

УДК 550.31

ЭВОЛЮЦИЯ СКОРОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ПОРОВОГО ФЛЮИДА В ПРОЦЕССЕ НАКОПЛЕНИЯ И УПЛОТНЕНИЯ ОСАДКОВ

© 2010 г. Е.И. Суетнова

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Методами математического моделирования исследуется эволюция скорости фильтрации порового флюида в ходе накопления и уплотнения осадков. Математическая модель описывает процесс фильтрации при вязкоупругом уплотнении пористой среды, наращиваемой при осадконакоплении. Модельные расчеты иллюстрируют эволюцию скорости фильтрации порового флюида во времени и по осадочной колонке. Показано, что эволюция скорости фильтрации определяется значениями чисел подобия управляющей системы уравнений для задачи фильтрации при вязкоупругом уплотнении наращиваемого пористого насыщенного слоя.

Ключевые слова: фильтрация, уплотнение, математическое моделирование, вязкоупругость.

Введение

Фильтрация насыщающих флюидов в ходе накопления и уплотнения осадков играет важную роль в процессе прогрева накапливающихся осадков [Bethke, 1985; Суетнова, 2005]. Процесс фильтрации порового флюида при накоплении и уплотнении осадков обеспечивает в течение геологической истории осадочных структур земной коры перенос растворимых примесей в термобарические зоны их осаждения и аккумуляции [Файф, Прайс, Томпсон, 1981; Hyndman, Davis, 1992]. Кроме того, процесс фильтрации, определяя флюидонасыщенность и эффективное давление, влияет на механические свойства осадочных структур [Gueguen, Palciauskas, 1994]. Из этого вытекает необходимость количественного изучения эволюции фильтрации поровых флюидов в ходе формирования осадочных слоев. В работе представлены результаты численного моделирования фильтрации насыщающих флюидов в процессе накопления и уплотнения осадков вязкоупругой реологии.

Математическая модель

При накоплении и уплотнении осадков фильтрация поровых флюидов определяется градиентом порового давления и проницаемостью осадков. Но и формирующийся градиент порового давления, и проницаемость осадков зависят от процесса уплотнения осадков, а сам процесс определяется реологическими, физическими и флюидодинамическими свойствами накапливающихся осадков и скоростью их накопления [Suetnova, Vasseur, 2000]. Это означает, что процессы фильтрации поровых флюидов и уплотнения взаимосвязаны. Существующая взаимосвязь описывается нелинейной системой дифференциальных уравнений в частных производных [Suetnova, Vasseur, 2000]. Течение флюида в пористой деформируемой среде осадков описывается уравнениями неразрывности для флюида и матрицы, уравнением Дарси, определяющим движение флюида относительно матрицы, уравнением движения матрицы, а также и реологическим соотношением [Suetnova, Vasseur, 2000]. Течение развивается в области, которая вследствие

осадконакопления растет со временем. Характер роста определяется граничными условиями; система определяющих уравнений имеет вид:

$$\frac{\partial \rho_f m}{\partial t} + \nabla(V_f m \rho_f) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_s (1-m)}{\partial t} + \nabla(V_s (1-m) \rho_s) = 0, \quad (2)$$

$$V_f - V_s = -\frac{k}{\mu m} (\nabla p_f + \rho_f \vec{g}). \quad (3)$$

В рамках модифицированного с учетом принципа эффективного напряжения Био-Терцаги для пористой среды, вязкоупругого максвелловского реологического закона, динамическое соотношение для напряжения, деформации и скорости деформации записывается как:

