

Лабораторная работа № 8 (продолжение)

Ситуация 8.4

**Расчёт показателей «непоршневого» вытеснения
нефти водой с оценкой возможности их
регулирования изменением соотношения вязкостей
нефти и воды**

Введение

Выбор расчётной модели заводнения должен корректно учитывать механизм вытеснения нефти водой. В качестве контрольного параметра может быть принят **конечный относительный коэффициент подвижности M** , который рассчитывается с использованием максимальных относительных фазовых проницаемостей k'_B , k'_H и вязкостей фаз:

$$M = (k'_B \cdot \mu_H) / (k'_H \cdot \mu_B)$$

При непосредственном применении закона фильтрации Дарси коэффициент подвижности определяется соотношением

$$M = \frac{\text{максимальная скорость воды}}{\text{максимальная скорость нефти}}$$

Если $M \leq 1$, то вода не может перемещаться быстрее, чем нефть, поэтому характер вытеснения близок к «поршневому». Это наиболее благоприятный тип вытеснения, при котором весь подвижный объём нефти может быть вытеснен эквивалентным объёмом воды.

Если $M > 1$, то вода движется быстрее, чем нефть, и вытеснение происходит **неравномерно**. Для добычи подвижного объёма нефти требуется кратное увеличение объёма циркулирующей воды, что увеличивает срок разработки реальных месторождений и снижает экономические показатели.

При описании многофазной фильтрации в условиях неустойчивости границы, разделяющей жидкости, используется модель «непоршневого» вытеснения нефти водой, авторами которой являются американские исследователи Бакли и Лаверетт (Buckley S.E., Leverett M.S., 1941 г.).

Базовым элементом концепции водонапорного режима в рамках модели «непоршневого» вытеснения являются относительные фазовые проницаемости (ОФП), зависящие от насыщенности порового объема вытесняющей фазой – водой.

Закон Дарси в дифференциальной форме записывается в виде:

для линейного «непоршневого»
вытеснения нефти водой

$$\begin{cases} v_H = -\frac{k \cdot k_H(S)}{\mu_H} \cdot \frac{\partial P_H}{\partial x}, \\ v_B = -\frac{k \cdot k_B(S)}{\mu_B} \cdot \frac{\partial P_B}{\partial x} \end{cases},$$

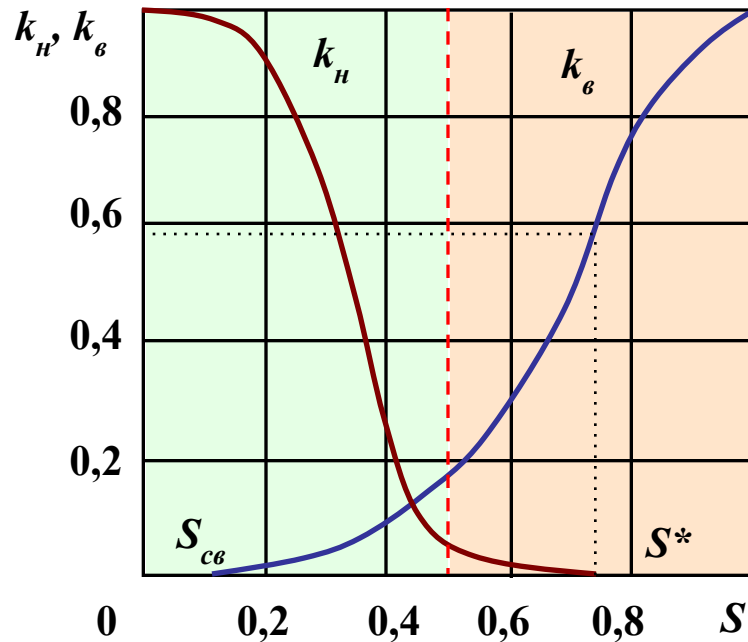
для радиального «непоршневого»
вытеснения нефти водой

$$\begin{cases} v_H = \frac{k \cdot k_H(S)}{\mu_H} \cdot \frac{\partial P_H}{\partial r}, \\ v_B = \frac{k \cdot k_B(S)}{\mu_B} \cdot \frac{\partial P_B}{\partial r} \end{cases}.$$

где $k_H(S)$, $k_B(S)$ – относительные проницаемости для нефти и воды, зависящие от водонасыщенности S ; P_H , P_B – давления в нефти и воде.

