

УДК 51.7:532.546

# Математическое моделирование автоколебательных режимов формирования месторождений нефти и газа

© Г. И. Казакевич<sup>1</sup>, Л. В. Клочкова<sup>2</sup>, Ю. А. Повещенко<sup>3</sup>, В.Ф. Тишкин<sup>4</sup>

**Аннотация.** Численное моделирование движения флюидов при формировании залежей углеводородов позволило исследовать сложные автоколебательные режимы этого процесса. В данной работе излагаются результаты вычислительных экспериментов для этих режимов, проведенных на основании эмпирических данных по ряду регионов, и сделанное на этом основании заключение об их характерных свойствах.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, автоколебательные процессы, формирование залежей углеводородов.

## 1. Введение

Численное моделирование движения флюидов при формировании залежей углеводородов позволило выявить сложные автоколебательные режимы этого процесса ([1]–[3]). В данной работе излагаются результаты дальнейшего вычислительного анализа этих режимов, проведенного для ряда регионов, и сделанное на этом основании выявление их характерных свойств. Согласно современным представлениям, формирование месторождений углеводородов происходит в результате взаимодействия ряда процессов, каждый из которых обладает своим пространственно–временным масштабом. Одним из таких процессов является вторичная миграция нефти и газа, то есть их фильтрация в пластах, которая — при наличии соответствующих геологических условий — может приводить к образованию месторождений.

## 2. Математическая модель движения флюидов

Для описания движения жидкостей и газов в пористой среде в работе использованы уравнения фильтрации в предположении выполнения закона Дарси, не смешиваемости фаз (например, газ–вода), изотермичности и при пренебрежении капиллярными силами. В двухфазном случае эти уравнения имеют вид [4]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (m\rho_w S_w) &= \operatorname{div} \left[ (kK_{rw}\rho_w/\mu_w) \left( \operatorname{grad} P - g\rho_w \tilde{k} \right) \right] - q_w \\ \frac{\partial}{\partial t} (m\rho_g(1 - S_w)) &= \operatorname{div} \left[ (kK_{rg}\rho_g/\mu_g) \left( \operatorname{grad} P - g\rho_g \tilde{k} \right) \right] - q_g. \end{aligned}$$

Здесь  $\vec{r}$  — радиус–вектор,  $g$  — ускорение силы тяжести,  $\tilde{k}$  — орт, направленный вертикально вниз,  $P$  — давление,  $S_w$  — насыщенность водой,  $q_w$  и  $q_g$  — массовые расходы

<sup>1</sup> Старший научный сотрудник Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва; gkazakevich@yandex.ru.

<sup>2</sup> Старший научный сотрудник Института прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, г. Москва; klud@imamod.ru.

<sup>3</sup> Ведущий научный сотрудник Института прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, г. Москва; poveshchenko@keldysh.ru.

<sup>4</sup> Заместитель директора Института прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, г. Москва; tishkin@imamod.ru.

воды и газа на единицу объема пласта в единицу времени,  $k(\vec{r})$  — тензор абсолютной проницаемости,  $K_{rw}(S_W)$  и  $K_{rg}(S_W)$  — фазовые проницаемости воды и газа соответственно,  $\mu_w(P)$ ,  $\mu_g(P)$  — динамические вязкости флюидов,  $m(\vec{r}, P)$  — пористость пласта,  $\rho_w(P)$ ,  $\rho_g(P)$  — плотности флюидов.

Это сложная система нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. По одной из переменных — давлению — она обладает свойствами, близкими к уравнениям параболического типа, по другой — насыщенности — гиперболическими свойствами, в том числе — образованием поверхностей разрыва — скачков насыщенности [5].

Область, в которой решается система, обычно обладает высокой степенью неоднородности, состоит из слоев с различными коллекторными свойствами (пористостью, проницаемостью), разрывными нарушениями, литологическими неоднородностями и другими особенностями, усложняющими как сами фильтрационные процессы, так и их численное моделирование. Для изучения подобных задач большие возможности предоставляет метод опорных операторов, позволяющий использовать неструктурированную сетку с ячейками, размеры которых могут отличаться на несколько порядков [6]. Применение его к задачам фильтрации было начато в работах [7],[8].