$$\frac{dm}{(1-m)dt} = -\frac{m}{\eta} p_e - m\beta \frac{dp_e}{dt}. \quad (4)$$

В системе уравнений (1)–(4) p_f и V_f – давление и скорость порового флюида; V_s – скорость матрицы осадков; t – время; m – пористость; ρ_f – плотность флюида; ρ_s – плотность осадков; k – проницаемость ($k = k_0 m^l$; $l=3$); μ – вязкость флюида; \vec{g} – ускорение силы тяжести; ρ – плотность осадочной среды; p_e – эффективное давление, $p_e = p_{tot} - p_f$ (p_{tot} – полное давление); η – вязкость осадков [Stevenson, Scott 1991]; β – эффективная сжимаемость среды (в силу предположения вязкоупругой реологии пористой среды β характеризует сжимаемость пор [Gueguen, Palciauskas, 1994]). Предположив, что осадконакопление по поверхности однородно, а верхняя и нижняя границы осадочной толщи горизонтальны, систему можно решать в одномерной постановке в силу того, что горизонтальные размеры осадочных бассейнов, как правило, на порядок больше вертикальных.

Система (1)–(4) становится полной и замкнутой после формулировки следующих граничных условий (без потери общности рассматривается скомпенсированное осадконакопление): на нижней (непроницаемой) границе осадков $y = b(t)$; скорости твердой (V_s) и жидкой (V_f) фаз равны скорости погружения основания (V_0). На верхней границе (дренажной) пористость постоянна – $m(y=0, t) = m_b$, а эффективное давление $p_e = 0$.

Для построения и исследования решений был произведен переход в систему координат, движущуюся со скоростью погружения основания осадков, выполнены замена переменных ($z = V_0 t - y$), процедура масштабирования и приведения к безразмерному виду переменных и коэффициентов, необходимая для выявления параметров подобия [Баренблат, 1982; Седов, 1977]. Масштабом длины является $L = \sqrt{\frac{\eta_0 k_0 m_b^{(l-1)}}{\mu}}$, масштабом

времени – $T = \frac{\eta_0}{\rho m_b}$, пористости – m_b . Масштабы давления и скорости записываются

как $P = \Delta \rho g L$, $V_1 = L/T$ [Suetnova, Vasseur, 2000; Суетнова, 2010].

В безразмерных переменных в одномерной формулировке и после перехода в движущуюся систему координат задача представляется в виде следующей системы

$$\frac{dm'}{dt'} = (\alpha - m') \frac{\partial V'_s}{\partial z'}, \quad (5)$$

$$V'_s = -m'^l \left(\frac{\partial p'_e}{\partial z'} + 1 \right), \quad (6)$$

$$m'D \frac{dp'_e}{dt'} = -\frac{m'}{\eta'} p'_e - \frac{\partial V'_s}{\partial z'}, \quad (7)$$

$$m'V'_f = -V'_s(\alpha - m'). \quad (8)$$

Здесь m' , V'_s , V'_f и p'_e – безразмерные неизвестные, $\alpha = 1/m_b$, $\eta' = \eta/\eta_0$, $D = \beta P m_b = \eta_0 \beta / T$ – безразмерные коэффициенты.

Граничные условия записываются как

$$\begin{aligned} V'_s((z' = 0), t') &= 0, \\ p'_e((z' = h'(t')), t') &= 0, \\ m'((z' = h'(t')), t') &= 1. \end{aligned}$$

Величина безразмерной скорости движения верхней границы области в случае скомпенсированного осадконакопления $V'_0 = V_0/(L/T)$. Безразмерные параметры α , $V'_0 = V$ и D являются нетривиальными критериями подобия сформулированной системы уравнений [Суетнова, 2010]. Таким образом, система уравнений (1)–(4), описывающая в размерном виде процесс уплотнения при накоплении осадков в зависимости от скорости их накопления и физических, реологических и флюидодинамических свойств, преобразована в эквивалентную систему (5)–(8), описывающую зависимость режимов уплотнения от сформулированных безразмерных характеристических критериев подобия системы.