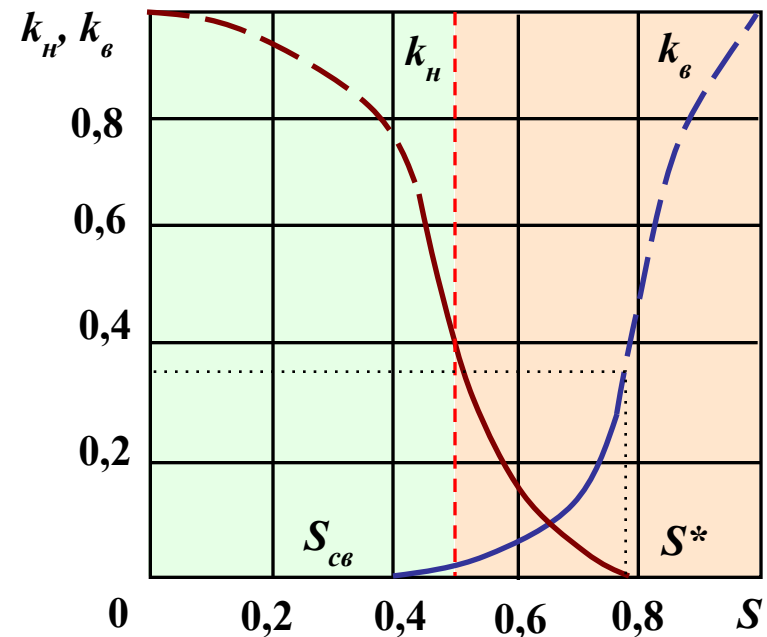
Кривые ОФП

Порода гидрофобная



1. $S_{cb} < 0,2$ (20%)
2. $k_e(S^*) \approx 0,6 \div 0,7$ и выше
3. Для точки пересечения: $S < 0,5$

Порода гидрофильная



1. $S_{cb} > 0,2$ (20%)
2. $k_e(S^*) \approx 0,2 \div 0,3$
3. Для точки пересечения: $S > 0,5$

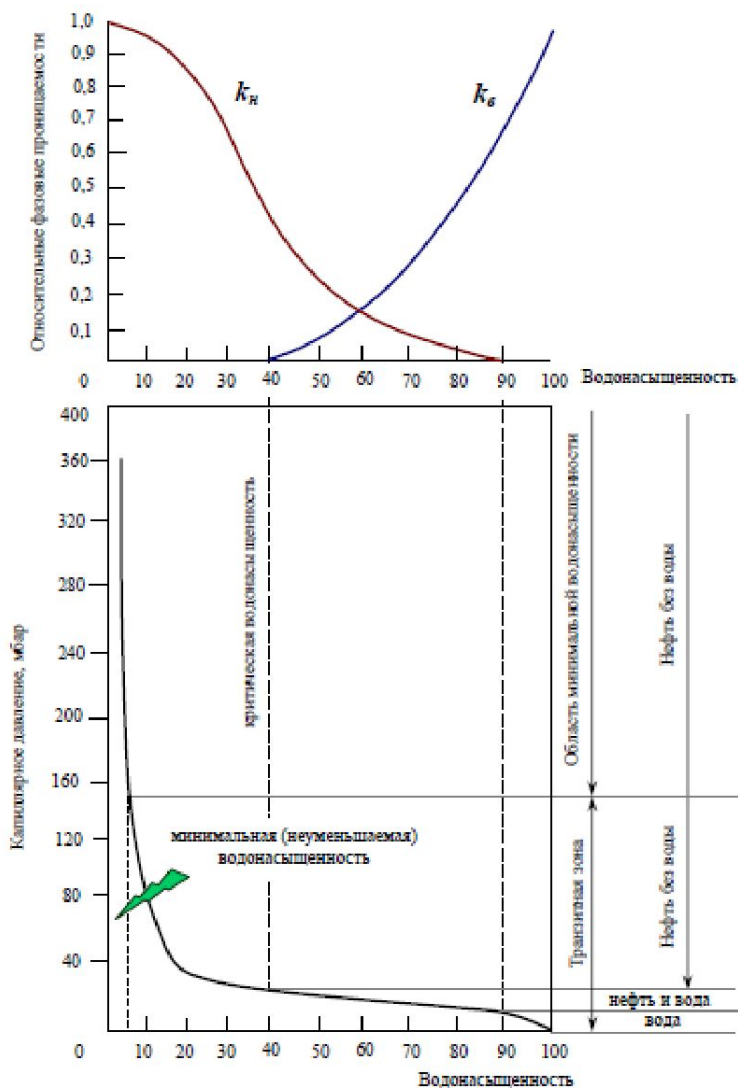
Модель Бакли-Леверетта в микроскопическом масштабе керна пренебрегает капиллярным давлением, а также гравитационными эффектами. Считается, что капиллярность косвенно влияет на форму кривых относительных фазовых проницаемостей.

