г. Танирбергенев

Институт механики и машиноведения им. У. А. Джолдасбекова МОН РК, Алматы, Казахстан

Ключевые слова: соляной диапир, земная кора, осадочный чехол, эффективная вязкость.

Аннотация. На основе модели Релей-Тейлоровской неустойчивости в приближении Буссинеска с экспоненциальной зависимостью вязкости от температуры разработана и обоснована численная модель процесса формирования соляных диапиров на больших глубинах земных недр. Проведенное затем численное моделирование позволило оценить основные параметры, закономерности и особенности нелинейной стадии процесса формирования глубинного соляного диапиризма. Предложена методика оценки зон возможных нефтегазовых ловушек. Показано, что углеводородные резервуары привязаны к зонам с повышенных температурных градиентов.

Введение. Изучение формирования соляно-купольных структур имеет большое научное и практическое значение, поскольку с ними связано распределение месторождений нефти и газа в земной коре. Соляные структуры также используются в качестве подземных хранилищ углеводородов и «хранилищ-консервантов» термоядерных отходов [1].

Многие мировые месторождения нефти и газа располагаются в областях соляно-купольной тектоники. Классическим примером является Прикаспийская впадина, две трети которой расположены на территории Казахстана, где находятся порядка 1300 соляных куполов (диапиров), из которых более 1000 не разведаны [2, 3].

Нелинейная стадия формирования соляного диапиризма мало изучена. Основные результаты, получены в основном лабораторным моделированием, а также численными методами. Следует отметить, что лабораторное моделирование не обеспечивает достаточное подобие реальных тектонических процессов. Численные же исследования в этой области не многочисленны,

особенно трехмерных процессов, и существуют определенные трудности в описании границ раздела слоев [4-8].

В Казахстане многие задачи солянокупольной тектоники были поставлены академиком Ж. С. Ержановым и решены его учениками. 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 и развития солянокупольных структур, выявить закономерности и особенности их формирования [9-11].

В последнее время учеными СО РАН получены принципиально новые данные о возможности образования тяжелых углеводородов на больших глубинах, что подтверждает гипотезу Д. И. Менделеева о неорганическом происхождении нефти и указывает на перспективу ее поиска и добычи на больших глубинах. Для этого необходима информация о формировании соляных диапиров на больших глубинах, что связано с учетом тепловых эффектов, усложнением реологии. Исследования этого направления практически отсутствуют в открытой мировой печати. Поэтому цель данного исследования - отчасти восполнить этот пробел.

Математическая модель. В системе координат $Ox_1x_2x_3$ (ось Ox_3 направлена вертикально вверх) процесс формирования глубинного соляного диапиризма (без учета радиогенных источников тепла) описывается следующей системой гидродинамических уравнений:

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} - \rho g \delta_{3i}, (i = 1, 2, 3); \quad \sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right), (i, j = 1, 2, 3); \quad \frac{\partial V_\beta}{\partial x_\beta} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_*}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_\beta} (\rho_* V_\beta) = 0; \quad \frac{\partial \mu_*}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_\beta} (\mu_* V_\beta) = 0; \quad (2)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_\beta \frac{\partial T}{\partial x_\beta} \right) = \frac{\partial}{\partial x_\beta} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_\beta} \right) + \sigma_{\gamma\beta} \dot{\epsilon}_{\gamma\beta}; \quad (\gamma, \beta = 1, 2, 3), \quad (3)$$

$$\rho = \rho^* (1 - \alpha(T - T_*)); \quad \mu(t, x) = \mu_*(t, x) \exp \left\{ \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right\}; \quad x = (x_1, x_2, x_3) \in \Omega \quad (4)$$

Здесь p - давление, V_1, V_2, V_3 - компоненты скорости, σ_{ij} - тензор вязких напряжений, g - ускорение силы тяжести, ρ - плотность, μ - динамическая вязкость, C_p - удельная теплоемкость при постоянном давлении, k - коэффициент теплопроводности, T - абсолютная температура, α - коэффициент теплового объемного расширения, R - универсальная газовая постоянная, E - энергия активации. ρ_*, μ_* - невозмущенная плотность и невозмущенная динамическая вязкость, зависящие от химического состава материала (или плотность и динамическая вязкость при абсолютной температуре T_*). Индексом «0» обозначены характерные значения параметров процесса, δ_{3i} - тензор Кронекера. По повторяющимся греческим индексам предполагается суммирование.