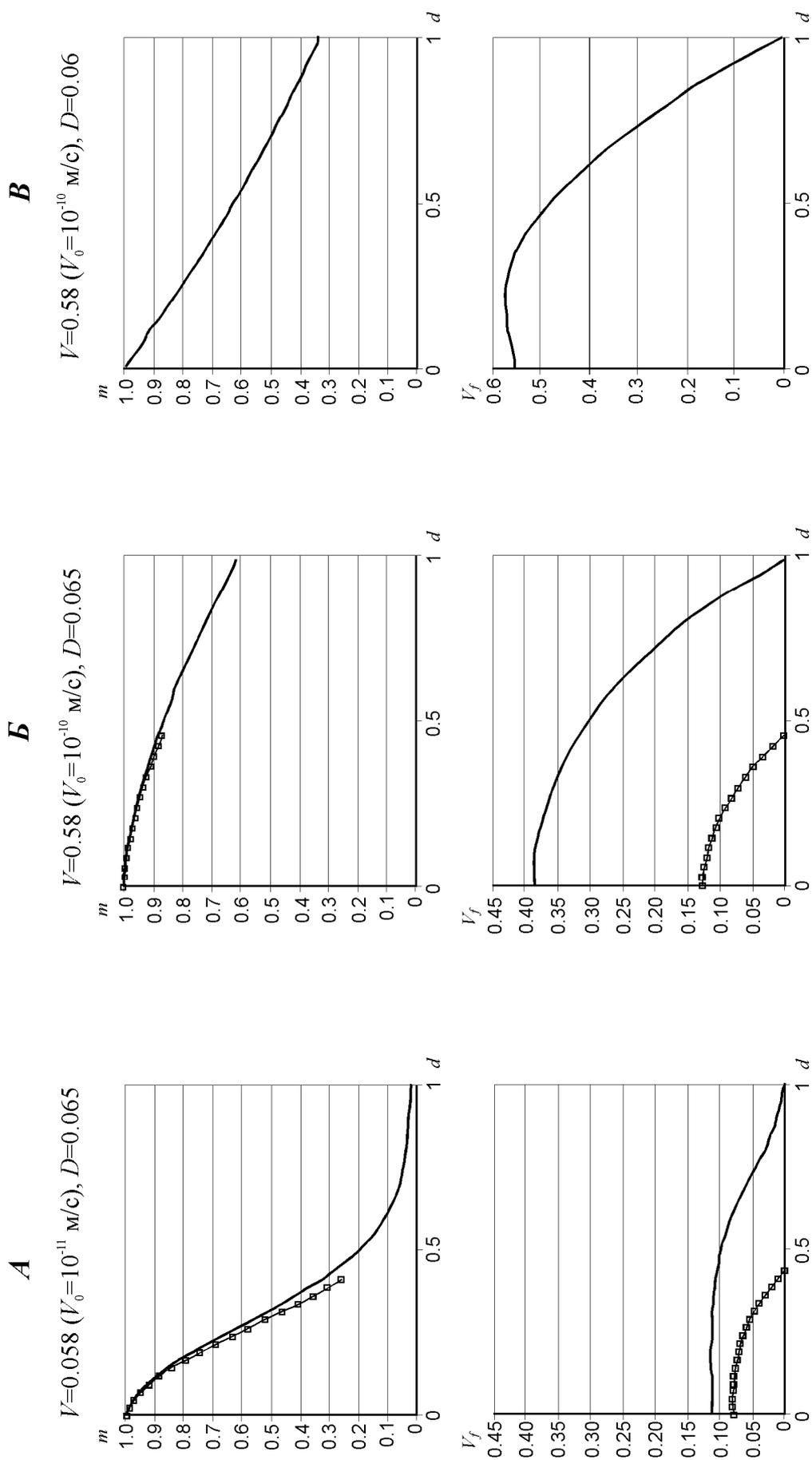
Флюидодинамический критерий V характеризует отношение скорости роста мощности осадков к скорости флюидизации; реологический критерий D характеризует отношение времени релаксации Максвелла к масштабу времени задачи, то есть является безразмерным временем релаксации.

