



Критерии подобия.

Подобие течений неоднородных жидкостей в пористой среде
при линейном законе сопротивления.

Лекция 10

Лаборатория физического моделирования
многофазных процессов

Троицкий В.М.- канд. физ.-мат.наук

Москва 2016

Критерии подобия

Определение –

Критерии подобия – это **безразмерные комбинации**, составленные из определяющих параметров

$$Ne = \frac{F \cdot t^2}{m \cdot l}$$

- число Ньютона в **механике**

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot l}{\mu}$$

- число Рейнольдса – как отношение инерционных сил к вязким силам

$$Fr = \frac{u^2}{g \cdot l}$$

- число Фруда – как отношение инерционных сил к силам тяжести

$$N_c = \frac{V_{\text{ж}} \cdot \mu_{\text{ж}}}{\sigma_{\text{ж}}}$$

- капиллярное число

гидрогазодинамика

Критерии подобия

1. Первым на необходимость соблюдения критериев подобия указал М. Леверетт.
2. Огромный вклад в разработку критериев подобия внес Д.А.Эфрос, система которого применялась в работах, посвященных процессам добычи нефти.
3. Так как абсолютное подобие осуществить невозможно (соблюдение всех критериев подобия подразумевает полное воспроизводство натуры), ставится задача выполнения определенных критериев при фильтрации нефтегазоконденсатных систем в пористой среде.
4. Для процессов фильтрации, вытеснения нефти водой и газом критерии подобия были преобразованы Д.А. Эфросом к виду:

$$\pi_1 = \frac{\Delta P}{\sigma} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \pi_2 = \frac{\sigma}{k |grad P|}$$

В работе Д.А. Эфроса детально исследовано влияние критериев подобия на процесс вытеснения нефти водой и показано, что **автомодельность** достигается при $\pi_1 \leq 0.5$, $\pi_2 \geq 0.5 \cdot 10^6$ для несцементированного песка.

При исследованиях вытеснения можно не соблюдать точного равенства $\pi_1(\text{нат}) = \pi_1(\text{мод})$

Что такое автоматодельность?

Критерии подобия π_1

Критерий π_1 устанавливает отношение перепада капиллярного давления к перепаду гидродинамического (измеряемого) давления

$$\pi_1 = \frac{\Delta P_{\text{кап}}}{\Delta P}$$

$$\pi_1 = \frac{\sigma}{\Delta P \sqrt{\frac{k}{m}}}$$

1-й критерий подобия:

$$\pi_{1\text{мод}} = \pi_{1\text{нат}} \quad (1)$$

$$\pi_1 \leq 0,5 \quad (2)$$

Соотношение (2) обеспечивает удовлетворительную точность при моделировании (достигается условие автомодельности)

1-й критерий подобия не является жестким:
можно не соблюдать точного равенства (1)

ЧТО ТАКОЕ УСЛОВИЕ АВТОМОДЕЛЬНОСТИ?

Критерии подобия π_2

Критерий π_2 устанавливает отношение градиента капиллярного давления к градиенту гидродинамического (измеряемого) давления

$$\pi_2 = \frac{\text{grad}(P_{\text{кап}})}{\text{grad}P}$$

$$\pi_2 = \frac{\sigma}{k|\text{grad}P|}$$

2-й критерий подобия:

$$\pi_{2\text{мод}} = \pi_{2\text{нат}} \quad (3)$$

$$\pi_2 \geq 0,5 \cdot 10^6 \quad (4)$$

Выполнение условий (2), (4) практически достаточно для подобия эксперимента натурным процессам

1-й критерий используется для определения минимального перепада давления в эксперименте: ΔP_{min}

2-й критерий – для определения L_{min}

Критерии подобия

Другая формула определения минимальной длины модели L_{min}

ОСТ 39-195-86

$$L_{min} = 1000 \cdot \sqrt{(K_{пр} \cdot m)}, \text{мм} \quad \text{где } K_{пр} \text{ — в мкм}^2, m \text{ — в долях единицы}$$

ЗАДАЧА

Пусть:

$m=20\%$, $K_{пр}=50$ мД, $\sigma=25$ дин/см

Найти: $\Delta P_{мин}$, L_{min} (L_{min} - двумя методами)

Алгоритм расчета:

Сначала определяется $\Delta P_{мин}$, затем L_{min} .

