

УДК 51.7:532.546

Флюидодинамическая модель автоколебательных процессов

© Л.В. Клочкова¹, Ю.А. Повещенко², В.Ф. Тишкин³

Аннотация. Рассмотрены различные модели динамического поведения флюидов углеводородов в пористых средах, состоящих из разнородных геологических структур, в которых возникают автоколебательные процессы.

Ключевые слова: геолого–механические модели, динамические процессы, углеводородные флюиды, месторождения, математическое моделирование, автоколебательные процессы.

1. Введение

Данная статья, состоящая из двух, казалось бы, независимых частей, ставит своей целью показать, как решённые ранее задачи математического моделирования могут неожиданно помочь при решении задач совершенно в других областях изучения природы реальных явлений. В ряде работ [1] рассмотрены геомеханические модели флюидодинамических процессов с однофазным и двухфазным флюидом в надвигах и разломах, глубина которых превышает 7 км. На основе этих моделей исследуются условия и механизмы образования гигантских газовых и газоконденсатных месторождений в структурах типа Астраханского свода. Характерной особенностью этих структур является малая проницаемость пород вне разломов и высокая трещиноватых зон. Кроме того, вся Прикаспийская впадина является гигантским углеводородным материнским телом, которое в состоянии снабдить органическим веществом все нефтеобразующие процессы в этом районе. Поэтому сбор и переработка органического вещества может происходить в глубоких разломах, которые одновременно являются и движущей силой флюидных процессов. В разломах возникают автоколебательные процессы, обусловленные смещениями бортов разломов. Эти колебания выжимают флюиды из разломов внутрь тела надвигов, внутри которых они двигаются по ослабленным зонам. Движение двухфазного флюида в пористой среде происходит в режиме реверсивных автоколебаний, обусловленных накоплением газа в некоторых слоистых пачках. Таким образом объясняется образование гигантских газовых месторождений типа Астраханского.

Первичным источником всех движений является горизонтальное напряжение в коре и литосфере, которое создаётся в результате глобальных геодинамических процессов, определяемых конвективными движениями в мантии. Далее глобальные процессы трансформируются в региональные движения.

2. Флюидодинамическая модель автоколебательных процессов

Возможно существование автоколебательных процессов, связанных с относительным смещением по бортам разлома и движением флюидов. По геофизическим данным, строе-

¹ Старший научный сотрудник Института прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, г. Москва; klud@imamod.ru.

² Ведущий научный сотрудник Института прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, г. Москва; poveshchenko@keldysh.ru.

³ Заместитель директора Института прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, г. Москва; tishkin@imamod.ru.

ние Астраханского свода характеризуется наличием как раз таких разломов. Блоки земной коры в районе вала Карпинского находятся в поле действия тектонических сил, которые приводят к движениям по разломам и сейсмическим событиям. Флюиды, попадая в очаговую зону, могут играть роль спускового крючка, т. е. создают так называемый триггерный эффект.

Большинство фильтрационных моделей в разломах основывается на предположении о фильтрации углеводородов и воды сквозь упругий (или упруго-хрупкий) скелет, т. е. на модели упругой консолидации. Эти явления описываются параболическим уравнением пьезопроводности. Особенности наблюдаемого циклического процесса позволяют предположить, что изменения сеймотектонического режима состоят из быстрых и медленных фаз. Особенности циклического процесса не укладываются в известные классы моделей и дилатантно-диффузионную концепцию. Проведён анализ математической модели подобного циклического процесса [2]. Фаза разжижения в разломе является медленной фазой вязкой консолидации, во время которой флюиды из очаговой зоны отжимаются в окружающий массив. В процессе этой фазы углеводороды и вода перетекают из магистральных трещин в более мелкие трещины и поры сформированного месторождения. Обратный процесс закачивания флюидов в разлом описывается быстрой дилатантной фазой. Для описания этого процесса была предложена следующая геолого-механическая модель. Два смежных блока земной коры, разделенных разломом, движутся друг относительно друга с постоянной скоростью. Границы блоков считаются плоскопараллельными, а трещиновато-пористая среда разлома однородной, обладающей некими особыми свойствами. Поэтому краевая задача, описывающая ситуацию в разломе, не стационарна и одномерна по пространственной координате. Для простоты считается, что разлом ориентирован вертикально. Система трещин в разломной зоне обладает ориентацией, параллельной плоскости разлома, поэтому среда в нем анизотропна. Однако если рассматривать одномерную по пространственной координате z (ось z направлена вертикально вверх) задачу, то вертикальными смещениями скелета можно пренебречь, поскольку основные смещения границ трещин будут происходить в направлении, перпендикулярном плоскости разлома. Поэтому одномерное приближение применимо. Для описания динамики скелета для фильтрационного потока это приближение также применимо, поскольку толщина погранслоя для него порядка горизонтального размера трещин и, следовательно, пренебрежимо мала по сравнению с толщиной разлома, которая, обычно имеет размер порядка первых километров.