Численное решение и обсуждение результатов

Для решения полученной нелинейной системы уравнений в частных производных в области с движущейся границей была написана программа для персонального компьютера. Численно система уравнений (5)–(8) решалась модифицированным методом конечных разностей [Suetnova, Vasseur, 2000]. Алгоритм решения задачи в наращиваемой области был построен по полунявной схеме с контролем переменного шага по времени [Флетчер, 1991; Press et al., 1992], обновлением сетки в соответствии с ее уплотнением на каждом шаге по времени, наращиванием элементов сетки в соответствии с дискретной аппроксимацией скорости роста области и контролем устойчивости [Флетчер, 1991; Press et al., 1992]. Разработанный метод решения ранее был использован для моделирования процессов уплотнения, расчетов скоростей этих процессов и распределения эффективных напряжений в уплотняющихся осадках в зависимости от их физических и транспортных свойств и скоростей аккумуляции [Суетнова, 2008]. Программа численного решения задачи уплотнения дополнена вычислениями скоростей фильтрации насыщающего флюида на основе взаимозависимости скоростей фильтрации и матрицы осадков (уравнение (8)).

Результаты модельных расчетов эволюции скорости фильтрации и пористости в процессе накопления и уплотнения осадков представлены на рисунке. Расчеты выполнены для следующих вариантов параметров осадконакопления: репрезентативные значения свойств поступающих осадков $\eta = 5 \cdot 10^{21}$ Па·с, $k_0 = 10^{-15}$ м², $m_b = 0.3$, $\beta = 1/K_p = 10^{-9}$ Па⁻¹ (для варианта В параметр упругости $\beta = 10^{-8}$ Па⁻¹); скорость осадконакопления $V_0 = 10^{-11}$ (для варианта В $V_0 = 10^{-10}$ м/с); финальная мощность слоя 6000 м.

Приведенные входные параметры дают следующие значения характеристических чисел: $V = 0.058$ и $D = 0.065$ (фрагмент А) и $V = 0.58$ и $D = 0.065$ (фрагмент Б). Графики представлены в безразмерном виде, для удобства сравнения расстояние от поверхности



Распределение пористости m и скорости фильтрации порового флюида V_f по глубине d при разных значениях характеристических чисел V и D
 А – сплошная линия – $t=7,7$, с квадратами – $t=3.94$; Б – сплошная линия – $t=0.77$, с квадратами – $t=0.38$; В – $t=0.77$

осадков нормировано на значение финальной мощности осадков. Приведены результаты для двух моментов истории процесса – момента формирования осадочного слоя мощностью 6000 м и предыдущего момента, когда мощность осадков составляла около половины финальной мощности слоя. Соответствующее безразмерное время процесса накопления составляет $t=7.7$ (см. фрагмент *A*) и $t=0.77$ (см. фрагмент *B*). Можно видеть, что в обоих случаях скорость фильтрации непостоянна по осадочной колонке и каждый из графиков демонстрирует рост скорости фильтрации со временем. При этом как распределение скорости фильтрации по глубине, так и изменение скорости во времени существенно нелинейны. Наглядно прослеживается различие в градиентах падения пористости по глубине в зависимости от значения критериев подобия.

Сравнение результатов модельных расчетов, приведенных на фрагментах *A* и *B*, показывает, что скорость фильтрации насыщающего осадки флюида зависит от значения флюидодинамического критерия V . Кроме того, результаты расчетов наглядно демонстрирует зависимость от времени и процесса уплотнения осадков, и фильтрации насыщающих осадки флюидов.

Действительно, для случая, представленного на фрагменте *A*, время формирования осадочного слоя мощностью 6000 м составляет $t=7.7$, а для случая, иллюстрируемого фрагментом *B*, время формирования осадочного слоя той же мощности составляет $t=0.77$. Скорость фильтрации увеличивается со временем, что также хорошо видно на представленных графиках.

На фрагменте *B* приведены результаты расчетов пористости и скорости фильтрации флюида для тех же входящих параметров, что и для фрагмента *B*, за исключением β , изменяющего значение реологического критерия D – при принятом $\beta=10^{-8}$ Па⁻¹ в этом случае $D=0.65$.

Сравнение графиков, приведенных на первых двух фрагментах (*A*, *B*), с графиками на фрагменте *B* явно свидетельствует о влиянии параметра β на эволюцию скорости порового флюида и пористости в процессе накопления и уплотнения осадков.

