

ҚАЗАҚСТАН
ЖОЛ
ҒЫЛЫМИ-ЗЕРТТЕУ
ИНСТИТУТЫ



КАЗАХСТАНСКИЙ
ДОРОЖНЫЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ

**ҚазжолҒЗИ
ЖАРШЫСЫ**

**ВЕСТНИК
КаздорНИИ**

№ 1-2 (53-54) 2017

Арнайы шығарылым

Специальный выпуск

Ғылыми-практикалық журнал

Научно-практический журнал



УДК 551.24

Баймухаметов А.А. - д.ф.-м.н., профессор, e-mail: abayab@mail.ru

Танирбергенов А.Г. - к.ф.-м.н., e-mail: tan.amanjol@mail.ru

Институт механики и машиноведения им. У.А. Джолдасбекова КН МОН РК

Мартынов Н.И. - д.ф.-м.н., e-mail: nikmar50@mail.ru

Рамазанова М.А. - к.ф.-м.н., e-mail: mira52ram@mail.ru

Институт математики и математического моделирования КН МОН РК

О НЕКОТОРЫХ ПРИЛОЖЕНИЯХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СОЛЯНО-КУПОЛЬНЫХ СТРУКТУР В НЕФТЕГАЗОВОМ ДЕЛЕ

Тақырып: Мұнай-газ өндірісінде тұздық-күмбездік құрылымның қалыптасуының математикалық сұлбелеуінің кейбір қолданыстары туралы.

Түйін: Жер қыртысында тұздық диапирлерді қалыптастыруды математикалық сұлбелеу арқылы алынған негізгі нәтижелер талқыланады. Мұнайгаздық салада осы зерттеулердәң мүмкін қолданыстары көрсетіледі. Авторлар жасаған тұздық диапирлерді қалыптастырудың сандық технологиясы, басқа әдістермен бірге көптеген іс-тәжірибелік проблемаларды барлау жүргізгенде, мұнайгаздық кенорындауын әзірлеуде шешім табуды мүмкін ететін, оңтайлы құрал болып табылатыны туралы қорытынды жасалды.

Түйін сөздер: тұздық диапир, жауын-шашындық қапшық, жер қыртысы, мұнайгаздық тұзақтар, галит.

Тема: О некоторых приложениях математического моделирования формирования соляно-купольных структур в нефтегазовом деле.

Ключевые слова: соляной диапир, осадочный чехол, земная кора, нефтегазовые ловушки, галит.

Аннотация: Обсуждаются основные результаты, полученные с помощью математического моделирования формирования соляных диапиров в земной коре. Указываются возможные приложения этих исследований в нефтегазовом деле. Сделан вывод о том, что разработанная авторами численная технология формирования соляных диапиров является эффективным инструментом, которая позволяет вместе с другими методами разрешить многие практические проблемы при разведке, разработке нефтегазовых месторождений.

Topic: Bout some applications of mathematical modelling of formation of salt and dome structures in oil and gas business.

Abstract: The main results received by means of mathematical modeling of formation of salt diapirs in crust are discussed. Possible applications of these researches in oil and gas are specified has put. The conclusion is drawn that the numerical technology of formation of salt diapirs developed by authors is the effective tool what allows together with other methods to resolve many practical problems at investigation, development of oil and gas fields.

Keywords: salt diaper, sedimentary cover, crust, oil and gas traps, halite.

Введение. Более 70 % мировых месторождений нефти и газа располагаются в областях соляно-купольной тектоники. Классическим примером наиболее крупных областей соляно-купольной тектоники являются Мексиканский залив и Прикаспийская впадина. Две трети Прикаспийская впадины приходится на территорию Казахстана, где находятся порядка 1300 соляных куполов (диапиров), из которых более 1000 еще не разведаны. Кроме того, соляные купола используются, как резервуары хранения нефти и газа, а также как могильники радиоактивных и нефтепромысловых отходов. Каменная соль (галит) является основой для производства поваренной соли и различных химикатов. Отметим, что ежегодно человечество потребляет более семи миллионов тонн поваренной соли. Поэтому формированию соляно-купольных структур в земной коре посвящены геолого-геофизические изыскания и натурные наблюдения, лабораторное и численное моделирование, а также аналитические исследования. Перечень этих исследований приведен, например, в [1].

Линейная стадия формирования соляного диапиризма достаточно подробно изучена аналитическими методами, нелинейная стадия изучена мало. 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 немногочисленны, особенно исследования трехмерных процессов, и существуют определенные трудности в описании границ раздела слоев [1].

В Казахстане многие задачи соляно-купольной тектоники были поставлены академиком Ж.С. Ержановым, 95-летие со дня рождения которого в 2017 году отмечает научная общественность Казахстана, и решены его учениками. Разработаны и обоснованы несколько численных методов, позволяющих корректно проследить эволюцию поверхности раздела слоев вплоть до образования соляных линз [2]. Численное моделирование позволило провести детальный анализ механизма формирования соляно-купольных структур, выявить закономерности и особенности их развития. Результаты этих исследований подытожены в [1, 2].

