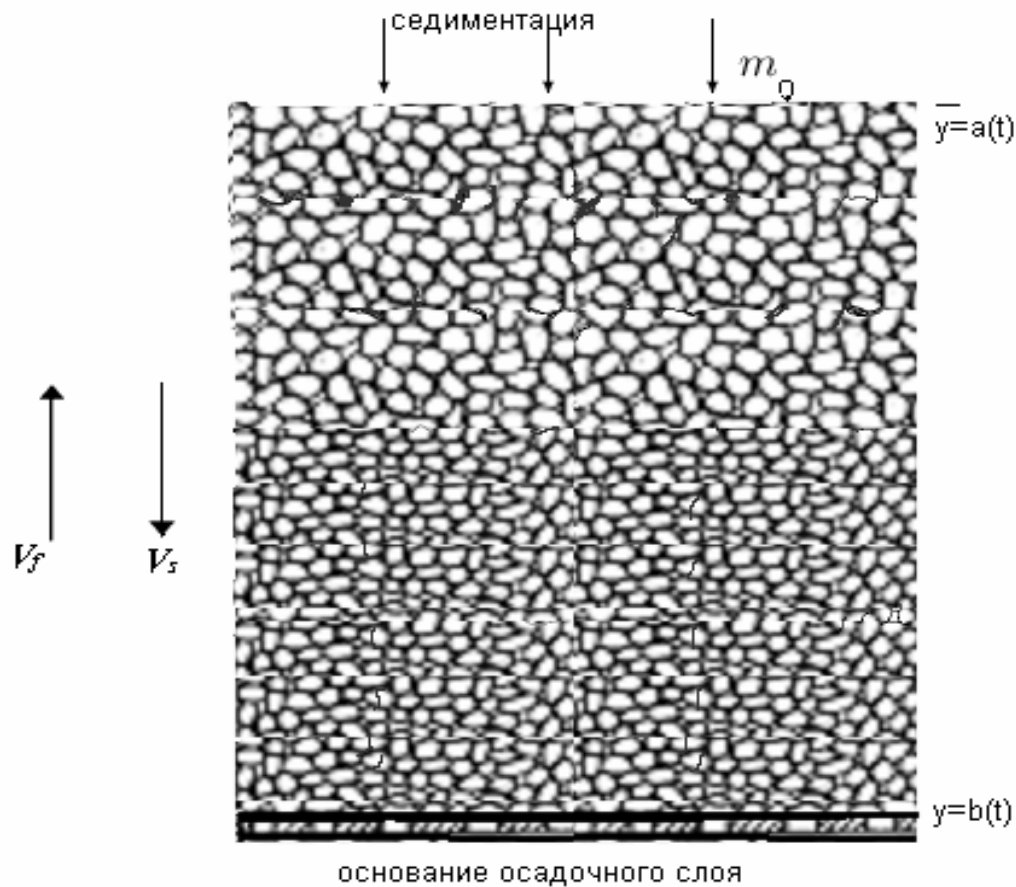


**Влияние интенсивности
осадконакопления и
механических и реологических
свойств осадков на скорость
их уплотнения и скорость
фильтрации насыщающих
флюидов в оффшорных зонах.**

Суетнова Е.И.

Условная схема, иллюстрирующая образование осадочного слоя в течение геологической истории осадконакопления.



Стрелками показаны направления осадконакопления и скоростей движения матрицы осадков и фильтрации насыщающего флюида.

СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ МОДЕЛИ

$$(2.1.1) \quad \frac{\partial \rho_f m}{\partial t} + \frac{\partial \rho_f V_f m}{\partial y} = 0$$

$$(2.1.2) \quad \frac{\partial \rho_s (1-m)}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s V_s (1-m)}{\partial y} = 0$$

$$(2.1.3) \quad V_f - V_s = -\frac{k}{\mu m} \left(\frac{\partial p_f}{\partial y} + \rho_f g \right)$$

$$(2.1.4) \quad \frac{dm}{(1-m)dt} = -\frac{m}{\eta} p_e - m\beta \frac{dp_e}{dt}$$

$$(2.1.5) \quad \frac{\partial f}{\partial t} + A_1 \frac{\partial m V_f f}{\partial y} + A_2 \frac{\partial (1-m) V_s f}{\partial y} = \kappa \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$$

V_s скорость матрицы осадков,
 t время,
 y координата глубины,
 m пористость,
 ρ_f плотность флюида,
 C_f теплоемкость флюида,
 ρ_s плотность осадков,
 C_s теплоемкость осадков,
 k проницаемость,
 μ вязкость флюида,
 g ускорение силы тяжести,
 ρ плотность осадочной среды,
 f температура,
 κ температуропроводность среды осадков,
 C теплоемкость среды осадков
 p_e эффективное давление
 $p_e = p_{tot} - p_f$, (p_{tot} -полное давление),
 η вязкость среды осадков [Stevenson, Scott, 1991; Birchwood and Turcotte, 1994]
 β эффективная поросжимаемость при монотонной нагрузке [Gueguen, Palciauskas, 1994; Николаевский, Басниев, Горбунов, Зотов, 1970; Баренблатт, Ентов, Рыжик, 1984]

Граничные условия и параметры

Нижняя,

непроницаемая граница осадков $y = b(t)$,

$$V_s = V_1$$

$$V_f = V_1$$

V_1 , - скорость погружения основания.

Верхняя граница дренажная

$$m((y=0), t) = m_b = m_0$$

эффективное давление $p_e = 0$.

Температура на поверхности осадков поддерживается постоянной, и на нижней границе задается градиент температуры

Скорость погружения основания, V_1 оценивается как

$$10^{-10} - 10^{-12} \text{ м/сек}$$

Проницаемость, по экспериментальным наблюдениям - нелинейная функция пористости, обычно в моделях рассматривается как степенная функция пористости

$$k = k_0 \cdot m^l$$

, $l=2; 3$. Величина k_0 зависит от типа осадков.

Экспериментальные значения проницаемости для осадков могут варьировать в диапазоне

$$10^{-12} - 10^{-20} \text{ м}^2$$

Вязкость осадочной среды, принимается не зависящей от температуры и давления на масштабах исследуемых глубин и варьируется в диапазоне

$$10^{20} - 10^{22} \text{ Па с.}$$

[Birchwood, Turcott 1994; Schneider, Potdevin, Wolf, Faille, 1996].

Параметр β эффективная поросжимаемость оценивается как

$$10^{10} - 10^8 \text{ Па}^{-1}$$

[Hart and Wang, 1995; Berryman, 1992 ; Баренблатт, Ентов, Рыжик, 1984].

Масштабирование

В безразмерных переменных и после перехода в движущуюся систему координат задача (2.1.1-2.1.3) записывается как

$$V'_s = -m'^l \left(\frac{\partial p'_e}{\partial z'} + 1 \right) \quad (2.2.6)$$

$$\frac{dm'}{dt'} = (\alpha - m') \frac{\partial V'_s}{\partial z'} \quad (2.2.7)$$

$$m'D \frac{dp'_e}{dt'} = -\frac{m'}{\eta'} p'_e - \frac{\partial V'_s}{\partial z'} \quad (2.2.8)$$

m' , V'_s и p'_e - безразмерные неизвестные
 $\alpha = 1/m_b$.

Граничные условия

$$V'_0(z \leftarrow 0, t) = 0; \quad p'(z \leftarrow h'(t), t) = 0; \quad m'(z \leftarrow h'(t), t) = 1 \quad (2.2.9)$$

$h'(t)$ координата верхней границы в новых переменных.