Результаты экспериментальных исследований [3], а также исследования глубинного строения земной коры показывают, что одни и те же горные породы в пределах верхней коры ведут себя по-разному в зависимости от глубины. С глубиной, с увеличением всестороннего давления меняется угол между плоскостью разрушения и направлением максимального главного напряжения. Из этих экспериментов следует, что в консолидированных породах каталаз наступает на глубинах порядка 10–15 км. В ослабленных трещиноватых породах разломной зоны режим разрушения, соответствующий каталазу, наступает на меньших глубинах. По этой причине режим разрушения пород коры приводит либо к образованию листрических разломов, плавно переходящих в коровые волноводы, либо к глубинным разломам. В любом случае с глубиной увеличивается толщина разрушенной зоны.

Суть предлагаемой модели автоколебательных процессов в разломной зоне состоит в том, что существуют два конкурирующих режима движения флюидов — режимы компакци и дилатансии. В результате в разломе возникают две фазы цикла — дилатансионное нагружение и разгрузка, сопровождающаяся компакцией. Фаза дилатансии описывается уравнениями дилатансии Рейса. Фаза компакци описывается системой уравнений ком-

пакции, которая в безразмерной форме имеет вид [1], [3], [4]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(f^{-l} \frac{\partial s}{\partial x} \right) = k^2 f^{-k} s - 1, \quad \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial x},$$

здесь s — скорость фильтрации, f — пористость, t — время, k^2 — безразмерный параметр, равный

$$k^2 = \frac{H^2(0)}{(H^*)^2}, \quad H^* \equiv \sqrt{\frac{\tilde{\zeta}^*}{\tilde{\delta}^*}},$$

где $H(0)$ — начальный размер области определения $H(t)$, $\tilde{\zeta}^*$, $\tilde{\delta}^*$ — характерные масштабы вязкости и гидравлического сопротивления среды. Взаимодействие двух конкурирующих режимов проявляется в виде энергетически мощного автоколебательного процесса.

Уравнения дилатансии совместно с уравнениями компакции исследовались численно и аналитически [3], [4] при дополнительном условии периодичности. Решение представляет собой релаксационные автоколебания.

При нагружении разлома в нем возникает дилатансионный эффект, связанный с раскрытием трещин. В этот момент поровое давление в разломах падает, и флюиды устремляются вниз по простиранию разлома. Расчеты показывают, что при сдвиге в режиме дилатансии в разломе возникают такие отрицательные давления, которые создают мощный эффект нагнетания флюидов в него как сверху, так и снизу. Когда движение по разлому прекращается, трещины в разломе закрываются (по крайней мере, частично) и наступает фаза компакции. Фаза компакции является более длительной и соответствует уменьшению пористости. В это время поровое давление возрастает до геостатического и даже выше. При этом флюиды частично устремляются вверх по разлому и опережающим его трещинам, а частично — устремляются по опережающим разломам вглубь тела надвига. Под действием этого давления раскрываются трещины в ослабленных трещиноватых зонах. Поэтому отток флюидов происходит не равномерно по всему объему, а только по ослабленным зонам.

Период автоколебаний определяется самой длительной фазой — фазой компакции. В глубоких разломах эти колебания имеют периоды порядка сотен и тысяч лет. В процессе этих колебаний флюиды будут периодически поступать из разлома в окружающие массивы. Таким образом создаются условия для периодического "промыывания" флюидами подсолевой толщи Прикаспийской впадины вплоть до глубин примерно 10–15 км.