Ещё один базовый элемент концепции водонапорного режима – **функция Бакли-Леверетта (функция фракционного потока)**. В отличие от ОФП она непосредственно характеризует эффективность заводнения.

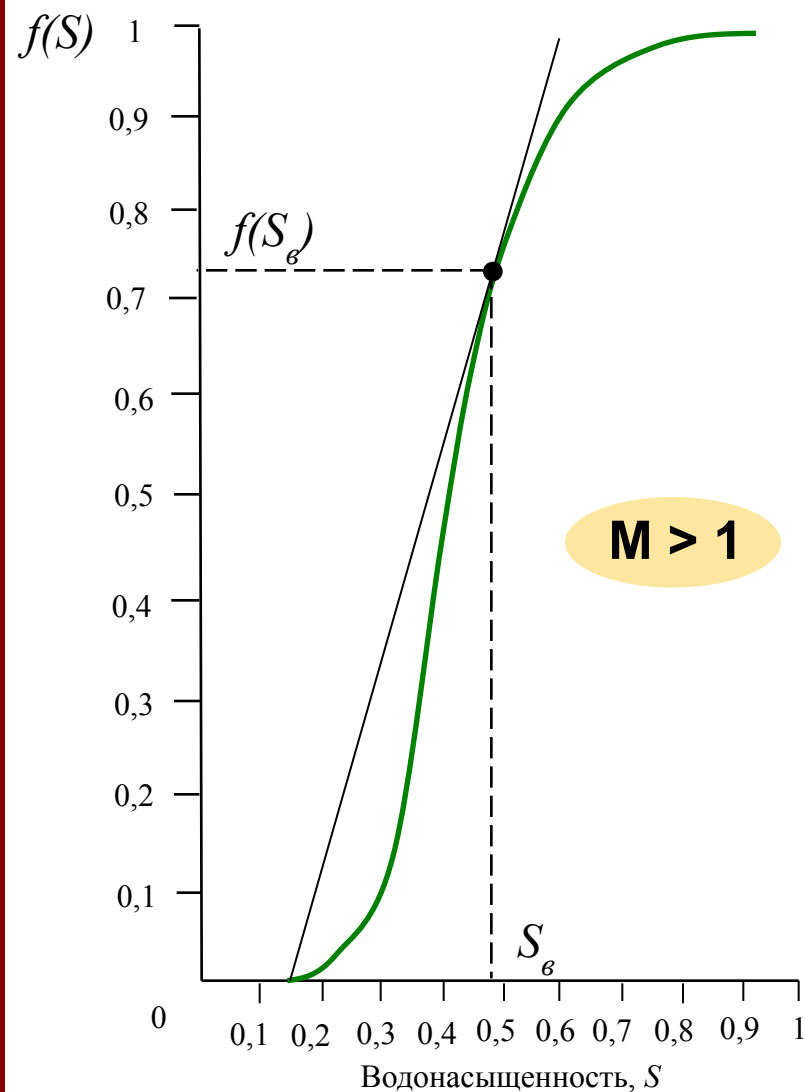
$$f(S) = \frac{k_B(S)}{k_B(S) + \frac{\mu_B}{\mu_H} \cdot k_H(S)}.$$

Физический смысл функции Бакли-Леверетта заключается в том, что **она равна объёмной доле воды в суммарном потоке фильтрующихся фаз**. Данную функцию **часто называют обводнённостью пласта**, подразумевая, что термин «обводнённость» в основном употребляется по отношению к воде, поступающей из скважины или, при экспериментальном исследовании, из выходного сечения керна.