Скорость движения верхней границы области

$$V_0 \leftarrow V_0 / (L/T) = V.$$

• Процедура масштабирования переменных и коэффициентов.

$$\text{Масштаб длины} \quad L = \sqrt{\frac{\eta_0 k_0 m_b^{(l-1)}}{\mu}}$$

Масштабом пористости является $m_b = m_0$

Масштаб давления $P = \Delta \rho g L$

$$\text{Масштаб времени} \quad T = \frac{\eta_0}{P m_b}$$

Масштаб скорости L/T

$$D = \beta \eta_0 / T$$

Результаты расчетов распределения пористости и порового давления по глубине в различные моменты времени формирования осадочного слоя

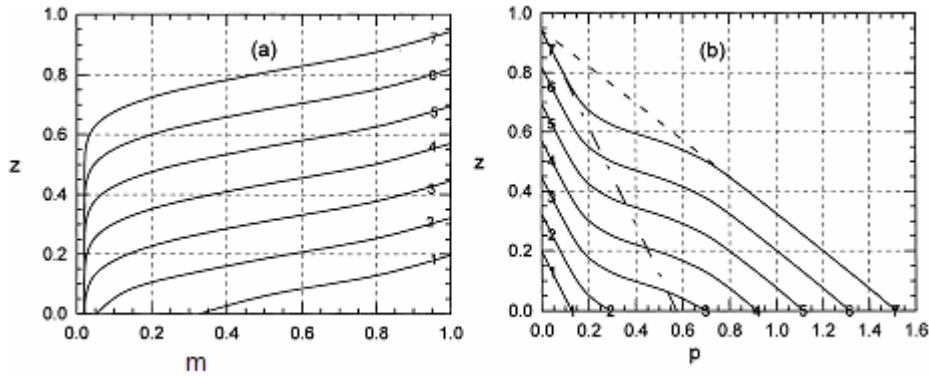


Рис.2.1 $V_0 = 10^{-11}$ м/сек, $\eta_o = 5 \times 10^{20}$ Па с, $\beta = 10^{-9}$ Па⁻¹, $k_0 = 10^{-15}$ М²

Финальная мощность осадков принималась равной 4 км. Такой набор параметров модели приводит к следующим значениям масштабных параметров T и L : $T = 7 \times 10^{13}$ с, $L = 4.43 \times 10^3$ м и масштабированной скорости роста границы $V = V_0' = 0,16$. $D = 0,006$
 $t = 1,14$ (1); $1,82$ (2); $2,57$ (3); $3,25$ (4); $3,94$ (5); $4,68$ (6); $5,4$ (7)

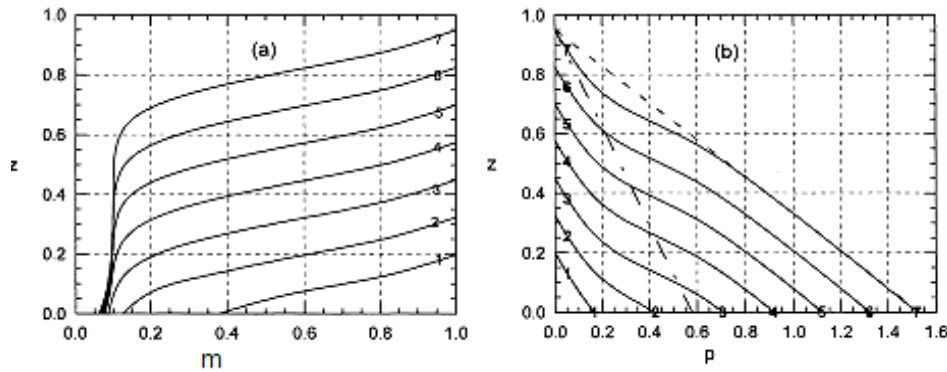


Рис.2.2 $V_0 = 10^{-11}$ м/сек, $\eta_o = 5 \times 10^{20}$ Па с, $\beta = 10^{-9}$ Па⁻¹, $k_0 = 10^{-16}$ М²

Финальная мощность осадков принималась равной 4 км. Такой набор параметров модели приводит к следующим значениям масштабных параметров T и L : $T = 2.2 \times 10^{14}$ с, $L = 1.4 \times 10^3$ м и безразмерной скорости роста границы $V = V_0' = 1,6$. $D = 0,002$
 $t = 0,36$ (1); $0,57$ (2); $0,81$ (3); $1,0$ (4); $1,26$ (5); $1,48$ (6); $1,71$ (7)

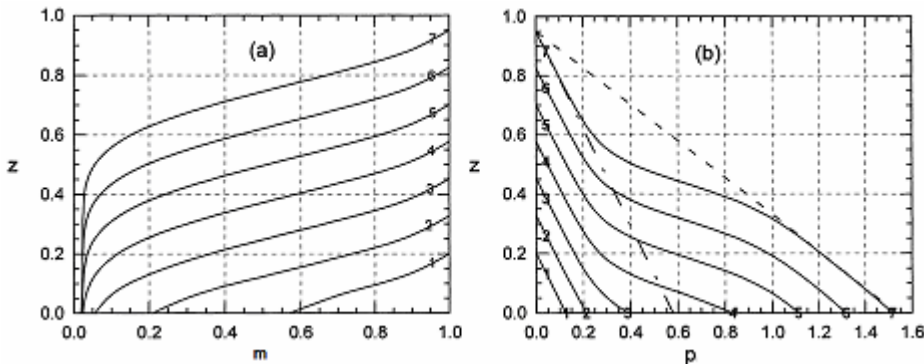


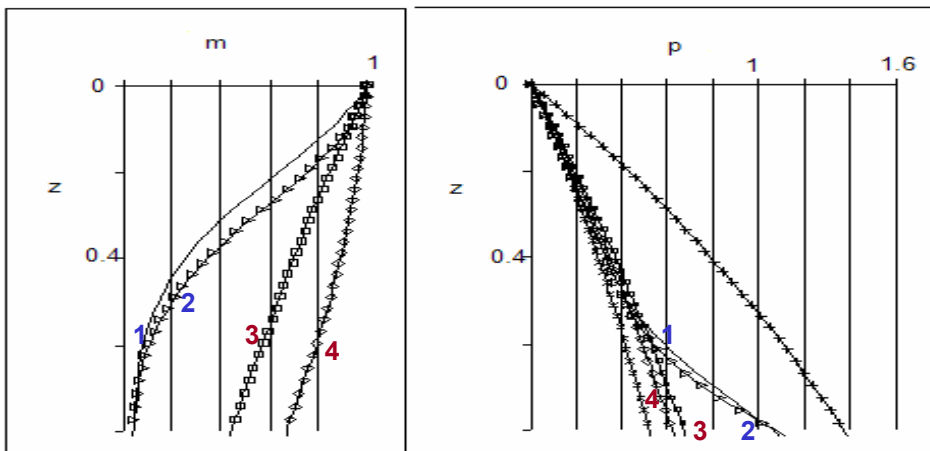
Рис.2.3 $V_0 = 10^{-11}$ м/сек, $\eta_o = 1 \times 10^{21}$ Па с, $\beta = 10^{-9}$ Па⁻¹, $k_0 = 10^{-15}$ М²

Финальная мощность осадочного слоя равна 4 км.

$V = 0,16$. $D = 0,02$

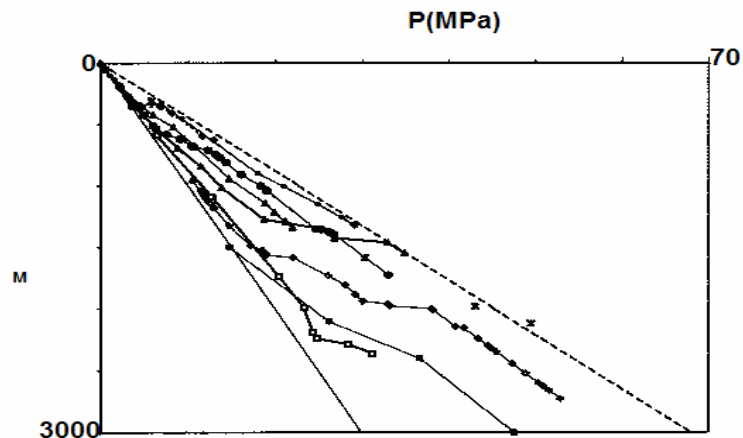
$t = 0,8$ (1); $1,32$ (2); $1,8$ (3); $2,32$ (4); $2,8$ (5); $3,32$ (6); $3,8$ (7)

Влияние значения реологического параметра D на характер уплотнения при осадконакоплении



Распределение эффективного давления по глубине накапливающихся осадков для одинаковых значений параметра подобия V ($V \sim 0.06$) и различных значений параметра подобия D ($D \sim 0.002$ -сплошная линия, $D \sim 2$ -пунктирная линия) и финальной мощности осадочного слоя равной 8км.