Поскольку сверху все эти структуры перекрыты соленосными отложениями, то создаются условия для образования углеводородных месторождений. При этом указанный колебательный флюидный режим будет играть определяющую роль. Если трещиноватые зоны (по которым из разлома двигаются флюиды) перекрываются сверху непроницаемыми антиклинальными флюидоупорами, то возможно образование месторождений нефти и газа. Если же трещиноватая зона выходит на поверхность, то флюиды рассеиваются в атмосфере. Особенность модели с однофазным флюидом состоит в том, что все колебательные процессы обусловлены автоколебаниями в самом разломе. За пределами разломов движение подчиняется параболическому уравнению пьезопроводности, и решение носит типичный диссипативный характер, свойственный уравнению диффузии. Канализация миграции флюидов (которая приводит к образованию месторождений) обуславливается только наличием ослабленных сильно проводящих зон, которые упираются в непроницаемые ловушки.

3. Различные гидродинамические режимы при двухфазном флюиде

Если в рассмотренной выше схеме учесть наличие двухфазного флюида (например, вода–газ), то помимо автоколебаний в разломе, возникнут еще автоколебательные процессы в массиве пород, вмещающем разломы. Эти колебания с одной стороны не требуют наличия особых проводящих каналов, а с другой стороны — они могут способствовать возникновению газовых месторождений–гигантов.

Одним из основных процессов, определяющих формирование залежей углеводородов, является многофазная фильтрация флюидов (гидротермальные воды, газоконденсат, газ, жидкие углеводороды). В математическом отношении система уравнений, описывающая такие процессы (в частности, с учётом гравитации), обладает смешанным гиперболически–параболическим типом. Рассмотренная в предыдущем разделе схема предполагает, что движущим механизмом флюидных процессов являются автоколебания в разломах. Они дают некий флюидный импульс, который затем распространяется в массиве вне разлома. Полагают, что флюид состоит из двух фаз — вода-газ. Все пространство вне разлома вначале заполнено водой. В режиме компакции в разломе из него подается газовый импульс во внешнее (по отношению к разлому) пространство, который распространяется в соответствии с законами двухфазной фильтрации.

Структура пористого пространства, в котором распространяется этот импульс примерно такова. Сверху находится соленосная крышка, которая собственно и обеспечивает существование газового месторождения. В данной ситуации уже нет необходимости в наличии ослабленного проводящего канала от разлома к ловушкам. Концентрация газового импульса и его движение вверх обеспечивается сложной слоистой структурой трещиновато-пористой среды в подсоловом комплексе. Анализ расчётных баз данных для данного региона (Каракульско–Смушковская зона и Астраханского свода) позволяет выделить в подсоловом массиве слоистые комплексы, состоящие из малопроницаемых и сильно проницаемых слоев. Эти слои образуют своего рода флюидоупор и способны находиться в метастабильном состоянии. Они частично удерживают газ, но это состояние крайне неустойчиво. Газ все время сочится из этих слоистых комплексов вверх, а когда его накапливается слишком много, то он прорывается и устремляется вверх большими порциями. Объем прорыва зависит от размеров слоистой пачки и числа чередующихся в ней сильно- и малопроницаемых слоев.

Были проведены численные расчеты движения двухфазного флюида от его источника (разлома) в подсоловом пористом массиве. Расчеты показали, что существуют три режима движения флюидов: первичный пробой, реверсивный (колебательный) и диссипативный (диффузия в окружающее пространство). Диссипативный процесс полностью аналогичен процессам в системе с однофазным флюидом, которые рассмотрены в предыдущем разделе. Первичный пробой — это достижение газовой фазой верхних отложений осадочного бассейна, т.е. солевой крышки. При этом происходит бифуркация решения, и вся динамика флюидов качественно меняется. После этого момента при определенных условиях возникает реверсивный режим, который характеризуется собственными колебаниями. Типичный период цикла в реверсивном режиме состоит в следующем: в начальной фазе происходит накачка флюидов в упомянутую выше слоистую структуру, сопровождающаяся повышением порового давления в этой зоне над гидростатическим давлением. Этот процесс происходит локально, равновесно (градиенты давлений и плотности гравитационных усилий в законе Дарси соизмеримы). Флюидная система перестраивается, накапливая свой потенциал (т.е. объем газа) к пробую сквозь слоистую структуру за счёт повышения давления и увеличения относительной проницаемости газа. Затем начинается связанная