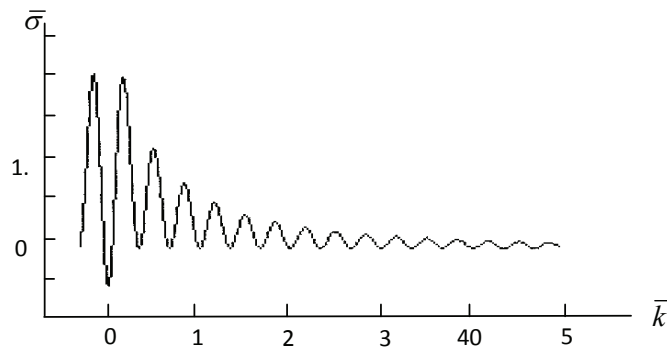
В настоящем исследовании обсуждаются результаты математического моделирования формирования соляных диапиров в земной коре, полученные, в основном, геодинамиками школы академика Ж.С. Ержанова. Даются рекомендации возможных приложений этих исследований в нефтегазовом деле. Сделан вывод о том, что разработанная авторами численная технология формирования соляных диапиров является эффективным инструментом, которая позволяет вместе с другими методами разрешить многие практические проблемы при разведке, разработке нефтегазовых месторождений.

Основные результаты. До середины тридцатых годов прошлого столетия существовало две концепции формирования соляных диапиров [1]. Согласно первой концепции, движущей силой соляных диапиров, прорывающихся сквозь толщу осадочных пород во многих районах земного шара, являются горизонтальные тектонические силы. Согласно второй концепции, высказанной С.А. Аррениусом еще в 1912 году относительно куполов на севере Европы, движущей силой является архимедова сила, вызванная разностью плотностей галита и осадочного чехла. В 1934 году Л. Нетельтон на моделях, состоявших из



двух слоев вязких жидкостей с различной плотностью, впервые показал процесс формирования соляных куполов. Им и другими авторами показано [1], что существует доминантная длина волны, для которой скорость роста возмущений максимальна. Это были первые динамические модели формирования соляных куполов в результате действия лишь одной силы всплывания в поле силы тяжести. После этой работы приоритетной стала вторая концепция, хотя среди геологов даже в настоящее время есть и сторонники первой концепции.

Влияние реологии слоев, находящихся под действием тектонических сил, на развитие начального этапа диапиризма мало изучено [1]. Исследованию в этой области посвящены работы [3-7], где рассмотрена устойчивость вязкопластического течения весомой слоистой среды. На рисунке 1, взятом из работы [5], показан график зависимости амплитуды возмущений от волнового числа для двухслойной (плоская модель) среды при условии инверсии плотностей горных пород. Верхний слой представляет собой пластичный материал, нижний - вязкий, т.е. реология слоев разнородна. Природа первых максимумов заложена в чисто вязких, а вторых – в чисто пластических свойствах материала. Существенное значение имеет здесь реология верхнего слоя. Из рисунка 1 следует, что существует узкий диапазон волновых чисел, где потеря устойчивости не наблюдается ($\bar{\sigma} < 0$). Он является областью «точек возврата» реологических механизмов перестройки потери устойчивости. Целый спектр локальных максимумов на рисунке 1 говорит о том, что возможно формирование диапиров с другими геометрическими параметрами и формами.



$$\eta_1 = 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}, \eta_2 = 10^{18} \text{ Па} \cdot \text{с}, \tau_{1S} = 5 \cdot 10^7 \text{ Па}, \tau_{2S} = 5 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

Рисунок 1. Зависимость $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{k})$

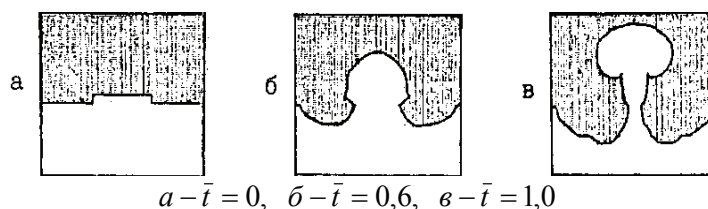
Осесимметричная потеря устойчивости двухслойной среды приводит к формированию одиночного соляного купола (как правило, купола-гиганта) или одиночного соляного купола и кругового соляного вала правильной формы [6]. Подобные купола-гиганты характерны для Прикаспийской Впадины Казахстана. В трехмерном случае усложненная реологическая среда ведет себя как жидкость Вейссенберга [7] и обладает эффектом «продомости», что приводит к образованию соляных столбов в земной коре, которые встречаются в природе.

Таким образом, реология слоев для возмущений обладает анизотропией, что приводит к неоднородному распределению диапиров по пространству и к разномасштабности их размеров.

Следует заметить, что на образование соляных диапиров оказывают существенное влияние распространение деформационных фронтов в земной коре, природа которых заложена в формировании и распространении уединенных тектонических волн на границе упругой литосферы, сцепленной с вязкой астеносферой [8]. Эти уединенные тектонические волны (солитоны) распространяются со скоростью порядка 1 км. в год. Они описываются уравнениями типа Картевега-де Фриза-Бюргерса, а также регуляризованным уравнением Картевега-де Фриза с кубической нелинейностью. По своей природе они близки к гравитационно-капиллярным волнам на поверхности жидкости и вызывают слабо затухающие колебания земной поверхности в течение десятков тысяч лет [8].