	1 $t=7,7$	2 $t=7,7$	3 $t=0,77$	4 $t=0,77$
V_0 (м/с)	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}
m_0	0,3	0,3	0,3	0,3
η (Па·с)	$5 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{21}$	$5 \cdot 10^{21}$
μ (Па·с)	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
ρ_f (кг/м ³)	$1,0 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$
ρ_s (кг/м ³)	$2,65 \cdot 10^3$	$2,65 \cdot 10^3$	$2,65 \cdot 10^3$	$2,65 \cdot 10^3$
$\beta=1/K_p$ (1/Па ¹)	10^{-8}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-9}
k (м ²)	10^{-14}	10^{-14}	10^{-15}	10^{-15}
V	0,06	0,06	0,6	0,6
D	0,6 сплошная	0,06 треуголь ники	0,6 квадраты	0,06 ромбы



Анализ результатов расчетов позволяет сформулировать следующие закономерности эволюции распределения пористости и порового давления с глубиной в процессе уплотнения накапливающихся осадков.

В любой заданной точке осадков в приповерхностной зоне пористость уменьшается с ростом значения параметра безразмерное время.

Так как значение параметра подобия 'безразмерное время' определяется не только реальным временем процесса, но и физическими свойствами осадков, то **осадки меньшей вязкости** или (и) большей проницаемости будут демонстрировать большее падение пористости в течение заданного реального времени, чем более вязкие и (или) менее проницаемые, то есть **будут уплотняться быстрее**.

Градиенты падения пористости и роста давления флюида по глубине зависят от значений безразмерного характеристического комплекса V (флюидодинамического параметра подобия), являющегося нелинейной комбинацией физических параметров осадков и скорости их аккумуляции. **Градиент давления насыщающего флюида в приповерхностном слое оказывается выше при большем значении безразмерного параметра V .**

При формировании осадочной толщи в течение заданного времени, градиент давления флюида будет большим для слоя, на поверхность которого поступали менее проницаемые осадки.

Безразмерный реологический параметр подобия, критерий D характеризует вклад эффективной сжимаемости и вязкого эффекта в процесс уплотнения.

Различие в распределении пористости и порового давления в зависимости от значений критерия D для осадков одинаковой финальной мощности проявляется более сильно при меньшем значении безразмерного времени.

Чем больше значение критерия D (при том же значении критерия V) тем осадки уплотняются быстрее.

При $D \ll 1$, процесс уплотнения при $t \sim 1$ приводит к формированию приповерхностного погранслоя

монотонного изменения порового давления и пористости и появлению на определенной глубине осадков резкого возрастания порового давления и резкого убывания градиента пористости, что и показывает роль времени в процессе уплотнения.

Выводы по результатам модельных расчетов

Анализ результатов расчетов позволяет сформулировать следующие закономерности эволюции распределения пористости и порового давления с глубиной в процессе уплотнения накапливающихся осадков.

В любой заданной точке осадков в приповерхностной зоне пористость уменьшается с ростом значения параметра безразмерное время. Так как значение параметра подобия 'безразмерное время' определяется не только реальным временем процесса, но и физическими свойствами осадков, то осадки меньшей вязкости или (и) большей проницаемости будут демонстрировать большее падение пористости в течение заданного реального времени, чем более вязкие и (или) менее проницаемые.

Из анализа результатов численных решений видно, что градиенты падения пористости и роста давления флюида по глубине зависят от значений безразмерного характеристического комплекса V (флюидодинамического параметра подобия), являющегося нелинейной комбинацией физических параметров осадков и скорости их аккумуляции. А именно: **градиент давления насыщающего флюида в приповерхностном слое оказывается выше при большем значении безразмерного параметра $V_0' = V$** . Давление насыщающего флюида повышается с увеличением расстояния от поверхности осадков и градиент развивающегося в накапливающихся и уплотняющихся осадках давления флюида тем больше, чем больше скорость осадконакопления и тем меньше, чем больше пористость и проницаемость поступающих осадков. При формировании осадочной толщи в течение заданного времени, градиент давления флюида будет большим для слоя, на поверхность которого поступали менее проницаемые осадки.

Безразмерный реологический параметр подобия, критерий D характеризует вклад эффективной сжимаемости и вязкого эффекта в процесс уплотнения. Расчеты показывают, что этот параметр также влияет на распределение порового давления и пористости по глубине. Из сравнения результатов вычислений следует, что различие в распределении пористости и порового давления в зависимости от значений критерия D для осадков одинаковой финальной мощности проявляется более сильно при большем значении критерия V . Такое различие объясняется тем, что при больших значениях критерия V безразмерное время формирования слоя осадков заданной мощности оказывается меньшим, и число Деборы De оказывается близко к 1. Для меньших значений критерия V градиент порового давления в приповерхностном слое оказывается меньшим, и различие в распределении пористости и порового давления в зависимости от значения критерия D оказывается слабее, чем при больших значениях V , что показывает доминирование вязких процессов на больших временах.

При $D \ll 1$, процесс уплотнения при $t \sim 1$ приводит к формированию приповерхностного погранслоя монотонного изменения порового давления и пористости и появлению на определенной глубине осадков резкого возрастания порового давления и резкого убывания градиента пористости, что и показывает роль времени в процессе уплотнения.

Асимптотическое решение задачи уплотнения осадков и фильтрации флюида при осадконакоплении

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.14)$$

$$\varepsilon v = -m^2 \left(\frac{\partial p}{\partial y} + 1 \right) \quad (3.15)$$

$$-\frac{\partial v}{\partial y} = mp \quad (3.16)$$

с краевыми условиями

$$y=0 : v=0 ; \quad (3.17)$$

$$y=t : m=1, p=0 \quad (3.18)$$

Асимптотическое равномерно пригодное решение

$$m = \exp(-0.5(y-t)^2) + \varepsilon/2 \cdot (y-t+\delta)/t$$

$$p = ((t-y)\exp(-0.5(y-t)^2) + \varepsilon/2 \cdot (y+\delta)/t^2) / m$$

$$v = -\exp(-0.5(y-t)^2) - \varepsilon/4 \cdot (y^2+2\delta y)/t^2 + \exp(-0.5t^2)$$

$$v_f = -v/m$$

$$\delta = \sqrt{\ln 1/2(4/\varepsilon^2)}$$

- **МАСШТАБИРОВАНИЕ.** Введем характерные масштабы с помощью величин: скорости движения границы U , ускорения свободного падения g , разности плотностей матрицы и флюида $\rho - \rho_f$, а также пористости на верхней границе M .
- Масштабы длины, давления и времени, соответственно, в виде
- $L = (\eta_0 U / g(\rho - \rho_f))^{1/2}$,
- $P = (\rho - \rho_f) g L$,
- $T = L / U$.
- Величины, измеряемые в этих масштабах, связаны с исходными величинами соотношениями
- $y = Ly'$, $t = Tt'$, $m = Mm'$, $v = MUv'$, $p = Pp'$,
- $\varepsilon = \mu U / (k_0(\rho - \rho_f) g M)$
- $0.8 \cdot 10^{-5} < \varepsilon < 1.6 \cdot 10^{-2}$