Если увеличивать Q и соответственно ΔP , то нужно увеличивать и $L_{мод}$ для выполнения **автомодельности**

Зачем нужно увеличивать ΔP ? Как сильно можно увеличивать ΔP ?

(концевой эффект, время эксперимента, нарушение ламинарного потока...)

Критерии подобия

При исследовании совместного течения жидкостей в пористой среде, необходимо соблюдать условия подобия модельной сборки реальному углеводородному скоплению. Согласно исследованиям Д.А. Эфроса и В.П. Оноприенко [3,4], приближенное подобие при использовании натуральных образцов пористой среды и жидкостей достигается при условиях:

$$\pi_1 = \frac{\theta}{\sqrt{K/K_n} \cdot \Delta P} \leq 0,5 \quad \text{и} \quad \pi_2 = \frac{\theta \cdot L}{K \cdot \Delta P} \leq 0,5 \cdot 10^6,$$

где θ - межфазное натяжение, дин/см;
 K - проницаемость образца для однородной жидкости, 10^{-3} мкм²;
 K_n - пористость, доли единицы;
 ΔP - перепад давления, кгс/см²;
 L - длина образца, см.

π_1 характеризует собой отношение перепадов капиллярного и гидродинамического давлений, π_2 - соотношение между их градиентами.

Эти условия совместно с данными ОСТ 39-195-86 [10] используются при определении необходимой минимальной длины составной модели и перепада давления.

Минимальная длина составного образца также может определяться по формуле: $L_{\min} = 1000 \cdot \sqrt{K_{np} \cdot m}$, мм

где K_{np} - проницаемость, мкм²,
 m - пористость, доли единицы.

Линейная скорость при испытании образца вычислялась по формуле:

$$V_{\text{лин}} = \frac{864,3 \cdot Q}{F \cdot K_n \cdot (1 - S_{\text{сост}}) \cdot (1 - \beta_{\text{сыт}})}, \text{ для водонефтяной системы}$$

$$V_{\text{лин}} = \frac{1728,6 \cdot Q}{F \cdot K_n \cdot (1 - S_{\text{сост}})}, \text{ для водогазонефтяной системы.}$$

Для исследования фильтрации газов и жидкостей помимо выше указанных параметров Д.А. Эфрос получил систему условий подобия, учитывающую также и параметры пластовой нефти и газа (вязкость пластовой нефти - μ_n , вязкость пластового газа - μ_r , пластовое давление - $P_{пл}$ и давление насыщения нефти газом - P_s , пластовую температуру - $t_{пл}$, коэффициент сжимаемости пластовой нефти - Z_n и сверх сжимаемости газа - Z_r , их плотностей и т.п.)

Накопленный за последние годы большой объем данных по настоящей проблеме несмешивающегося вытеснения нефти пластовым газом позволяет к выше отмеченным критериям и в соответствии с «л-теоремой» Бекингема дополнить основные и измеряемые показатели, выполнения которых в модели обязательно:

$$S(p,t)_{\text{мод}}=S(p,t)_{\text{нат}}; Z(p,t)_{\text{мод}}=Z(p,t)_{\text{нат}}; (\mu_n/\mu_r)_{\text{мод}}=(\mu_n/\mu_r)_{\text{нат}}; (P_{пл}/P_s)_{\text{мод}}=(P_{пл}/P_s)_{\text{нат}}$$

Критерии подобия

Критерии подобия сформулированы для цементированных и нецементированных песчаников.

Для них можно установить область автомодельности по 2-му критерию (1-й критерий не очень строгий)