Первые работы по численному моделированию формирования соляных куполов посвящены плоским задачам и носили скорее прикладной характер [9,10]. Модель неоднородной жидкости позволила исключить из рассмотрения сложные граничные условия на границе слоев и «естественно» проследить их эволюцию. Были разработаны корректные вычислительные технологии для расчета плоских [1,2,11-19], осесимметричных [13,18], а с развитием вычислительной техники, и пространственных течений [1,2, 20-25]. Обзор и анализ этих работ приведен в [1].

На рисунке 2 показано формирование плоского соляного, а на рисунке 3 - осесимметричного соляного диапиров для различных моментов безразмерного времени [14,18]. Здесь индексом «1» обозначены, соответственно, плотность, динамическая вязкость, мощность осадочного чехла (ρ_1, μ_1, h_1), а индексом «2» - (ρ_2, μ_2, h_2) - те же величины для галита.



$$\rho_1 = 2,6 \text{ г/см}^3, \rho_2 = 2,2 \text{ г/см}^3, \mu_1 = 2,6 \cdot 10^{18} \text{ П}, \mu_2 = 1,0 \cdot 10^{18} \text{ П}, h_1 = 4,8 \text{ км}, h_2 = 3,2 \text{ км}$$

Рисунок 2. Формирование соляного диапира (плоская модель)

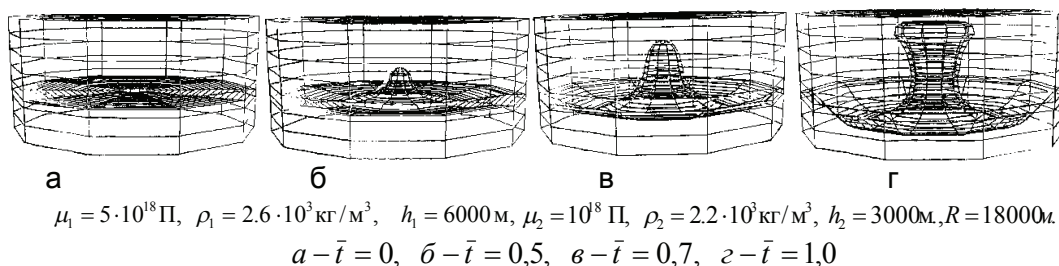


Рисунок 3. Формирование осесимметричного соляного купола



В перечисленных выше работах по формированию соляных диапиров были исследованы некоторые закономерности и особенности развития нелинейной стадии гравитационной неустойчивости. Выделены фазы развития гравитационной неустойчивости, показана ячеистая структура течения, оценены влияние пристеночных эффектов. Так, в работах [2,11-19], при оценке параметров всплывания купола установлены следующие закономерности:

1 Если увеличивать параметр M , характеризующий отношение динамических вязкостей слоев (динамической вязкости верхнего слоя к динамической вязкости нижнего слоя), то процесс развития гравитационной неустойчивости замедляется.

2 Если увеличивать вязкость слоев, оставляя M неизменным, то процесс развития гравитационной неустойчивости замедляется.

3 Увеличение мощности верхнего слоя способствует внедрению легкой жидкости в тяжелую более узкими «языками», а тяжелой в легкую – широким фронтом. 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, расстояния между куполами увеличиваются. Соляной купол растет быстрее в той среде, где имеются большие мощности соли и надсолевых пород.

4 При равной толщине слоев и одинаковой их вязкости решение носит "автомодельный характер". Это означает, что для двух разных вариантов, независимо от величины порядка вязкостей слоев, можно подобрать такие моменты времени, что картины течения будут идентичными.

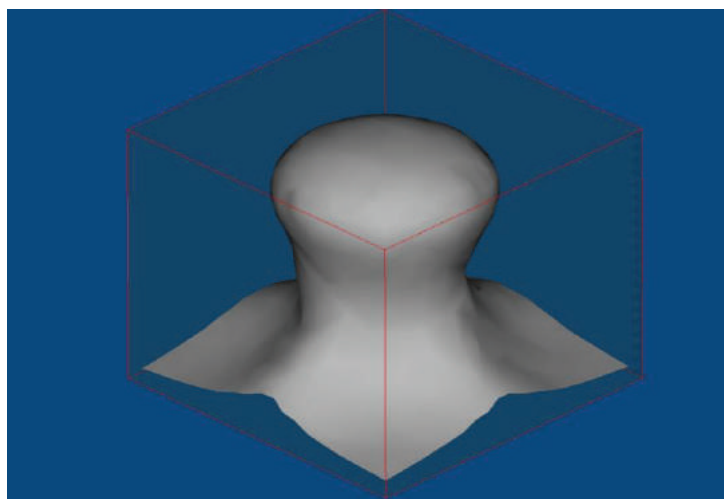
5 С увеличением M купола приобретают шарообразную форму, а с уменьшением M - столбообразную.

Таким образом, на процесс формирования соляных диапиров в земной коре существенное влияние имеют как физические, так и геометрические параметры среды.

С целью выяснения влияния подсолевого ложа на рост соляных куполов была проведена серия расчетов для трехслойной среды, в которой каменная соль расположена между двумя более плотными породами [2,14]. Было установлено, что характер перемещения соли в трехслойной среде отличается от двухслойной, поскольку подошва каменной соли, сцепленная с деформированным основанием, в процессе неустойчивости вовлекается в движение вверх по тем же каналам, что и соль, хотя плотность каменной 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 галита ($\mu_3/\mu_2 \geq 500$), то процесс развития неустойчивости будет происходить так, как и в двухслойной модели, т.е. подсолевой слой не деформируется.