с процессом реверсии фаза пробоя, которая состоит в перестройке профиля давлений и всплытия газового пузыря. Всплытие сквозь флюидный упор происходит быстро. Необходимо отметить, что в этот период происходит резкое падение давления ниже примерно гидростатического и нарушение локального гидродинамического равновесия в законе Дарси. Собственно динамическая стадия цикла состоит в дальнейшем реверсивном проседании воды в образовавшуюся зону пониженного давления. В завершающей фазе происходит выравнивание (как правило, полное) профилей давлений и флюидной насыщенности, достигая примерно начальных величин цикла. Это и есть третья, асимптотическая стадия цикла.

Наблюдаемые расчётные периоды циклов — порядка 50 – 100 лет. При этом начальный пробой газом всей осадочной толщи происходит примерно за время порядка 300 – 400 лет. Собственные пространственные и временные масштабы реверсивной флюидной системы, так же как и достижение критической пробойной точки зависят от флюидного динамического режима всего региона. В частности, они зависят от интенсивности источников поступления углеводородов, генерирующих возможностей системы разломов и термодинамики региона. Придонный источник углеводородов для Каракульско-Смушковской надвиговой зоны на поперечной мощности слоя порядка 50 км задавался в виде ступенчатого по времени газофлюидного потока с амплитудой (общим объёмом газа) порядка $2.85 * 10^2 \text{ м}^3 / \text{сек}$.

Входные ёмкостные свойства и литологическая информация для расчетов бассейнового анализа (пористости, проницаемости), как правило, бывает недостаточна. Поэтому привлекаются данные бурения по регионам сходного геологического и геодинамического строения, а также данные геофизики. Проведены расчеты для Каракульско-Смушковской надвиговой зоны с помощью интерполяции данных в скважинах (Краснокудунская, Смушковская, Высоковская, Долгожданная, Воложковская, Астраханская, Заволжская).

Быстрые прорывы описывались в работе уравнениями изотермической фильтрации двухфазного флюида в среде с упругим скелетом [4]. Краевую задачу о быстрых прорывах решали при условиях, характерных для поднадвиговой Каракульско-Смушковской зоны и Астраханского свода. Эта зона аппроксимировалась некоторым телом с простой геометрией, на котором была задана сетка с достаточной степенью точности, отражающая структуру этого района и его литологические и фильтрационные свойства. Расчёты проводились с привлечением системы "Текон". Фильтрационно-гравитационное моделирование системы состоящей из легкого газа проникающего снизу и изначально заполнявшей поровый объём осадочного бассейна жидкой компоненты показало, что существуют три режима движения флюидов: первичный пробой, реверсивный (колебательный) и диссипативный (диффузия в окружающее пространство). Типичный период цикла в реверсивном режиме состоит в следующем. Происходит накачка флюидов в слоистую структуру бассейна, сопровождающаяся повышением в этой зоне порового давления над гидростатическим. Этот процесс происходит локально и гидродинамически равновесно (градиенты давлений и плотности гравитационных усилий в законе Дарси соизмеримы). Флюидная система перестраивается, накапливая свой потенциал (т.е. объём флюида) к пробую сквозь слоистую структуру за счёт повышения давления и увеличения относительной проницаемости. Затем начинается связанная с процессом реверсии фаза пробоя, которая состоит в перестройке профиля давлений и всплытия УВ флюида. Всплытие сквозь флюидный упор происходит быстро (десятки лет). Необходимо отметить, что в этот период происходит резкое падение давления ниже примерно гидростатического и нарушение локального гидродинамического равновесия в законе Дарси. Собственно динамическая стадия цикла состоит в дальнейшем реверсионном проседании воды в образовавшуюся зону пониженного давления и фазе релаксации.

Собственные пространственные и временные масштабы реверсивной флюидной системы, так же как и достижение критической пред пробойной точки зависят от флюидного динамического режима всего региона. В частности, они зависят от интенсивности источников поступления углеводородов, миграционных возможностей системы разломов и термодинамики региона. Наблюдаемые расчётные периоды циклов — порядка 50 – 100 лет вполне соответствуют циклу возможного притока углеводородов на выработанных "старых месторождениях особенно приуроченных к зонам разломов, что и наблюдают по целому ряду месторождений (см. рис 1.).