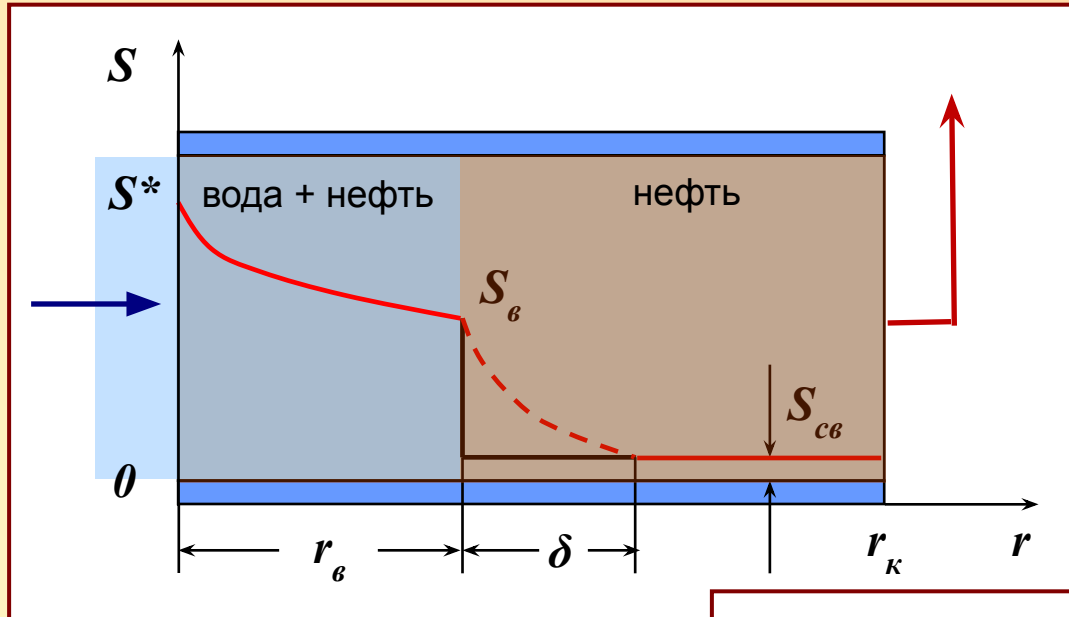
Связь ОФП с капиллярным давлением



Функция фракционного потока (функция Бакли-Лeverетта)



Графическое распределение насыщенности

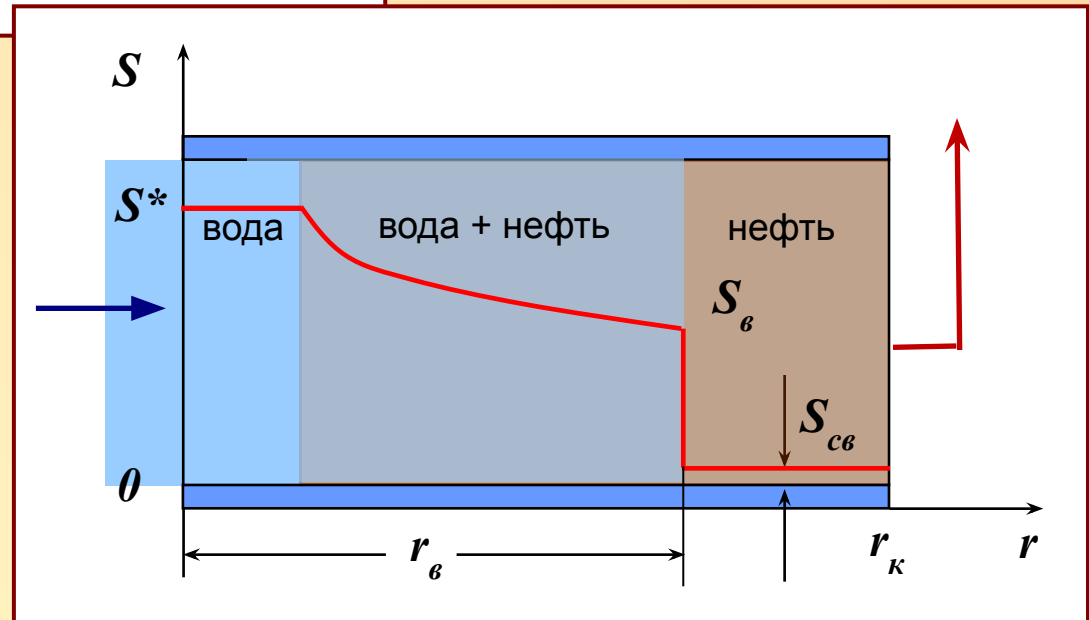


Значение водонасыщенности на фронте вытеснения $S=S_v$. При этом значении происходит прорыв воды в момент, когда закачиваемая вода впервые достигает выходного сечения керна или забоя добывающей скважины.