В работах [14] оценено влияние наклона пласта каменной соли на формирование соляных куполов. Показано, что возникает дополнительный момент сил, способствующий повороту всплывающей каменной соли в сторону уменьшения толщины соляного массива. Подобная особенность характерна для соляно-купольной тектоники Прикаспийской впадины.

На рисунке 4 изображен сформировавшийся трехмерный одиночный соляной купол [1,2]. В целях дальнейшего изучения основных закономерностей развития тейлоровской неустойчивости была проведена серия расчетов, которая позволила установить, что закономерности справедливые для плоских течений имеют место и в трехмерном случае, но имеются и отличия [2]. Сравнительный анализ развития плоской гравитационной неустойчивости с пространственной при одинаковых физико-геометрических параметрах показывает: характеристики роста соляного купола (скорость роста, форма купола) в осесимметричной и пространственной моделях 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.



$$\mu_1 = 5 \cdot 10^{18} \text{ П}, \quad \rho_1 = 2.6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, \quad h_1 = 6000 \text{ м}, \quad \mu_2 = 10^{18} \text{ П}, \quad \rho_2 = 2.2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, \quad h_2 = 3000 \text{ м}.$$

Рисунок 4. Сформировавшийся соляной купол в момент времени $t=0.5$ (пространственная модель)

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 развития гравитационной неустойчивости (в зависимости от физико-геометрических параметров среды и первоначального возмущения) протекает быстрее (или медленнее на отдельных фазах) в плоской модели, чем в пространственной.

Сопоставление численных расчетов с результатами лабораторного моделирования, геологическими данными образования соляных структур позволило установить, что численные модели описывают формирование соляных куполов, их развитие адекватно природной обстановке.

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 и усложнением реологии.

Такая тепловая модель формирования соляных диапиров в земной коре (дан новый термин "глубинный диапиризм") была разработана и обоснована учениками школы Ержанова Ж.С. Она основана на релей – тейлоровской неустойчивости в приближении Буссинеска с экспоненциальной зависимостью динамической вязкости от температуры [1, 26-32].

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 [26,30]:

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

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

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

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

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_*), δ_{3i} - тензор Кронекера. По повторяющимся греческим индексам предполагается суммирование.

К системе уравнений (1) - (4), которые выполняются в области Ω , добавляются согласованные начальные и граничные условия [26,30]. В начальный момент времени задано распределение невозмущенной плотности, невозмущенной динамической вязкости и температуры. Граничные условия могут быть разнообразными. На части границы области выполняются условия прилипания, на другой ее части - условия скольжения. На одной части границы области задана температура, на другой ее части - тепловой поток. Кроме того, возможны условия периодичности и симметрии течения [26,30].

Был разработан и обоснован соответствующий дивергентный численный метод с использованием схемы расщепления по физическим процессам и монотонных разностных схем [26-30].

На рисунках 5а) - 5в) показано трехмерное 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 $k = 4 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}^0$, $C_p = 1,2 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}^0$, $\alpha = 2 \cdot 10^{-5} / \text{К}^0$, $E = 20 \text{ кДж/моль}$. На нижней границе температура задавалась равной 250 C^0 , а в центральной ее части - на 50 C^0 выше (моделирует неоднородность теплового потока с нижних слоев Земли). В начальный момент времени распределение температуры внутри области была определена с помощью линейной интерполяции.

Расчеты показали, что основные закономерности и особенности процесса такие же, как и в случае постоянных кинематических вязкостей слоев, но отличаются в количественном отношении [26-33]. При определенных условиях термические градиенты существенно влияют как на объемные профили, так и на скорость формирования соляных диапиров глубокого залегания [33]. Так, наличие относительно близкорасположенных температурных возмущений теплового потока с нижних горизонтов земной коры приводит к образованию соляных столбов.

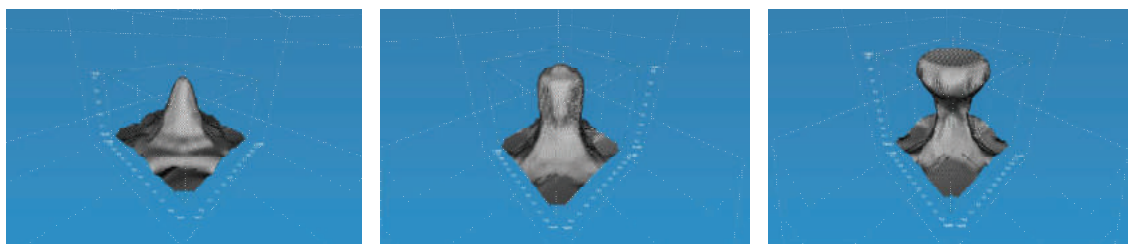
а) $t = 0,65$ б) $t = 0,65$ в) $t = 1,10$

Рисунок 5. Пространственные профили глубинного соляного диапиризма в различные моменты безразмерного времени

Ранее образование подобных структур авторами данной работы было объяснено за счет усложненной реологии (вязкопластичная модель), которая обладает свойствами «продомости» жидкости Вейссенберга [7]. Учет зависимости динамической вязкости от абсолютной температуры приводит к образованию в развитой фазе «листьяобразных» соляно-купольных структур [33].