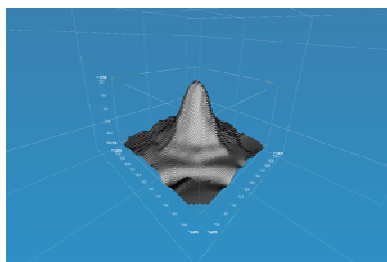
К системе уравнений (1) - (4), которые выполняются в области Ω , добавляются начальные граничные условия. В начальный момент времени задано распределение невозмущенной плотности, невозмущенной динамической вязкости и температуры. Граничные условия могут быть разнообразными. В данной работе область Ω была выбрана в форме прямоугольного параллелепипеда, на верхней и нижней стенках которого задавались условия прилипания, а на боковых стенках - условия симметрии. Температура на верхней стенке полагалась $0^\circ C$, а на нижней задавалась как функция (x_1, x_2) .

Численный метод. Для расчета астеносферного диапиризма с фазовыми переходами и экспоненциальной зависимостью динамической вязкости от температуры и давления авторами был разработан и обоснован численный метод [12], упрощенный вариант которого применялся для расчета глубинного соляного диапиризма. При $t = 0$ из начальных условий известны ρ_*, μ_*, T .

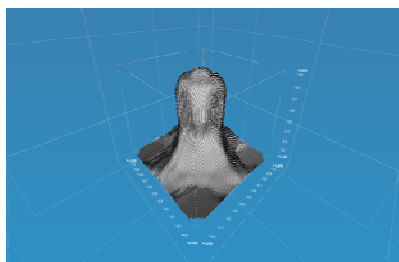
Из разностного аналога (4) определяются ρ, μ при $t = 0$. Из разностных аналогов уравнений импульса и уравнения не сжимаемости (1) итерационным методом расщепления по физическим процессам [10, 12], определяются ρ, \vec{V} на нулевом слое по времени. Затем из разностных аналогов уравнений переноса (2), которые аппроксимированы схемой донорной ячейки против потока определяются ρ_*, μ_* на первом слое по времени. Из разностного аналога уравнения энергии (3) определяем T на первом временном слое. Уравнение (3) аппроксимировано неявной абсолютно устойчивой схемой переменных направлений, которая реализуется продольно-поперечной немонотонной прогонкой. При этом конвективные члены в левой части уравнения (3) аппроксимировались схемой против потока, гарантирующей ее монотонность [12]. Таким образом, определены все величины на первом временном слое. Затем процесс повторяется, и вычисления проводятся до необходимого временного слоя.

Выделение наиболее вероятных зон нефтегазовых ловушек осуществлялось следующим образом. В каждый фиксированный момент времени при известных полях давления и скоростей, численным дифференцированием строились поля напряжений и выделялись по критерию прочности зоны повышенных концентраций девиатора касательных напряжений [11].

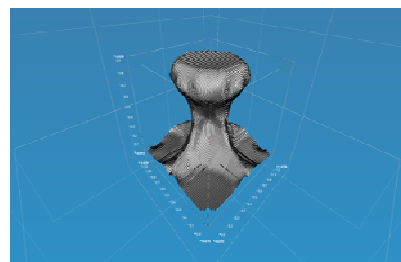
На рисунках а) - в) показано формирование соляного диапира в глубоко залегающих осадочных комплексах в различные моменты безразмерного времени. В начальный момент времени слои были горизонтальными. Мощность осадочного комплекса (чехла) h_1 и мощность каменной соли (галита) h_2 были выбраны по 7,5 км. Плотности полагались равными $\rho_1^* = 2600 \text{ кг/м}^3$, $\rho_2^* = 2200 \text{ кг/м}^3$, а динамические вязкости $\mu_1^* = 5 \cdot 10^{21} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\mu_2^* = 5 \cdot 10^{20} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Величины k, C_p, α, E были выбраны постоянными во всей области и равными их средним значениям $k = 4 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}^0$, $C_p = 1,2 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}^0$, $\alpha = 2 \cdot 10^{-5} / \text{К}^0$, $E = 20 \text{ кДж/моль}$ [12]. На нижней границе температура задавалась равной 250 C^0 , а в центральной квадратной части нижней границы области температура задавалась на 50 C^0 была выше (моделирует неоднородность теплового потока с нижних слоев Земли). В начальный момент времени распределение температуры внутри области была определена с помощью линейной интерполяции.