Выводы

Результаты моделирования, приведенные выше, показывают, что в прикладных исследованиях, использующих оценки скорости фильтрации для расчетов переноса растворимых примесей [Hyndman, Davis, 1992; Davie, Buffet, 2001] необходим учет эволюции скорости фильтрации во времени и ее распределение по глубине.

Анализ результатов расчетов позволяет сформулировать следующие закономерности эволюции скорости фильтрации в процессе вязкоупругого уплотнения накапливающихся осадков, выявленные при моделировании в рамках репрезентативных значений параметров осадконакопления:

- скорость фильтрации порового флюида в процессе накопления и уплотнения осадков нелинейно зависит от времени, то есть от возраста осадочной структуры;
- скорость фильтрации при накоплении и уплотнении осадков не постоянна по осадочной колонке;
- скорость фильтрации зависит от параметров осадконакопления, сгруппированных в характеристические параметры подобия системы уравнений, описывающей процесс уплотнения.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-05-01094).

Литература

- Баренблат Г.И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 255 с.
- Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977. 447 с.
- Суетнова Е.И. Влияние уплотнения осадков и фильтрации поровых флюидов на тепловой режим осадочных бассейнов // Физика Земли. 2005. № 12. С.53–57.
- Суетнова Е.И. Математическое моделирование эволюции вязкоупругих напряжений и деформаций при росте мощности осадков. Анализ возможных спектров реализаций процесса уплотнения в зависимости от значений характеристических параметров подобия // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Тезисы докладов Всероссийской конференции. М.: ИФЗ РАН, 2008. Т. 1. С.177–179.
- Суетнова Е.И. Влияние флюидодинамических и реологических свойств осадков на процесс вязкоупругого уплотнения при различных скоростях осадконакопления // Физика Земли. 2010. № 6. С.72–79.
- Файф У., Прайс Н., Томпсон А. Флюиды в земной коре. М.: Мир, 1981. 436 с.
- Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.: Мир, 1991. Т. 1. 502 с.
- Bethke C.M. A Numerical Model of Compaction-Driven Groundwater Flow and Heat Transfer and Its Application to the Paleohydrology of Intracratonic Sedimentary Basins // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P.6817–6828.
- Davie M.K., Buffet B.A. A Numerical Model for the Formation of Gas Hydrate below the Seafloor // J. Geophys. Res. 2001. V. 106 (B1). P.497–514.
- Gueguen Y., Palciauskas V. Introduction to the Physics of Rocks. Princeton Univ. Press, 1994. 392 p.
- Hyndman R.D., Davis E.E. A mechanism for the formation of methane hydrate and seafloor bottom simulating reflectors by vertical fluid expulsion // J. Geophys. Res. 1992. V. 97 (B5). P.6683–7041.
- Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. Numerical Recipes in Fortran77. The Art of Scientific Computing. Second Edition. Cambridge University Press, 1992. 933 p.
- Stevenson D.J., Scott D.R. Mechanics of fluid-rock systems // Annu. Rev. Fluid Mec. 1991. V. 23. P.305–339.
- Suetnova E.I., Vasseur G. 1-D modelling rock compaction in sedimentary basin using visco-elastic rheology // Earth Planet. Sci. Lett. 2000. V. 178. P.373–383.

Сведения об авторе

СУЕТНОВА Елена Ивановна – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: 499-254-92-95. E-mail: elena_suetnova@mail.ru

EVOLUTION OF POROUS FLUID FILTRATION RATE DURING SEDIMENTATION AND COMPACTION

E.I. Suetnova

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Mathematical model of porous flow evolution during accumulation and visco-elastic compaction of sediments is presented. The evolutions of porous flow through time and depth are illustrated numerically. Model calculations show that the fluid flow evolution depends on the values of similarity numbers, which characterized the system of visco-elastic compaction equations.

Keywords: filtration, compaction, mathematical modeling, visco-elasticity.