В работах [27-31] оценивались возможные коллектора нефти и газа (нефтегазовые ловушки), методика определения которых основана на следующих соображениях. Осадочный чехол и подсолевое ложе на небольших отрезках времени являются хрупкими горными породами, механизмом разрушения которых являются хрупкое растрескивание (разрушение), 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. Зоны разрушения осадочного чехла и подсолевого ложа определялись по критерию прочности горных пород (превышение предела прочности девиатором касательных напряжений). Для соляных куполов нефтегазовые ловушки формируются в областях их крыльев (надкрылового и подкрылового пространства), а также в области подкупольного пространства подсолевого ложа. Это было обнаружено глубинным бурением соляных диапиров и подтверждено результатами проведенных численных расчетов [27-31].

При развитой гравитационной неустойчивости изотермы сильно изогнуты и диоморфны профилю соляного диапира. Они заполняют область, прилегающую к крыльям соляного купола, где температура повышена на $30-90^{\circ}\text{C}$ относительно соседних областей осадочного чехла [27-31]. Хорошо известно, что величина геотермического градиента является одним из главных параметров и признаков генерации полезных ископаемых [34]. Повышение температуры на 10°C увеличивает скорость химической реакции в два раза в средах, благоприятных для выделения углеводородных соединений, в том числе нефти. В работе [34] с помощью космического мониторинга 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. Расчеты показали, что распределение изотерм и распределение зон повышенных девиаторов касательных напряжений количественно подтверждают, что углеводородные запасы привязаны к областям с повышенными температурными градиентами.

Было также установлено [27-31], что термические градиенты оказывают существенное влияние на формирование подсолевого ложа, сильно деформируя подкупольное пространство. В подсолевоом 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 подсалевого ложа. Поэтому, если в подсалевоом ложе присутствуют большие запасы углеводородов, то они, вследствие дилатансии, будут мигрировать в центральную часть подкупольного пространства. Количественная оценка этих объемов, с учетом пористости и фильтрационных характеристик среды, позволяет определить вероятные запасы углеводородов. Отметим, что получение информации о характеристиках подкупольного пространства гравитационной, магнитной и сейсмической разведками практически представляется невозможным.

Рекомендации. Приведенные выше результаты математического моделирования соляных куполов позволяют дать некоторые рекомендации в нефтегазовом деле.

Анализ плоских, осесимметричных и пространственных механизмов гравитационной неустойчивости может объяснить формирование куполов гигантов, кольцевых массивов, линейных гряд и соляных столбов, характерных для солнокупольной тектоники Прикаспийской впадины [3]. Начально-краевая динамическая задача, описывающая формирование соляных куполов, корректна при обратном течение времени. То есть, возможно восстановить



предисторию формирования соляных куполов. Это даст дополнительную геолого-морфологическую информацию, которая может быть использована в геологоразведке [35].

Возможно провести проводку эксплуатационных скважин с наклонной криволинейной траекторией в обход слабопрочного соляного купола, предотвращая прихват бурильных колонн [36].

При известном профиле верхней шапки купола и мощности подсолевого ложа, а также распределении теплового потока, компьютерное моделирование позволяет детализировано «отбить» подкрыловое пространство куполов и подкупольного пространства. При известной петрографии осадочного чехла, галита и подсолевого ложа разработанная методика позволяет разведать и оценить возможные коллектора нефти и газа, что другими методами не всегда возможно.

На фоне пластового давления девиаторы касательных напряжений играют основополагающую роль при формировании нефтегазовых ловушек. Изменение же положения экстремальных значений девиаторов касательных напряжений может указать направление миграции нефти, которая проявляется в том, что в подкарнизной части соляных куполов нефть исчезает в процессе ее добычи.

Рациональное использование информации о распределении поля касательных напряжений позволит оптимально вести как разведку, так и добычу углеводородов с существенным снижением материальных затрат. Сюда относятся задачи оптимального размещения нагнетательных скважин, проведения гидравлического разрыва пласта, повышение нефтеотдачи пластов.

Могут быть сформулированы задачи фильтрации и вытеснения, выработаны меры по уменьшению смятия обсадных колонн, используя информацию о напряженно-деформированном состоянии осадочного чехла и подсолевого ложа.

Можно развить экологически безопасную технологию строительства глубоких и сверхглубоких в соляно-купольных структурах [37].

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

Заключение. Разработанная численная технология формирования соляных диапиров является эффективным инструментом в нефтегазовом деле. Она позволяет в сочетании с другими методами разрешить практические проблемы при разведке, разработке нефтегазовых месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баймухаметов А. А., Мартынов Н. И., Рамазанова М.А. Отчет НИР по теме: Математическое моделирование соляного диапиризма глубокого залегания. - Алматы-2015.-46с.
2. Мартынов Н.И., Танирбергенов А.Г. Численное моделирование условий формирования солянокупольных структур в земной коре //Математический журнал.- 2006. т.6.- №1 (191).-С.67-73.
3. Ержанов Ж.С., Егоров А.К., Гарагаш И.А. и др. Теория складкообразования в земной коре. - М.: Наука.- 1975.- 239 с.