Решение вблизи верхней границы

Решение в нулевом приближении

$$p_0 = t - y$$

$$m_0 = \exp(-0.5(y-t)^2) \quad (3.20)$$

$$v_0 = -m_0 + \exp(-0.5t^2)$$

Решение (3.20) уравнений (3.14-3.16) при $\varepsilon=0$ удовлетворяет краевым условиям (3.17-3.18), но не является равномерной аппроксимацией при ε не равном 0 и $t \gg 1$. решение (3.20) является нулевым приближением внешнего разложения по ε задачи (3.14-3.18), которое аппроксимирует точное решение вблизи верхней границы, пока пористость остается величиной порядка единицы и следовательно, необходимо построить соответствующее решение вблизи нижней границы и произвести процедуру сращивания (сшивания) решения

- $\varepsilon \ll 1$.
- Представим решение $\mathbf{s} = m, v, p$ в виде асимптотического ряда по степеням ε
- $\mathbf{s} = \mathbf{s}_0 + \varepsilon \cdot \mathbf{s}_1 + \dots$

Построение решения вблизи нижней границы

Исходя из предыдущих оценок, следуя теории [Коул, 1972; Найфе, 1976], для нахождения решения введем новые масштабированные переменные

$$t_i = t, y_i = y/t, m = \varepsilon \cdot m_p, v = \varepsilon \cdot v_p, p = p/t, \quad (3.22)$$

которым соответствует преобразование

$$\partial/\partial y = 1/t_1 \cdot \partial/\partial y_1, \quad \partial/\partial t = \partial/\partial t_1 - y_1/t_1 \cdot \partial/\partial y_1. \quad (3.23)$$

Подставив (3.22-3.23), в уравнения (3.14 - 3.16), получим систему

$$\frac{\partial m_i}{\partial t_i} + \frac{y_i \partial m_i}{t_i \partial y_i} = \frac{\partial v_i}{t_i \partial y_i} \quad (3.24)$$

$$v_i = -m_i^2 \left(\frac{\partial p_i}{t_i^2 \partial y_i} + 1 \right) \quad (3.25)$$

$$-\frac{\partial v_i}{\partial y_i} = m_i p_i \quad (3.26)$$

которая имеет решение, записываемое в неявном виде

$$\begin{aligned} y_1 &= 2m_1 + f(m_1)/t_1 \\ v_1 &= -m_1^2 \\ p_1 &= -\partial \text{Ln}(m_1)/\partial t_1 \end{aligned} \quad (3.27)$$

Здесь $f(m_1)$ - неизвестная функция, которая должна быть определена из сращивания с внешним решением при требовании удовлетворения граничных условий.

Процедура построения полного решения

Процедура сращивания внешнего (при большой пористости) и внутреннего (в окрестности нижней границы при малой пористости) решений состоит в определении функции $f(m_i)$, обеспечивающей удовлетворение решением граничных условий. Перепишем выражения для пористости в (3.20) и (3.27), соответственно, в виде

$$y-t = -Ln^{1/2}(1/m^2) \quad (3.28)$$

$$y-t = (2m_i-1)t + f(m_i) \quad (3.29)$$

Во внутреннем пределе при $\varepsilon \ll 1$, $m_i \sim 1$, с учетом связи (3.22), выражение (3.28) принимает вид

$$y-t = -\lim Ln^{1/2}(1/(\varepsilon \cdot m_i)^2) \quad (3.30)$$

Приравняв (3.30) и (3.29), в главном приближении по ε имеем промежуточный предел $m_i = 1/2$ и можем определить неизвестную функцию $f(m_i) = -\delta$, где $\delta = Ln^{1/2}(4/\varepsilon^2)$. Теперь внутреннее решение - зависимость (3.29) - можно разрешить в явном виде относительно m_i

$$m_i = 1/2 + (y-t+\delta)/2t \quad (3.31)$$

Срощенное выражение для пористости получаем складывая (3.31) с (3.20) и вычитая промежуточный предел и подставляя m_i из (3.22). Давление и скорости матрицы и флюида определяются, соответственно, из соотношений (3.16), (3.14) с условием (3.17, 3.8), так что

$$m = \exp(-0.5(y-t)^2) + \varepsilon/2 \cdot (y-t+\delta)/t$$

$$p = ((t-y)\exp(-0.5(y-t)^2) + \varepsilon/2 \cdot (y+\delta)/t^2) / m$$

$$v = -\exp(-0.5(y-t)^2) - \varepsilon/4 \cdot (y^2+2\delta y)/t^2 + \exp(-0.5t^2)$$

(3.32)

$$v_f = -v/m$$

Равномерно-пригодное асимптотическое решение

$$m = \exp(-0.5(y-t)^2)$$

$$p = ((t-y)\exp(-0.5(y-t)^2) + \varepsilon/2 \cdot (y+\delta)/t^2) / (\exp(-0.5(y-t)^2) + \varepsilon/2 \cdot (y-t+\delta)/t)$$

$$v = -\exp(-0.5(y-t)^2) + \exp(-0.5t^2)$$

$$v_f = -v/m$$

слой ненулевой (порядка 1) пористости примыкает к верхней границе области течения, и его мощность составляет величину порядка $\delta = Ln^{1/2}(4/\varepsilon^2)$

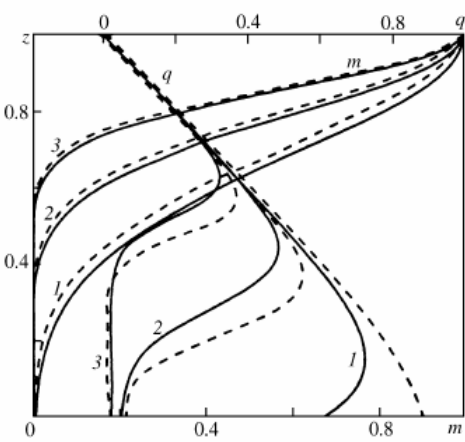


Рис. 3.1. Численное (штриховые кривые) и аналитическое (сплошные кривые) решения для пористости и эффективного давления $q(z)$ при $t=3,2; 4,8; 7,2$ (кривые 1-3) и $\varepsilon=0,00868$ ($q=pH/L$)

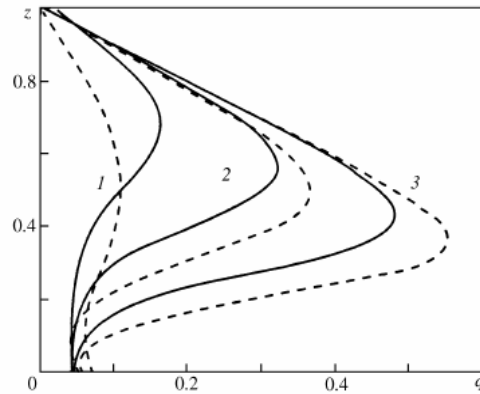


Рис. 3.2. Эффективное давление $q(z)$ при $t=4,8$; и $\varepsilon=0,868; 0,0868; 0,00868$ (1-3)

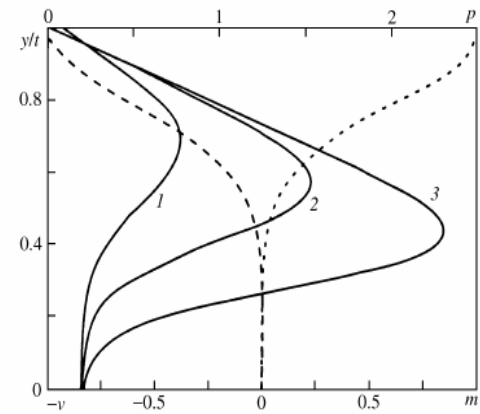


Рис. 3.3. Пористость (пунктирная кривая), скорость матрицы (штриховая кривая) и эффективное давление (сплошная кривая) при $t=4,8$; и $\varepsilon=0,868; 0,0868; 0,00868$ (1-3)