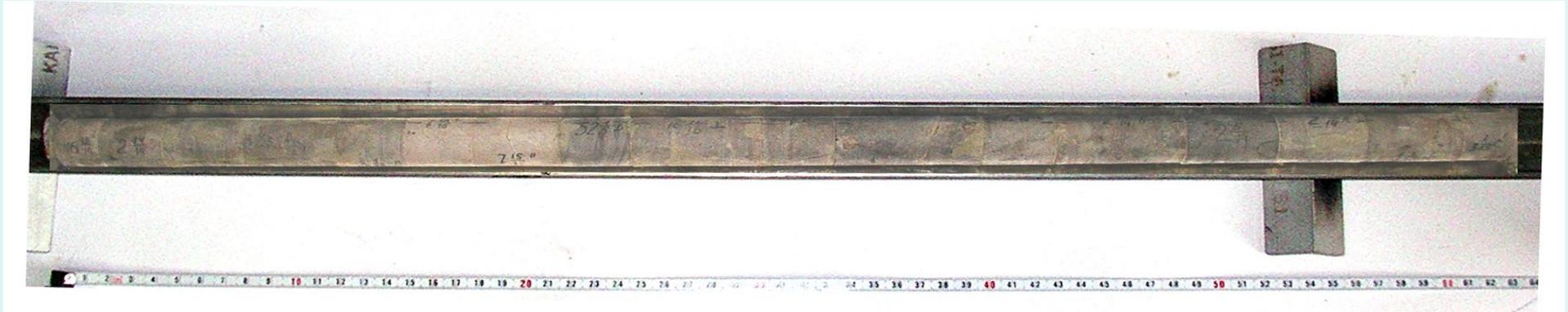
Достаточность выбранной L образца проверяется путем сопоставления экспериментальных результатов полученных на более **длинных** моделях

Для достижения приближенного подобия при вытеснении необходимо иметь модели значительной длины.

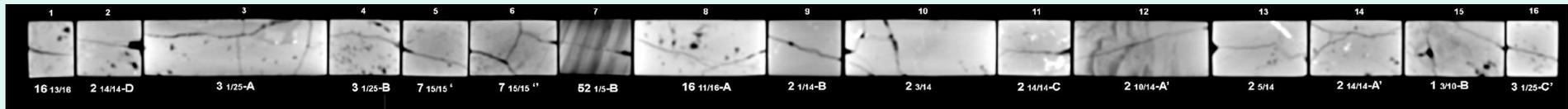
А в случае измерения ОФП при стационарном течении?

До какого предела можно увеличивать ΔP на модели?

Керновая модель пласта



Составная модель пласта из образцов керна нефтяной залежи (томографическая съемка)



ЛИТЕРАТУРА:

■ ОСНОВНАЯ:

- 1. Эфрос Д.А. Исследование фильтрации неоднородных систем. – М., Гостехиздат, 1963.
- 2. Амикс Дж., Басс Д., Уайтинг Р. Физика нефтяного пласта. – М., Гостоптехиздат. – 1962.-570 стр.
- 3. Розенберг М.Д., Кундин С.А. Многофазная многокомпонентная фильтрация при добыче нефти и газа. – М.: Недра. – 1976, - 198 стр.
- 4. Басниев К.С., Дмитриев Н.М., Розенберг Г.Д. Нефтегазовая гидромеханика. Учебное пособие для вузов. – М.- Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005, 544 с.

ЛИТЕРАТУРА:

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ:

- 1. Гиматудинов Ш.К. Физика нефтяного и газового пласта. – М., Недра.-1971.-309 стр.
- 2. Степанова Г.С. Газовые и водогазовые методы воздействия на нефтяные пласты. – М., «Газоил пресс»». -2006.-200 стр.
- 3. Селяков В.И. Кадет В.В. Перколяционные модели процессов переноса в микронеоднородных средах. – М.: недра. – 1995.- 222 стр.
- 4. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике.вод с немецкого. – М.: ИЛ.- 1957.- 726 стр.

ЛИТЕРАТУРА:

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ:

- 5. Брусиловский А.И. Фазовые превращения при разработке нефти и газа. М.: «Грааль», 2002.
- 6. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. – М.: Недра, 1996, 447 с.
- 7. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. – М.: Недра, 1984, 211 с.
- 8. Закиров С.Н. Разработка газовых, газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений. – М.: Струна, 1998, 628 с.
- 9. Бузинов С.Н., Умрихин И.Д. Исследование нефтяных и газовых скважин и пластов. – М.: Недра, 1984, 270 с.
- 10. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. – М.: Гостоптехиздат, 1963, 396 с.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !

internet: www.vniigaz.ru
intranet: www.vniigaz.gazprom.ru
e-mail: vniigaz@vniigaz.gazprom.ru
телефон: (+7 495) 355-92-06
факс: (+7 495) 399-32-63