4. Исмаил-заде А.Г., Биргер Б.И. Гравитационная неустойчивость идеально пластического слоя, находящегося на слое вязкой жидкости: следствия для диапиризма // Физика Земли. – 2001. - №7. - С. 10-17.
5. Мартынов Н.И., Танирбергенов А.Г. Гравитационная неустойчивость вязкопластической среды // Мат. журнал. – 2006. - Т.6. - № 4(22). - С.71-79.
6. Martynov N.I., Tanirbergenov A.G., Baimakhan R.B. Research of Relay-Taylor instability of creeping flows with an axial symmetry and a complicated rheology // 7-th International Symposium «Enhancing Infrastructure development through innovative geoinformation technology». - Kuala Lumpur, Malaysia, 2008. - 70p.
7. Baimukhametov A.A., Martynov N.I., Tanirbergenov A.G. Research of gravitational instability of the non-new tonianviscoplastic medium // Journal of Mathematics and Technology. – 2010. - April. - P. 22-29.
8. Garagash I.A., Martynov N.I., Amanov G.Sh. About one mathematical model of propagation tectonical waves in lithosphere // VII - European seismological conference. - Spain, Barcelona. - 1990. - P. 175.
9. Howard James C. Monte Carlo simulation model for pier cement salt domes // Kansas Geol. Surv. Computer. Contrib. - 1968. - № 22. - P. 22-34.
10. Nasir N.E., Dabboosy O.B. The dynamics of salt-dome evolution // Tectonophysics. - 1978. - Vol. 47. - № 1. - P. 85-107.
11. Woid W.D. Finite element calculations applied to salt-dome analysis // Tectonophysics. - 1978. - V. 50. - № 2. - P. 369-386.
12. Мясников В.П., Новиков В.Л., Сазонов Ю.В. Прямая задача моделирования соляных куполов // ДАН СССР. - 1980. - Т. 254, № 5. - С. 1105-1108.
13. Huppert H.E. The propagation of two-dimensional and axisymmetric viscous gravity current over a rigid horizontal surface // J.Fluid Mech.-1982.-V.121.- P.43-58.
14. 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.
15. Наймарк Б.М., Малевский А.В. Приближенный метод расчета развития гравитационной неустойчивости // Изв. АН СССР, Физика Земли. - 1986. - № 2. - С. 44-53.
16. Лунев Б.В. Изостазия как динамическое равновесие вязкой жидкости // ДАН АН СССР. - 1986. - Т. 290. - №1. - С. 72-76.
17. Zaleski S., Julien P. Numerical simulation of Rayleigh-Taylor instability for single and multiple salt diapirs // Tectonophysics. - 1992. - Vol. 206. - № 1-2. - P. 55-69.
18. Танирбергенов А.Г. Модельное исследование условий образования соляного купола: дис. на соиск. степени к.ф.-м.н. по специальности 01.02.07-Механика сыпучих тел, грунтов и горных пород. - Алма-Ата, 1994. - 112с.
19. Dandre B., Cloetingh S. Numerical modeling of salt diapirism: Influence of the tectonic regime // Tectonophysics. - 1994. - Vol. 240. - № 1-4. - P. 59-79.



20. Исмаил-заде А.Т., Короткий А.И., Наймарк Б.М. и др. Реализация трехмерной гидродинамической модели эволюции осадочных бассейнов //ЖВМ и МФ. - 1998. - Т. 38. - № 7. - С. 1190-1203.
21. Орунханов М.К., Танирбергенов А.Г. Численное моделирование процесса формирования нефтяных соляных куполов // Нефть и газ. - 2000. - № 2. - С. 72-76.
22. Исмаил-заде А.Т., Цепелев И.А., Тялбот К. Трехмерное моделирование соляного диапиризма: Численный подход и алгоритм параллельных вычислений // Вычислительная сейсмология. - 2000. - Вып. 31. - С. 62-76.
23. Romer M.M. The salt dome problem: A multilayered approach // Geophys. Res. - 2000. - Vol. 196. - P. 5489-5496.
24. Мартынов Н.И., Танирбергенов А.Г. Численное исследование тейлоровской неустойчивости ползущих движений Стокса // Вопросы прикладной физики и математики. - 2003. - С. 123-127.
25. Лунев Б.В., Лапковский В.В. Быстрое численное моделирование соляной тектоники: возможность оперативного использования в геологической практике // Физическая мезомеханика. - 2008. - Т. 12. - №1. - С. 63-73.
26. Жантаев Ж.Ш., Мартынов Н.И., Танирбергенов А.Г. Формирование соляных диапиров в температурном поле // Проблемы эволюции открытых систем. - 2009. - Т.1, вып. 11. - С. 70-76.
27. Baimukhametov A.A., Martynov N.I., Tanirbergenov A.G. Influence of thermogradients on formational of oil and gas traps // International Journal of Academic Research. - 2011.- 1 Part.- Vol.3- P.7-12.
28. Baimukhametov A.A., Martynov N.I., Tanirbergenov A.G. Numerical research stressed- deformed state of rocks in the salt dome areas of crust // Journal of Mathematics and Technology, ISSN: 2078-0257. - 2013.-Vol.4- № 2.- P.9-13.
29. Baimukhametov A.A., Martynov N.I., Tanirbergenov A.G. Thermogradient model of formation of oil and gas traps at salt diepirism // Proceeding of tye 23 rd ICTAM, , Beijng, China.- 2012.- 2p.- sm 06-013.
30. Баймухаметов А.А., Мартынов Н.И., Танирбергенов А.Г. Влияние термоградиентов на формирование нефтегазовых ловушек. //Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. -Н- 2011.-Т.1- С. 275-280.
31. Баймухаметов А.А., Мартынов Н.И., Рамазанова М.А., Танирбергенов А.Г., Чупрасов А.А. Нефтегазовые коллектора в условиях солянокупольной тектоники // Известия НАН РК.- 2013.-№ 2.-С.212-220.
32. Баймухаметов А.А., Мартынов Н.И., Танирбергенов А.Г. Компьютерное моделирование формирования глубинного соляного диапиризма // Известия НАН РК.-2015.- сер.физ.-мат.- № 2(300).- С.36-40.
33. Баймухаметов А.А., Мартынов Н.И., Рамазанова М.А., Танирбергенов А.Г., Танирбергенов Б.А. Некоторые аспекты формирования глубинного соляного диапиризма // Известия НАН РК.-2016.- № 3(307).- сер.физ.-мат.- С.127-132.
34. Жантаев Ж.Ш. О характере изменения мощности земной коры в зависимости от величины геотермического градиента. //Материалы Российско-Казахстанского симпозиума по вопросам геодинамики. А-М. - 2007г. - С.14-23.