При численном исследовании этим методом выяснилось, что в задачах, соответствующих процессам миграции углеводородов при образовании месторождений, могут возникать автоколебательные гравитационно-реверсивные режимы. Характерный цикл протекает следующим образом: давление накопившегося газа под плохо проницаемой крышкой в некоторый момент времени может превысить некоторое критическое значение. Тогда происходит прорыв газа, причем, если это критическое давление ниже предела прочности породы, то прорыв происходит не в результате образования трещин, а вследствие быстрого продвижения газа через участок с плохими коллекторными свойствами вследствие фильтрационной неустойчивости. Газ устремляется вверх, давление в данной области падает, возникает депрессионная воронка, что вызывает новый приток газа — до следующего достижения критического давления. В результате неравномерного продвижения газа может произойти защемление части пластовой воды в насыщенной газом области [1] и наоборот — появление довольно крупных насыщенных газом объемов в зонах, не связанных ни с каким типом ловушек. Эти «газовые пузыри» могут возникать, существовать длительное время в пульсирующем режиме, мигрировать и исчезать [9]. В них могут быть заключены достаточно крупные, промышленно значимые запасы газа. А защемленная в насыщенной газом области вода может приводить к осложнениям при бурении скважин, при разработке месторождений, при определении флюидодинамической структуры региона.

### 3. Результаты вычислительных экспериментов, проведенных на основании эмпирических данных по ряду регионов

В процессе расчета автоколебательных режимов миграции выяснилось, что в фильтрационном потоке возникают зоны резких изменений свойств течения. Это могут быть области повышенной концентрации углеводородов, соответствующие месторождениям, зоны прорыва газа в виде струйных потоков с достаточно небольшим поперечным сечением струи. Поэтому для более детального исследования необходимо проводить повторные расчеты с измельчением сетки именно в этих областях. Программы автоматического локального измельчения сетки также включены в разработанную вычислительную систему.

Математическое моделирование вторичной миграции углеводородов было проведено для целого ряда регионов различного происхождения и геологического строения. Основные свойства автоколебательных процессов были примерно одинаковы, но численное экс-

периментирование с варьированием ряда параметров позволило оценить влияние геологических особенностей региона и скоростей поступления углеводородов. История развития многих осадочных бассейнов приводит к образованию в некоторых участках зон с очень высокой проницаемостью, трещиноватостью. Например, в Лено-Вилюйском регионе — это зона поддвига литосферных плит. В других регионах подобные зоны могут быть связаны со сдвиговыми нарушениями разных типов, солянокупольной тектоникой и т.д. Расчеты показали, что при достаточно высоких темпах поступления углеводородов в регион интенсивность вертикальных течений будет намного превосходить горизонтальные, критические давления будут достигаться достаточно быстро — и колебательный характер процесса будет резко выраженным. При более медленном поступлении углеводородов усилится роль участков с повышенной проницаемостью, куда начнет устремляться значительная часть газа. В результате такого перераспределения фильтрационных потоков критическое давление будет достигаться медленнее, и зависимость периода колебаний от скорости поступления углеводородов будет иметь нелинейный характер и представляться выпуклой возрастающей функцией. А при достаточно медленных процессах возможен и уход всего газа через высокопроницаемые участки.

Согласно современным представлениям процесс генерации углеводородов и их поступления в осадочные бассейны также имеет автоколебательный характер. Механизмы этих колебаний сейчас дискутируются, но общее представление таково: есть периоды медленно-го поступления углеводородов в осадочный бассейн, а есть периоды быстрого их прорыва. Таким образом, для одного и того же региона в зависимости от того, на какой стадии процесса первичной миграции он находится, будет меняться и характер вторичной миграции, периоды колебаний, направление движения углеводородов. Следовательно, сложный нелинейный автоколебательный режим движения флюидов в осадочном пласте является важным элементом общей системы процессов массо- и теплообмена в коре и верхней мантии.