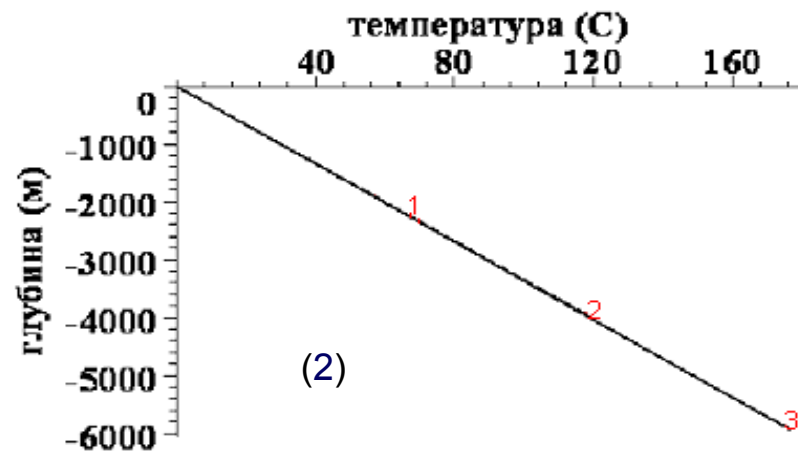
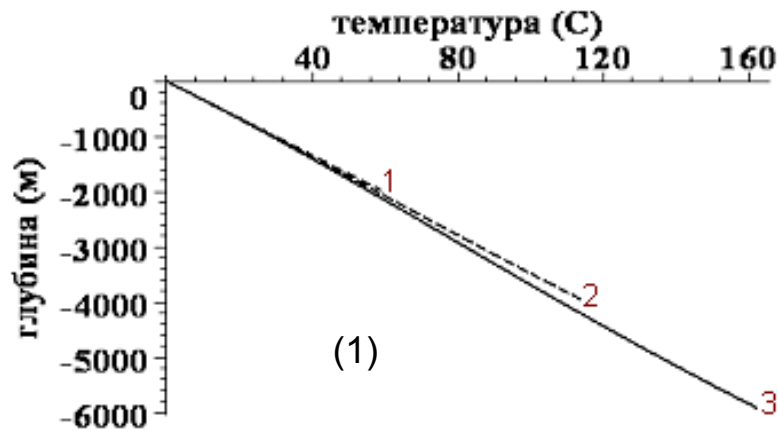
Сравнение результатов, полученных асимптотическими методами, с результатами численного решения показывает удовлетворительное совпадение результатов для умеренных значений времени и хорошее - для больших, для типичных значений параметров осадконакопления. Важным обстоятельством является простота полученного асимптотического решения, делающая возможным определение пористости, давления, скоростей для конкретных геологических условий и вариаций параметров задачи с помощью достаточно простых вычислений по полученным формулам.

Асимптотическое решение позволяет уверенно определить закономерность увеличения развивающегося в порах давления при увеличении значения параметра $\varepsilon = \mu U / (k_0(\rho - \rho_f)gM)$.

Действительно, при увеличении значения ε знаменатель в выражении для эффективного давления (3.32, 3.33) растет быстрее, чем числитель, и следовательно эффективное давление уменьшается (рис.3.3), что, в силу определения эффективного давления, означает увеличение давления флюида. Чем больше ε , тем меньше мощность приповерхностного погранслоя в котором осуществляется основное, значимое падение пористости и тем больше градиент порового давления в приповерхностном погранслое.

Вычисляя параметры T и ε и пользуясь описанными закономерностями, можно делать обоснованные предположения о скорости падения пористости и росте порового давления с глубиной. Параметр ε интерпретируется как отношение скорости роста мощности осадочного слоя к гидродинамическому масштабу задачи,

Влияние взаимосвязанных процессов уплотнения и фильтрации на тепловой режим осадконакопления



- $V_s = -\exp(-0.5(y-t)^2) + \exp(-0.5t^2)$;
- $V_f = -V_s/m$
- $m = \exp(-0.5(y-t)^2)$
- $\kappa = KT/L^2 \quad \partial\theta/\partial y(y=0) = H; \quad \theta(y=t) = 0$;
- $H = B \cdot L/F; \quad \theta = f/F; \quad F = 273^0; \quad L = (\eta_0 U/g(\rho - \rho_f))^{1/2}; \quad T = L/U$
- (1) $U = 10^{-10}$ м/сек
- (2) $U = 10^{-11}$ м/сек

$$\Theta(y, t) = \frac{H \int_t^y e^{\left[-\frac{A \left(\frac{1}{2} \sqrt{\pi} \sqrt{2} \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2} \sqrt{2} u - \frac{1}{2} t \sqrt{2} \right) - e^{(-1/2 t^2)} u \right)}{\kappa} \right]} du}{e^{\left[-\frac{A \left(\frac{1}{2} \sqrt{\pi} \sqrt{2} \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2} \sqrt{2} y - \frac{1}{2} t \sqrt{2} \right) - e^{(-1/2 t^2)} y \right)}{\kappa} \right]}}$$

Моделирование процесса уплотнения при последовательном накоплении слоев осадков с различными свойствами.

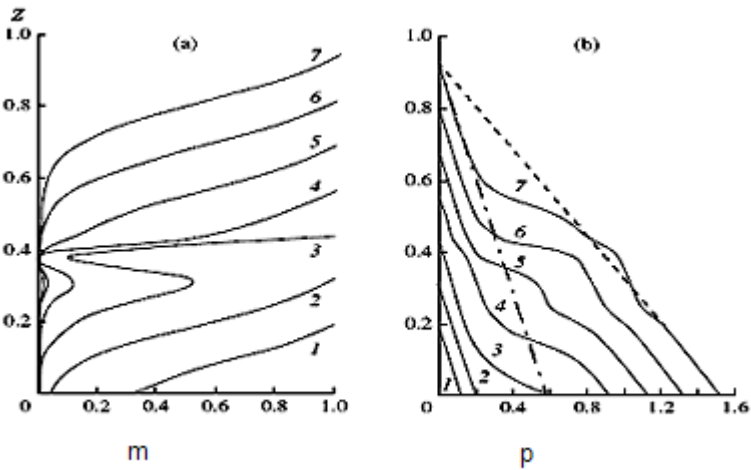


Рис.5.1 Эволюция распределения пористости а) и порового давления б) по глубине бассейна в случае накопления осадков с **пониженной вязкостью** в период времени, когда мощность осадочного слоя увеличивалась от 0.35 до 0.37 его конечной мощности.

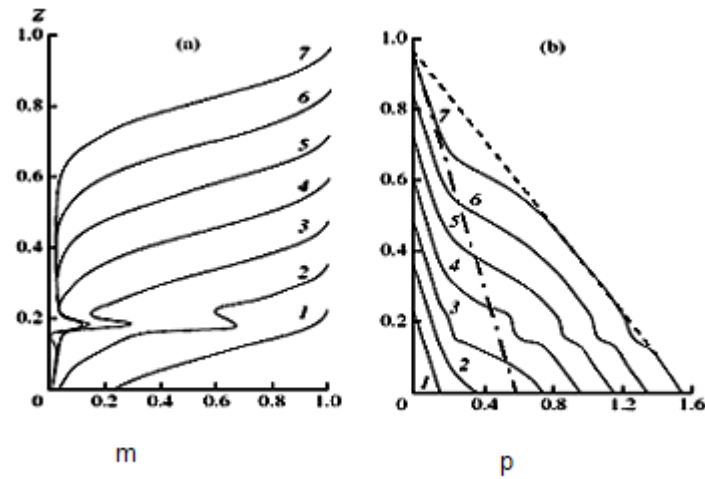


Рис.5.2 а,б. Эволюция распределения пористости а) и порового давления б) по глубине бассейна в случае накопления осадков с **повышенной вязкостью** в период времени, когда мощность осадочного слоя увеличивалась от 0.15 до 0.2 от его конечной мощности