35. Геология регионов Каспийского и Аральского морей. Под ред. Г.Р.Бекжанова.- Алматы: Изд. «КазГЕО»-2004. - 472с.
36. Айталиев Ш.М., Кудайкулов А.К., Мардонов Б.М. Механика прихвата бурильных колонн в нефтегазовых скважинах.- Атырау-Алматы: Изд. «Эверо».-1999.-82с.
37. Хаиров Г.Б. Экологически безопасная технология строительства глубоких разведочных скважин.- М: «ВНЦИОЭНГ».-1996.-204с.

LITERATURA

1. Bajmuhametov A. A., Martynov N. I., Ramazanova M.A. Otchet NIR po teme: Matematicheskoe modelirovanie solyanogo diapirizma glubokogo zaleganiya. - Almaty-2015.-46s.
2. Martynov N.I., Tanirbergenov A.G. CHislennoe modelirovanie uslovij formirovaniya solyanokupol'nyh struktur v zemnoj kore //Matematicheskij zhurnal.- 2006. t.6.- №1 (191).-S.67-73.
3. Erzhanov ZH.S., Egorov A.K., Garagash I.A. i dr. Teoriya skladkoobrazovaniya v zemnoj kore. - M.: Nauka.- 1975.- 239 s.
4. Ismail-zade A.G., Birger B.I. Gravitacionnaya neustojchivost' ideal'no plasticheskogo sloya, nahodyashchegosya na sloe vyazkoj zhidkosti: sledstviya dlya diapirizma // Fizika Zemli. – 2001. - №7. - S. 10-17.
5. Martynov N.I., Tanirbergenov A.G. Gravitacionnaya neustojchivost' vyazkoplasticheskoy sredy// Mat. zhurnal. – 2006. - T.6. - № 4(22). - S.71-79.
6. Martynov N.I., Tanirbergenov A.G., Baimakhan R.B. Research of Relay-Taylor instability of creeping flows with an axial symmetry and a complicated rheology // 7-th International Symposium «Enhancing Infrastructure development through innovative geoinformation technology». - Kuala Lumpur, Malaysia, 2008. - 70p.
7. Baimukhametov A.A., Martynov N.I., Tanirbergenov A.G. Research of gravitational instability of the non-new tonianviscoplastic medium // Journal of Mathematics and Technology. – 2010. - April. - P. 22-29.
8. Garagash I.A., Martynov N.I., Amanov G.Sh. About one mathematical model of propagation tectonical waves in lithosphere // VII - European seismological conference. - Spain, Barcelona. - 1990. - P. 175.
9. Howard James C. Monte Carlo simulation model for pier cement salt domes // Kansas Geol. Surv. Computer. Contrib. - 1968. - № 22. - P. 22-34.
10. Nasir N.E., Dabboosy O.B. The dynamics of salt-dome evolution // Tectonophysics. - 1978. - Vol. 47. - № 1. - P. 85-107.
11. Woid W.D. Finite element calculations applied to salt-dome analysis // Tectonophysics. - 1978. - V. 50. - № 2. - P. 369-386.
12. Myashnikov V.P., Novikov V.L., Sazonov YU.V. Pryamaya zadacha modelirovaniya solyanyh kupolov // DAN SSSR. - 1980. - T. 254, № 5. - S. 1105-1108.
13. Huppert H.E. The propagation of two-dimensional and axisymmetric viscous gravity current over a rigid horizontal surface // J.Fluid Mech.-1982.-V.121.- P.43-58.