ГРАВИТАЦИОННО-РЕВЕРСИВНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

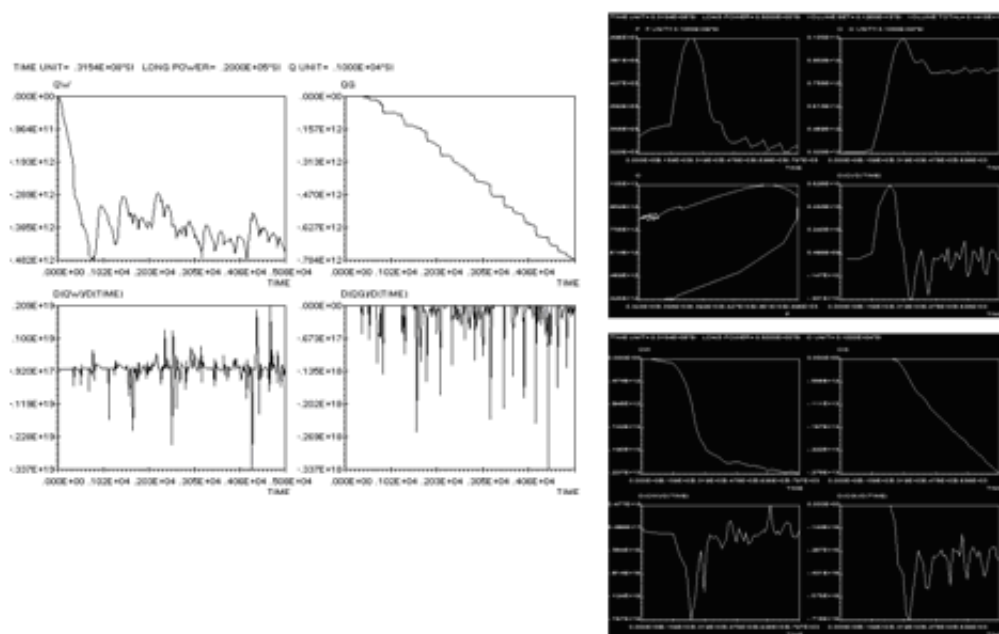


Рис.1

4. Заключение

Из приведённых рассуждений и вычислительных экспериментов математического моделирования напрашиваются аналогии с современными данными о спорадических выбросах метана, взрывах и пожарах в шахтах, приводящих к гибели людей.

Эти результаты могут быть также применены для интерпретации и анализа периодических выбросов газа, сопровождающихся пожарами, например, на торфяных залежах подмосковного региона.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 11-01-00444-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриевский А. Н., Каракин А. В., Баланюк И. Е., "Математическое моделирование пластовых систем", *Докл. РАН.*, **374**:4 (2000), 534–536.

2. Каракин А. В., Идармачев Ш. Г., Асманов А. А., “Фильтрационная модель сезонных изменений сейсмического режима района Чиркейского водохранилища”, *Физика Земли*, 1990, № 6, 20–27.
3. Николаевский В. Н., *Геомеханика и флюидодинамика*, Недра, М., 1996, 447 с.
4. Самарский А. А., Колдоба А. В., Повещенко Ю. А. и др., *Разностные схемы на нерегулярных сетках*, Минск, 1996, 273 с.

Dynamic fluid model of self-oscillatory processes

© L.V Klochkova⁴, J.A. Poveschenko⁵, V.F. Tishkin⁶

Abstract. Various models of dynamic hydro-carbonic fluids behavior in the porous environments consisting of diverse geological structures in which there are self-oscillatory processes are considered.

Key Words: geo-mechanical models, dynamic processes, hydro-carbonic fluids, fields, mathematical modeling, self-oscillatory processes.

⁴Senior Researcher of the Institute of applied mathematics by name M.V.Keldysh of RAS, Moscow; klud@imamod.ru.

⁵Senior Researcher Officer of the Institute of applied mathematics by name M.V.Keldysh of RAS, Moscow; poveshchenko@keldysh.ru.

⁶Deputy Director of the Institute of applied mathematics by name M.V.Keldysh of RAS, Moscow; tishkin@imamod.ru.