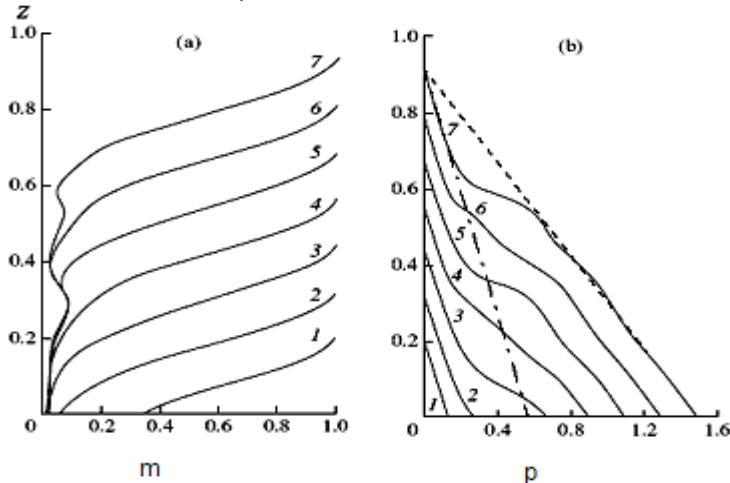


Рис 5.3 а,б эволюция распределения пористости а) и порового давления б) по глубине бассейна в случае накопления осадков с **пониженной проницаемостью** в периоды времени, когда мощность осадочного слоя увеличивалась от 0.25 до 0.4 и от 0.53 до 0.62 его конечной мощности. Все остальные параметры как для рис.2. 1.

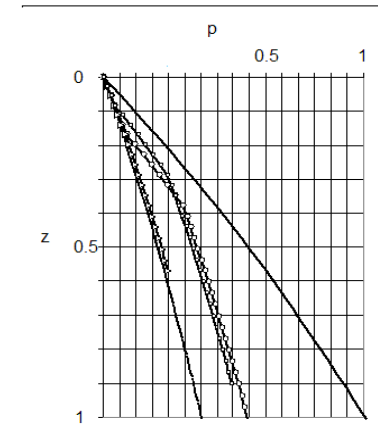
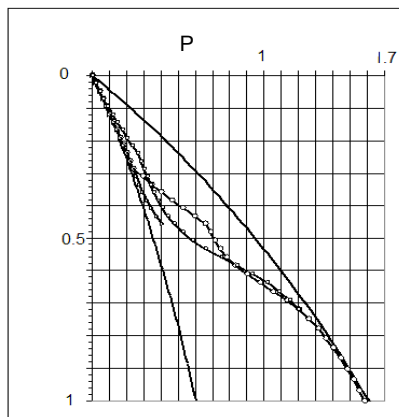
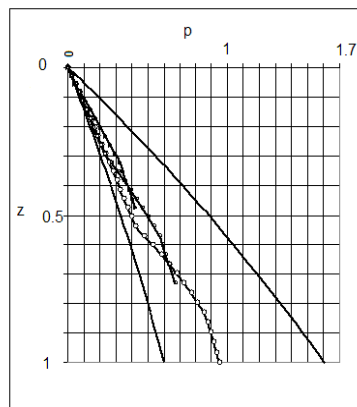
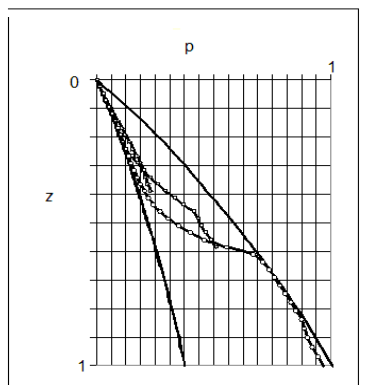
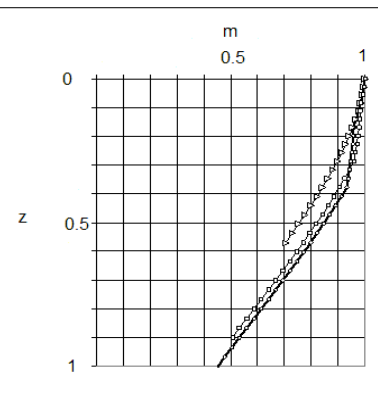
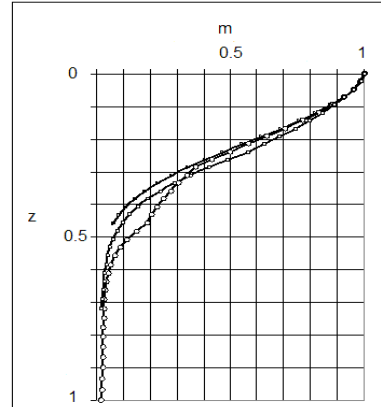
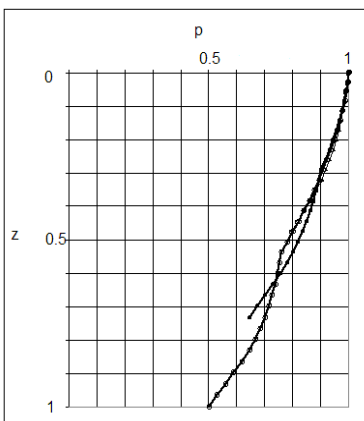
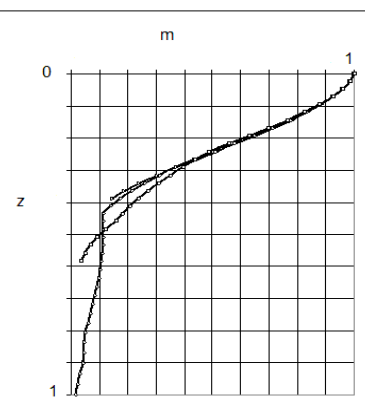


Рис.5. $V=10^{-11}$ м/с. Слой с проницаемостью (0,1 k_0) стал накапливаться с момента, когда мощность осадков составляла 0,17 и до момента, когда мощность осадков составляла около 0,49 от финальной мощности осадочного слоя. Зона сформированного anomalно повышенного порового давления погружается по мере накопления осадков и в приповерхностной зоне градиент порового давления падает.

Рис.6. $V=10^{-10}$ м/с. Слой с проницаемостью (0,1 k_0) стал накапливаться с момента, когда мощность осадков составляла 0,17 и до момента, когда мощность осадков составляла около 0,49 от финальной мощности осадочного слоя. Давление в верхней части осадков понижается со временем и область anomalного градиента погружается с погружением области пониженной проницаемости.

Рис.7. $V=10^{-11}$ м/с. Осадки с пониженной относительно базового значения проницаемостью 0,1 k_0 накапливались в течении истории накопления когда мощность осадков уже составляла от 0,5371 и до 0,7364 от финальной мощности осадочного слоя. Давление в этой области сильно нарастает с увеличением мощности осадков а пористость оказывается больше, чем для однородного осадконакопления.

Рис.8. $V=10^{-10}$ м/с. Осадки с пониженной относительно базового значения проницаемостью 0,1 k_0 накапливались в течении истории накопления когда мощность осадков уже составляла от 0,5371 и до 0,7364 от финальной мощности осадочного слоя. Давление в нижней части увеличивается, а в верхней давление сначала нарастает а в дальнейшем уменьшается по мере накопления вышележащих слоев.

Закономерности образования в осадочной колонке зон немонотонности падения пористости с различным распределением профилей порового давления.

Результаты численного моделирования показывают, что накопление слоя относительно пониженной вязкости приводит в дальнейшем, со временем, к образованию и сохранению в убывающем по глубине распределении пористости немонотонности, такой, что пористость ниже этого слоя оказывается большей, чем в вышележащих слоях, а поровое давление растет, стремясь к литостатическому.