Проведение серии расчетов фильтрации в данном регионе при различных скоростях поступления углеводородов дает возможность ретроспективного анализа поведения флюидодинамической системы в прошлом, а также получение прогнозных оценок с учетом характерных периодов циклов разного масштаба, связанных с тектоническими, гидродинамическими, геохимическими и другими факторами. Проведение подобных расчетов может позволить построить бифуркационную диаграмму системы, определяющую области устойчивости и неустойчивости, смену режима течения. А сравнение с имеющейся геологической, геофизической, геохимической, промысловой информацией поможет определить, на каком этапе цикла находится исследуемый регион, где можно искать промышленные скопления газа; где могут находиться заземленные водонасыщенные области. Оно также позволит спрогнозировать опасность возникновения неустойчивости и резкой перестройки структуры флюидодинамической системы, способных привести к крупным выбросам углеводородов — или, наоборот — их уходу в нижележащие горизонты, к катастрофическому обводнению ряда скважин и т.д. — т.е. к тяжёлым экологическим и экономическим последствиям. Чтобы этого избежать, необходимо в подобных регионах проводить проектирование разработки месторождений углеводородов с учётом не стационарности фонового гидродинамического режима.

#### 4. Заключение

Дальнейшее исследование нелинейных режимов миграции углеводородов должно включать учет капиллярных эффектов, растворенного газа, температурных эффектов,

многофазности, многокомпонентности, физико–химических превращений и т.д. Разработанные численные схемы на базе метода опорных операторов позволяют провести исследование этих явлений в рамках единой вычислительной системы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казакевич Г. И., Минервина Е. А., Повещенко Ю. А., “Миграция углеводородов в процессе формирования месторождений: численное моделирование нелинейных эффектов”, *Докл. РАН.*, **383**:1 (2002), 103–105.
2. Казакевич Г. И., Повещенко Ю. А., “Автоколебательные режимы формирования месторождений нефти и газа”, *Эволюция Вселенной и общие законы строения материи.*, Материалы Международной научной конференции (Москва, 2003), 57-59.
3. Клочкова Л. В., Повещенко Ю. А., Тишкин В. Ф., “Флюидодинамическая модель автоколебательных процессов”, *Журнал Средневолжского математического общества*, **14**:2 (2012).
4. Азиз Х., Сеттари Э., *Математическое моделирование пластовых систем*, Недра, М., 1982, 407 с.
5. Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М., *Движение жидкостей и газов в природных пластах*, Недра, М., 1984.
6. Самарский А. А., Колдоба А. В., Повещенко Ю. А., Тишкин В. Ф., Фаворский А. П., *Разностные схемы на нерегулярных сетках*, Минск, 1996, 273 с.
7. Дмитриевский А. Н., Лобковский Л. И., Казакевич Г. И., Повещенко Ю. А. и др., “Численное моделирование движения флюидов в процессе формирования залежей углеводородов на примере Предверхоаянского прогиба”, *Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений*, 1995, № 7, 2–6.
8. Казакевич Г. И., Лобковский Л. И., Пергамент А. Х., Повещенко Ю. А. и др., “Математическое моделирование процессов фильтрации углеводородов в осадочных бассейнах”, *ДАН*, **352**:4 (1997), 527–531.
9. Казакевич Г. И., Повещенко Ю. А., “Нелинейные эффекты двухфазной фильтрации при образовании месторождений углеводородов”, *Материалы Международной конференции "Современное состояние наук о Земле посвященной памяти В.Е. Хаина* (Москва), 2011, 802.

---

# Mathematical modelling of self-oscillatory oil and gas fields formation modes

© G.I. Kazakevich<sup>5</sup>, L.V Klochkova<sup>6</sup>, J.A. Poveschenko<sup>7</sup>, V.F. Tishkin<sup>8</sup>

**Abstract.** Numerical modeling of fluids movement at formation of hydrocarbons deposits allowed study composite self-oscillatory modes of this process. In this work results of computing experiments for these modes which have been carried out on the basis of empirical data on a number of regions, and made on this basis the conclusion about their characteristic properties are stated.

**Key Words:** mathematical modeling, self-oscillating, the formation of deposits hydrocarbons.

---

<sup>5</sup> Senior Researcher of the Institute of oceanology by name P.P.Shirshov of RAS, Moscow; gkazakevich@yandex.ru.

<sup>6</sup> Senior Researcher of the Institute of applied mathematics by name M.V.Keldysh of RAS, Moscow; klud@imamod.ru.

<sup>7</sup> Senior Researcher Officer of the Institute of applied mathematics by name M.V.Keldysh of RAS, Moscow; poveschenko@keldysh.ru.

<sup>8</sup> Deputy Director of the Institute of applied mathematics by name M.V.Keldysh of RAS, Moscow; tishkin@imamod.ru.