14. Erzhanov ZH.S., Martynov N.I. Tejlorovskaya neustojchivost' dvumernogo polzushchego dvizheniya granicy razdela vyazkih neszhimaemyh zhidkostej // Izv. AN Kaz. SSR, ser. fiz.-mat. - 1985. - № 5. - S.79-84.
15. Najmark B.M., Malevskij A.V. Priblizhennyj metod rascheta razvitiya gravitacionnoj neustojchivosti // Izv. ANSSSR, FizikaZemli. - 1986. - № 2. - S. 44-53.
16. Lunev B.V. Izostaziya kak dinamicheskoe ravnesie vyazkoj zhidkosti // DAN AN SSSR. - 1986. - T. 290. - №1. - S. 72-76.
17. ZaleskiS., JulienP. NumericalsimulationofRayleigh-Taylorinstabilityforsingleandmultiplesaltdiapirs // Tectonophysic. - 1992. - Vol. 206. - № 1-2. - P. 55-69.
18. Tanirbergenov A.G. Model'noe issledovanie uslovij obrazovaniya solyanogo kupola: dis. na soisk. stepeni k.f.-m.n. po special'nosti 01.02.07-Mekhanika sypuchih tel, gruntov i gornyh porod. - Alma-Ata, 1994. - 112s.
19. Dandre B., Cloetingh S. Numerical modeling of salt diapirism: Influence of the tectonic regime // Tectonophysics. - 1994. - Vol. 240. - № 1-4. - P. 59-79.
20. Ismail-zade A.T., Korotkij A.I., Najmark B.M. i dr. Realizaciya trekhmernoj gidrodinamicheskoy modeli ehvolucii osadochnih bassejnov //ZHVM i MF. - 1998. - T. 38. - № 7. - S. 1190-1203.
21. Orunhanov M.K., Tanirbergenov A.G. CHislennoe modelirovanie processa formirovaniya neftyanyh solyanyh kupolov // Neft' i gaz. - 2000. - № 2. - S. 72-76.
22. Ismail-zade A.T., Cepelev I.A., Tyalbot K. Trekhmernoe modelirovanie solyanogo diapirizma: CHislennyj pohod i algoritm parallel'nyh vychislenij // Vychislitel'naya sejsmologiya. - 2000. - Vyp. 31. - S. 62-76.
23. Romer M.M. The salt dome problem: A multilayered approach // Geophys. Res. - 2000. - Vol. 196. - P. 5489-5496.
24. Martynov N.I., Tanirbergenov A.G. CHislennoe issledovanie tejlorovskoj neustojchivosti polzushchih dvizhenij Stoksa // Voprosy prikladnoj fiziki i matematiki. - 2003. - S. 123-127.
25. Lunev B.V., Lapkovskij V.V. Bystroe chislennoe modelirovanie solyanoj tektoniki: vozmozhnost' operativnogo ispol'zovaniya v geologicheskoy praktike // Fizicheskaya mezomekhanika. - 2008. - T. 12. - №1. - S. 63-73.
26. ZHantaev ZH.SH., Martynov N.I., Tanirbergenov A.G. Formirovanie solyanyh diapirov v temperaturnom pole // Problemy ehvolucii otkrytyh sistem. - 2009. - T.1, vyp. 11. - S. 70-76.
27. Vaimukhametov A.A., Martynov N.I., Tanirbergenov A.G. Influence of thermogradients on formational of oil and gas traps // International Journal of Academic Research. - 2011.- 1 Part.- Vol.3- P.7-12.
28. Baimukhametov A.A., Martynov N.I., Tanirbergenov A.G. Numerical research stressed- deformed state of rocks in the salt dome areas of crust // Journal of Mathematics and Technology, ISSN: 2078-0257. - 2013.-Vol.4- № 2.- P.9-13.
29. Baimukhametov A.A., Martynov N.I., Tanirbergenov A.G. Thermogradient model of formation of oil and gas traps at salt diepirism // Proceeding of tye 23 rd ICTAM, , Beijng, China.- 2012.- 2p.- sm 06-013.
30. Bajmuhametov A.A., Martynov N.I., Tanirbergenov A.G. Vliyanie termogradientov na formirovanie neftegazovyh lovushek. //Geodinamika i napryazhennoe sostoyanie neдр Zemli. -N- 2011.-T.1- C. 275-280.



31. Bajmuhametov A.A., Martynov N.I., Ramazanova M.A., Tanirbergenov A.G., CHuprasov A.A. Neftegazovye kollektora v usloviyah solyanokupol'noj tektoniki // Izvestiya NAN RK.- 2013.-№ 2.-S.212-220.
32. Bajmuhametov A.A., Martynov N.I., Tanirbergenov A.G. Komp'yuternoe modelirovanie formirovaniya glubinnogo solyanogo diapirizma // Izvestiya NAN RK.-2015.- ser.fiz.-mat.- № 2(300).- S.36-40.
33. Bajmuhametov A.A., Martynov N.I., Ramazanova M.A., Tanirbergenov A.G., Tanirbergenov B.A. Nekotorye aspekty formirovaniya glubinnogo solyanogo diapirizma // Izvestiya NAN RK.-2016.- № 3(307).- ser.fiz.-mat.- S.127-132.
34. ZHantaev ZH.SH. O haraktere izmeneniya moshchnosti zemnoj kory v zavisimosti ot velichiny geotermicheskogo gradienta. //Materialy Rossijsko-Kazahstanskogo simpoziuma po voprosam geodinamiki. A-M. - 2007g. - S.14-23.
35. Geologiya regionov Kaspijskogo i Aral'skogo morej. Pod red. G.R.Bekzhanova.- Almaty: Izd. «KazGEO»-2004. - 472s.
36. Ajtaliev SH.M., Kudajkulov A.K., Mardonov B.M. Mekhanika prihvata buril'nyh kolonn v neftegazovyh skvazhinah.- Atyrau-Almaty: Izd. «EHvero».-1999.-82s.
37. Hairon G.B. EHkologicheski bezopasnaya tekhnologiya stroitel'stva glubokih razvedochnyh skvazhin.- M: «VNCIIIOEHNG».-1996.-204s.