К формированию в глубине осадков зон немонотонности распределения пористости приводит также относительно пониженная проницаемость накопившихся в определенный момент истории осадконакопления слоев осадков, при этом происходит относительное увеличение порового давления именно в этих слоях. Подобная немонотонность падения пористости образуется и в случае накопления слоя сравнительно повышенной вязкости, однако, в этом случае, поровое давление напротив, будет иметь в этой области локальный минимум.

Таким образом, предложенная модель объясняет возможные механизмы образования в толще осадков вязкоупругой реологии пористых коллекторов с принципиально разным уровнем порового давления, т.е. с локально повышенным и локально пониженным давлением относительно прилегающих слоев.

Распространение и P-T условия аккумуляции и стабильности газовых гидратов в естественных условиях.

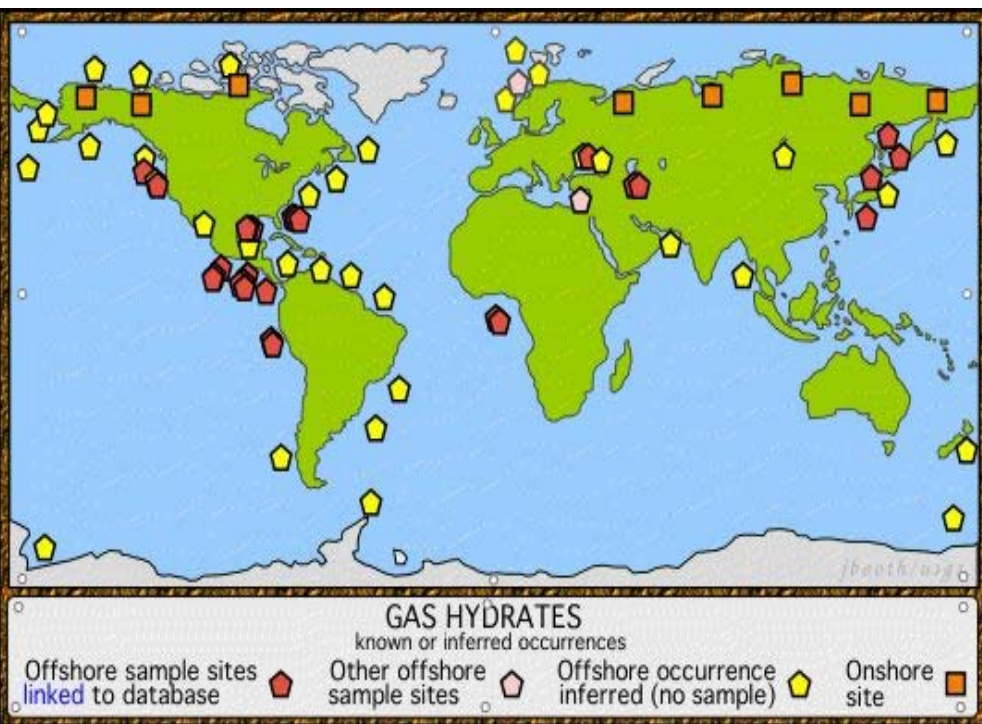


Рис. 1. Принципиальная схема, иллюстрирующая механические, гидродинамические и тепловые условия процессов накопления и уплотнения осадков и аккумуляции газгидратов в зоне их стабильности.

Система уравнений, описывающая образование газгидратов в зоне их РТ стабильности в процессе роста мощности осадочного слоя

$$V_f - V_s = -\frac{k}{\mu(m-h)} \left(\frac{\partial p_f}{\partial z} + \rho_f g \right)$$

$$\frac{\partial \rho_f m(1-h)}{\partial t} + \frac{\partial \rho_f V_f m(1-h)}{\partial z} = -J_{gh} \rho_f$$

$$\frac{\partial \rho_h m \cdot h}{\partial t} + \frac{\partial \rho_h V_s m \cdot h}{\partial z} = J_{gh} \rho_h$$

[Rempel, Buffet, 1997,
Davie, Buffet, 2001].

$$\frac{\partial \rho_f m(1-h)c}{\partial t} + \frac{\partial \rho_f V_f m(1-h)c}{\partial z} = -\rho_h (c_h - c) \frac{\partial mh}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \rho_s (1-m)}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s V_s (1-m)}{\partial z} = 0$$

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

$$\frac{\partial f}{\partial t} + A_1 \frac{\partial m V_f f}{\partial z} + A_2 \frac{\partial (1-m) V_s f}{\partial z} = \kappa \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

• h – гидратонасыщенность

c – концентрация метана в поровом флюиде,

c_h – концентрация метана в гидрате

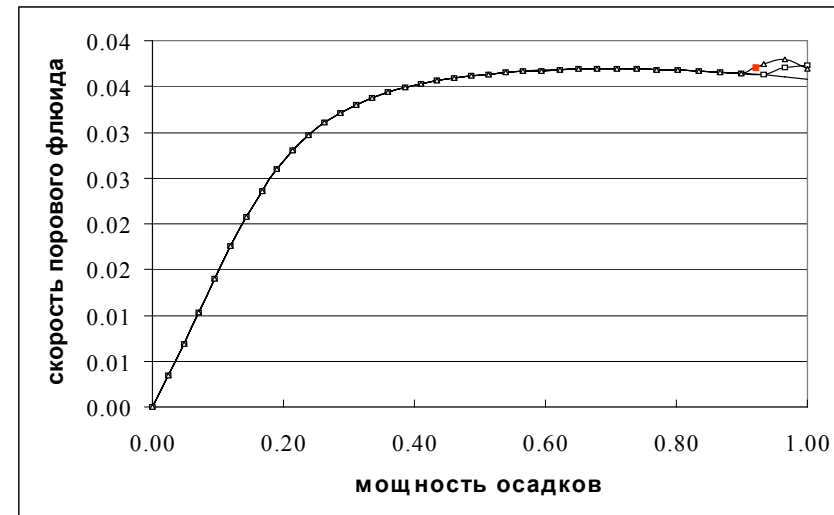
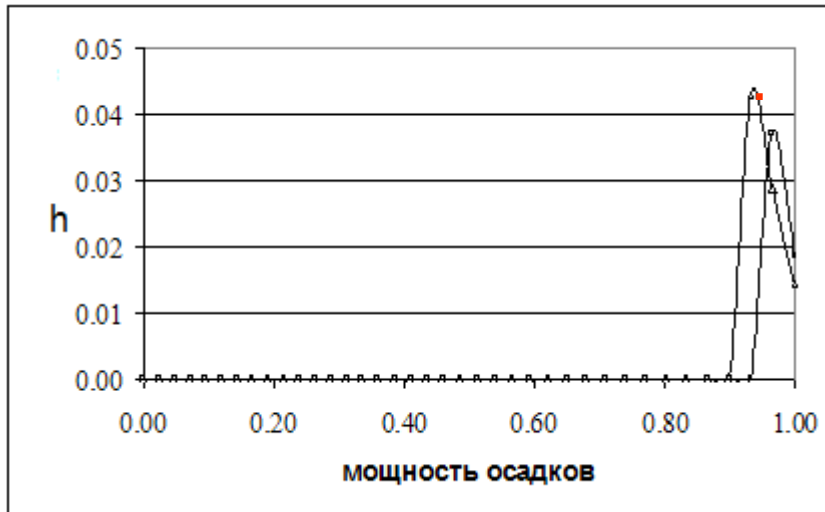
Принимается условие локального термодинамического равновесия

$c_{eq}(T) = c_{eq}(T_3(P)) \exp((T - T_3(P))/\tau)$ для $T < T_3(P)$

, где $\tau \sim 14.4^\circ\text{C}$, а $T_3(P)$, положение фазовой границы стабильности [Davie, Zatsepina, Buffet, 2004]. Для

локализации зоны стабильности гидратов, также должно быть задано давление на поверхности бассейна, отражающее его глубину [Davie, Zatsepina, Buffet, 2004]. Для газгидрата ставится естественное условие равенства 0 содержания гидрата в порах вне границ зоны стабильности газгидрата.