а) $t = 0,30$



б) $t = 0,65$



в) $t = 1,10$

Пространственные профили глубинного соляного диапиризма в различные моменты безразмерного времени

Результаты численного моделирования. Расчеты показали, что термические градиенты существенно влияют как на объемные профили, так и на скорость формирования соляных диапиров глубоко залегания. Процесс гравитационной неустойчивости преобладает над тепловыми эффектами [11]. Основные закономерности и особенности процесса такие же, как и в случае постоянных кинематических вязкостей слоев [11], но немного отличаются в количественном отношении. Кроме того, повышенные термоградиенты приурочены к областям, наиболее вероятных коллекторов нефти и газа (нефтегазовых ловушек).

Осадочный чехол и подсолевое ложе на небольших отрезках времени являются хрупкими горными породами, механизмом разрушения которых являются хрупкое растрескивание (разру-

шение), сопровождающееся дилатансией. Именно благодаря тому, что горные породы обладают хрупким разрушением, в зонах повышенных концентраций напряжений происходит разрушение с образованием порового пространства, снимаются избыточные напряжения. В результате образуются локальные зоны пониженных напряжений (нефтегазовые ловушки), куда и мигрируют находящиеся в пластах горных пород углеводороды. Для соляных куполов нефтегазовые ловушки формируются в областях их крыльев (надкрылового и подкрылового пространства), а также в области подкупольного пространства подсолевого ложа, что было обнаружено глубинным бурением соляных диапиров и показала серия проведенных расчетов.

Расчеты показали, что формирование и развитие купола сопровождается возникновением и увеличением объема нефтегазовых ловушек в прикупольных областях. 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 дилатансии мигрировать в центральную часть подкупольного пространства. Количественная оценка этих объемов позволяет определить вероятные запасы углеводородов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Беленицкая Г.А. Тектонические аспекты пространственного и временного распределения соляных бассейнов мира // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время.-2013.-Т.4.-Вып.1: Система планета Земля: 2227-9490 e-aprovgt_e-ast 4-1.2013.22.
- [2] Гулиев И.С., Левин Л.Э., Федоров Д.Л. Углеводородный потенциал Каспийского региона.- Баку, Nafta-Press, 2003, 127 с.
- [3] Матусевич А.В. Гравиразведка Прикаспийской впадины.- Ливны: Издатель Мухаметов Г., 2013.- 176 с.
- [4] Woid W.D. Finite element calculations applied to salt-dome analysis // Tectonophysics, 1978., Vol. 50., № 2., P. 369-386.
- [5] Dandre B. Cloetingh S. Numerical modeling of salt diapirism: Influence of the tectonic regime // Tectonophysics, 1994, Vol. 240, № 1-4, P. 59-79.
- [6] Исмаил-заде А.Т., Цепелев И.А., Тялбот К. и др. Трехмерное моделирование соляного диапиризма: Численный поход и алгоритм параллельных вычислений // Вычислительная сейсмология. - 2000. - Вып. 31. - С. 62-76.
- [7] Ismail-Zadeh A.T., Tsepelev I.A., Talbot C.J., Korotkii A.I. Three-dimensional forward and backward modeling of diapirism: Numerical approach and applicability to the evolution of salt structures in the Pricaspian basin // Tectonophysics, 2004, Vol. 387, №1-4, P. 81-103.
- [8] Лунев Б.В., Абрамов Т.В. Моделирование диапиризма расчетом 3D ползущих течений с использованием технологии параллельных вычислений CUDA на GPU // CUDA-Альманах-Ноябрь, 2014, с. 10.
- [9] Ержанов Ж.С., Мартынов Н.И. Тейлоровская неустойчивость двумерного ползущего движения границы раздела вязких несжимаемых жидкостей. // Изв. АН Каз.ССР, сер. физ.-мат., 1985, № 5, с. 79-84.
- [10] Мартынов Н.И., Танирбергенев А.Г. Численное моделирование условий формирования солянокупольных структур в земной коре // Математический журнал, 2006, т.6, №1 (191), с.67-73.
- [11] Baimukhametov A.A., Martynov N.I., Tanirbergenov A.G. Tomographic model of formation of oil and gas traps at salt diapirism // Proceeding of the 23d ICTAM, 2012, Beijing, China, 2p., sm06-013.
- [12] Baimukhametov A.A., Martynov N.I., Tanirbergenov A.G. Numerical design of asthenospheric diapirism with phase transitions // Science and World, 2014, № 9 (13), p.15-22.

REFERENCES

- [1] Belenickaja G.A. Tektonicheskie aspekty prostranstvennogo i vremennogo raspredelenija soljanosnyh bassejnov mira. Jelektronnoe nauchnoe izdanie Al'manah Prostranstvo i Vremja.-2013.-Т.4.-Vyp.1: Sistema planeta Zemlja: 2227-9490 e-aprovre-ast 4-1, 2013, 22 (in Russ).
- [2] Guliev I.S., Levin L.Je., Fedorov D.L. Uglevodorodnyj potencial Kaspijskogo regiona.- Baku, Nafta-Press, 2003, 127 s (in Russ).
- [3] Matusевич A.V. Gravirazvedka Prikaspijskoj vpadiny.- Livny: Izdatel' Muhametov G., 2013, 176 s (in Russ).
- [4] Woid W.D. Finite element calculations applied to salt-dome analysis. Tectonophysics, 1978., Vol. 50., № 2., P. 369-386.
- [5] Dandre B. Cloetingh S. Numerical modeling of salt diapirism: Influence of the tectonic regime. Tectonophysics, 1994, Vol. 240, № 1-4, P. 59-79.
- [6] Ismail-zade A.T., Cepelev I.A., Tjalbot K. i dr. Trehmernoe modelirovanie soljanogo diapirizma: Chislennyj pohod i algoritm paralel'nyh vychislenij. Vychislitel'naja sejsmologija, 2000, Vyp. 31, S. 62-76 (in Russ).
- [7] Ismail-Zadeh A.T., Tsepelev I.A., Talbot C.J., Korotkii A.I. Three-dimensional forward and backward modeling of diapirism: Numerical approach and applicability to the evolution of salt structures in the Pricaspian basin. Tectonophysics, 2004, Vol. 387, №1-4, P. 81-103.

[8] Lunev B.V., Abramov T.V. Modelirovanie diapirizma raschetom 3D polzushhih techenij s ispol'zovaniem tehnologii parallel'nyh vychislenij CUDA na GPU// CUDA-Al'manah-Nojabr', 2014, s. 10 (in Russ).

[9] Erzhanov Zh.S., Martynov N.I. Tejlorovskaja neustojchivost' dvumernogo polzushhego dvizhenija granicy razdela vjazkih neszhimaemyh zhidkostej. Izv. AN Kaz.SSR, ser.fiz.-mat., 1985, № 5, S. 79-84 (in Russ).

[10] Martynov N.I., Tanirbergenov A.G. Chislennoe modelirovanie uslovij formirovanija soljanokupol'nyh struktur v zemnoj kore. Matematicheskij zhurnal , 2006, t.6, №1 (191), s.67-73 (in Russ).

[11] Baimukhametov A.A., Martynov N.I., Tanirbergenov A.G. Thomogradient model of formation of oil and gas traps at salt diapirism .Proceeding of the 23d ICTAM, 2012, Beijng, China, 2p, sm06-013.

[12] Baimukhametov A.A., Martynov N.I., Tanirbergenov A.G. Numeral design of asthenospheric diapirism with phase transitions. Science and World, 2014, № 9 (13), P.15-22.

ҚҰРАЛЫМНЫҢ КОМПЬЮТЕРЛІК МОДЕЛЬ ДЕУІ ТЕРЕҢДІКТІҢ СОЛЯНОГО ДИАПИРИЗМА

А. А. Баймухаметов, Н. И. Мартынов, А. Г. Танирбергенев

Механиканың және машинатанулар им. У. А. Джолдасбекова МОН РК институты, Алматы, Қазақстан

Тірек сөздер: соляной диапир, жер қыртысым, шөгінді қап, тиімді тұтқырлық.

Аннотация. Бас негіз аумалылықтың Релей-Тейлоровской калыбының ара жанасушылықта Буссинеска мен тұтқырлықтың экспоненталық тәуелділігімен от қызудан сояных диапиров құралымының үдеріс сандық калып бас жерлік жер қойнауы кесек-кесек тереңдік әзірле- және тиянақты. Өткіздір-өткізу кейін сандық модельдеу негізгі параметрді, заңдылықтарды және құралымның үдерісінің нелинейной кезеңінің өзгешеліктерін тереңдіктің сояного диапиризма бағалау қойды. Ұсын- Ықтимал мұнайлы-газды айла-тұзақтың зонасының сарапшылығының әдістемесі ұсын-. Көрсетілген, не көмірсутектің резервуарлары көтеріңкі температуралық градиенттерден зоналарға деген тізгіндеулі.

Поступила 17.03.2015 г.