Результаты расчетов гидратонакопления и скорости фильтрации насыщающего флюида



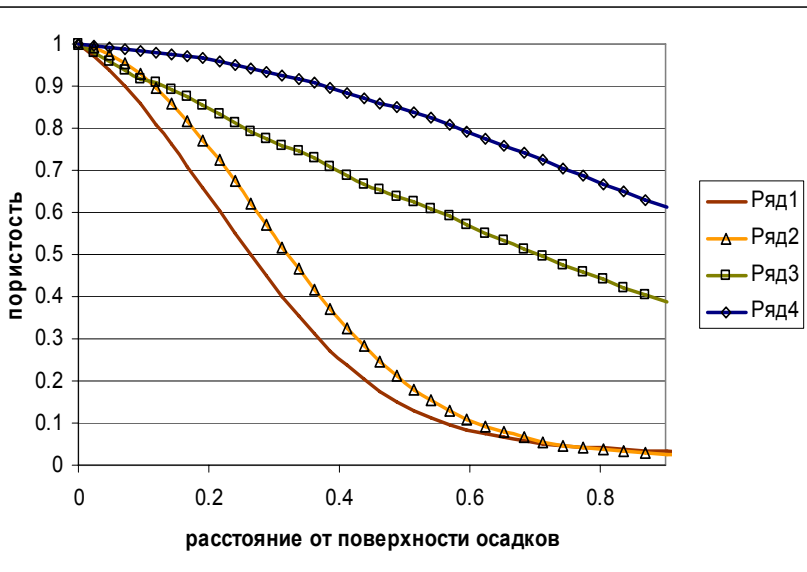
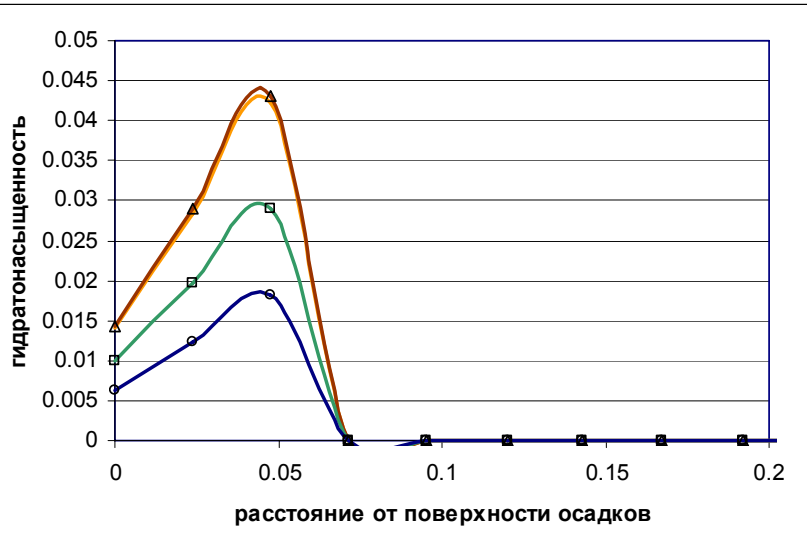
А

Результаты вычислений для $V'=0.5 \cdot 10^{-2}$; $t'=0.2 \cdot 10^2$. ($V_1=10^{-11}$ м/сек и конечной мощности осадков 6 км), представленные в безразмерном виде: А) Зависимости гидратонасыщенности пор от расстояния от основания бассейна (все величины безразмерные) для различных мощностей зоны стабильности гидрата.

Б) Зависимость скорости порового флюида от расстояния от основания бассейна (все величины безразмерные). Сплошная кривая - в отсутствии гидратов, маркированные - в случае гидратонакопления с различной мощностью зоны стабильности гидрата.

Б

Распределение гидратонасыщенности по глубине для различных значениях физических и гидродинамических свойств осадков



	1 t=7,8	2 t=7,8	3 t=0,78	4 t=0,78
V_0 (м/с)	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}
m_0	0,3	0,3	0,3	0,3
η (Па·с)	$5 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{21}$	$5 \cdot 10^{21}$
μ (Па·с)	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
ρ_f (кг/м ³)	$1,0 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$
ρ_s (кг/м ³)	$2,65 \cdot 10^3$	$2,65 \cdot 10^3$	$2,65 \cdot 10^3$	$2,65 \cdot 10^3$
$\beta=1/K_p$ (1/Па)	10^{-8}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-9}
k (м ²)	10^{-14}	10^{-14}	10^{-15}	10^{-15}
V	0,06	0,06	0,6	0,6
D	0,6	0,06	0,6	0,06

Выводы

- Анализ результатов моделирования показывает, что чем больше безразмерное время процесса осадконакопления, при том же значении безразмерной скорости, тем больше результирующая гидратонасыщенность;
- чем больше безразмерная скорость наращивания мощности осадков, тем больше скорость гидратонакопления;
- скорость аккумуляции гидратов тем выше, чем больше значение параметра подобия D .
- Увеличение значения проницаемости k_0 приводит к увеличению значения безразмерного времени задачи t' , при уменьшении значения безразмерной скорости роста мощности осадочного слоя, тогда как увеличение параметра вязкость осадков η , приводит к уменьшению значения безразмерного времени t' без изменения значения безразмерной скорости роста мощности осадочного слоя. Уменьшение размерной скорости накопления осадков так же приводит к увеличению безразмерного времени формирования слоя осадков заданной мощности. Полученные результаты отражают влияние на процесс накопления газгидратов механических и гидродинамических аспектов процессов уплотнения осадков и фильтрации флюидов при росте мощности осадочного слоя.
- Накопление газовых гидратов вносит возмущения в скорость фильтрации порового флюида в зависимости от доли гидрата в порых в силу изменения свободной пористости. Все отмеченные зависимости носят нелинейный характер в силу существенной нелинейности описывающей их математической задачи.

Выводы

Модель вязкоупругого процесса уплотнения флюидонасыщенной пористой среды при росте ее мощности представляет механизм, объясняющий характер эволюции пористости и порового давления в течение процесса формирования осадочных толщ.

Модель дает теоретическое обоснование зависимости характера процесса уплотнения насыщенной пористой среды осадков от их физических и гидродинамических свойств, времени и скорости наращивания их мощности.

На основании анализа результатов модельных расчетов и аналитических решений сформулированы закономерности эволюции распределения пористости и эффективного и порового давления по глубине в процессе уплотнения накапливающихся осадков в зависимости от величин параметра подобия "время" и флюидодинамического и реологического критериев, представляющих собой: 1) отношение скорости роста мощности осадков к гидродинамическому масштабу скорости, характеризующему процесс фильтрации; и 2) отношение времени релаксации Максвелла к масштабу времени процесса уплотнения.

Полученное аналитическое решение задачи уплотнения растущей флюидонасыщенной среды позволяет оценивать характер эволюции пористости и порового давления во времени, и прогнозировать возможное формирование аномально повышенного порового давления, в зависимости от значения выявленного безразмерного критерия подобия, зависящего от физических свойств осадков и скорости их аккумуляции.

Модель позволяет количественно исследовать возможное влияние на процесс уплотнения и фильтрации флюидов к поверхности накопления в течении роста осадочного слоя слоев осадков с различными физическими и гидродинамическими свойствами. Модель позволяет количественно описывать процесс образования гидродинамических барьеров, зон относительно повышенной пористости и относительно пониженного давления флюида и локальных неоднородностей давления флюида.

Проведенное исследование показывает, как осаждение примесей из насыщающего флюида (на примере образования газовых гидратов) в зависимости от P - T - t условий, будучи зависимым от скорости фильтрации, обусловленной уплотнением, само оказывает влияние на фильтрацию.

На основании численного моделирования обоснованы количественные закономерности влияния режима уплотнения на аккумуляцию газовых гидратов из растворенного газа в зоне P - T условий стабильности .