Водонасыщенность на фронте вытеснения нефти водой, соответствующее значение функции Бакли-Лeverетта, а также её производной связаны соотношением:

$$f'(S_B) = \frac{f(S_B)}{S_B - S_{CB}}.$$

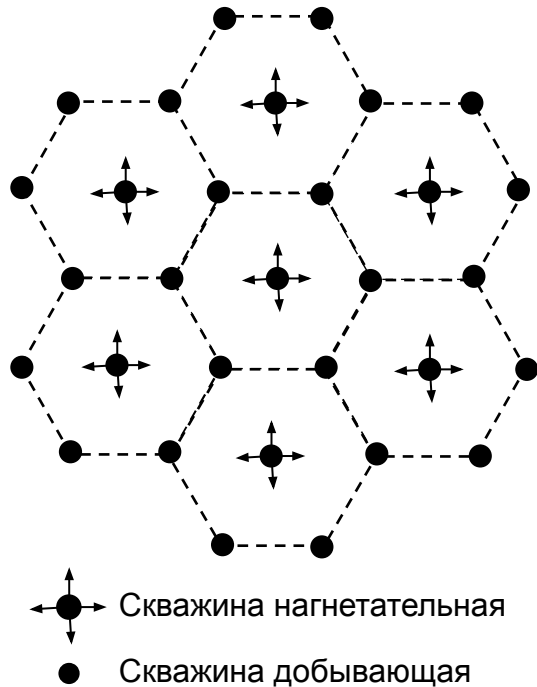
С их помощью рассчитываются показатели эффективности заводнения.



ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

8.4.1

(вариант № 3)



При проектировании разработки нефтяного пласта, гидродинамически не связанного с законтурной водонапорной областью, рассматривается вариант с внутриконтурным заводнением при площадной семиточечной схеме размещения скважин, как показано на рисунке. Площадь одного элемента равна площади шестиугольника, в вершинах которого находятся шесть добывающих скважин, а в центре - одна нагнетательная скважина, и составляет $F_9 = 32,16$ га. Пласт представлен терригенным коллектором, охваченная заводнением нефтенасыщенная толщина равна $h = 11$ м, пористость $m = 18\%$, вязкость нефти в пластовых условиях $\mu_n = 16$ мПа·с, вязкость воды $\mu_в = 1$ мПа·с. Характер вытеснения нефти водой непоршневой.

По результатам лабораторных исследований процесса вытеснения на образцах породы установлено, что насыщенность связанной водой составляет $S_{св} = 12\%$, предельная водонасыщенность $S^* = 78\%$. С изменением водонасыщенности S в указанном диапазоне относительные фазовые проницаемости для нефти k_n и воды $k_в$ принимают следующие значения:

S	0,12	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,70	0,78
k_n	1,000	0,823	0,550	0,356	0,240	0,168	0,110	0,080	0,063	0,038	0,024	0,007	0
$k_в$	0	0,003	0,008	0,012	0,018	0,030	0,043	0,070	0,113	0,155	0,210	0,380	0,610

В каждую нагнетательную скважину планируется закачивать воду с расходом $q = 370$ м³/сут. Залежь предполагается эксплуатировать в условиях жёсткого водонапорного режима при постоянном отборе жидкости из добывающих скважин.

Требуется:

1. Используя модель непоршневого несмешивающегося вытеснения, определить, как повлияет на продолжительность безводного периода разработки выравнивание вязкостей нефти и воды.
2. Рассчитать ожидаемый прирост добычи безводной нефти (+/—), обусловленный изменением соотношения вязкостей нефти и воды.
3. Указать проектные параметры, которые можно оптимизировать с целью увеличения продолжительности безводного периода разработки.

Выполнение работы

1. Получение графиков функции обводнённости (функции Бакли-Левретта).

1.1. Определяют функцию обводнённости $f_1(S)$ для соотношения вязкостей воды и нефти 1:16 по формуле

$$f(S) = \frac{k_B(S)}{k_B(S) + \frac{\mu_B}{\mu_H} \cdot k_H(S)}.$$

1.2. Определяют функцию обводнённости $f_2(S)$ для соотношения вязкостей воды и нефти, равного 1, по той же формуле.

1.3. Результаты определений записывают в таблицу.

S	0,12	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,70	0,78
$f_1(S)$	0												1,000
$f_2(S)$	0												1,000

1.4. По табличным данным строят графики функций $f_1(S)$ и $f_2(S)$ – *в одной системе координат.*

2. Определение значения производной функции обводнённости, соответствующей фронтальной водонасыщенности.

2.1. На графиках функций $f_1(S)$ и $f_2(S)$ строят касательные, проводя их из точки $S=S_{св}$, и находят координаты точек касания.

2.2. Определяют значение производной функции обводнённости, соответствующей фронтальной водонасыщенности, по формуле

$$f'(S_B) = \frac{f(S_B)}{S_B - S_{св}}$$

используя координаты точек касания S_e и $f(S_e)$.

Определение производят дважды – для случая, когда соотношение вязкостей воды и нефти равно 1:16, и для случая, когда это соотношение равно 1.

3. Определение продолжительности безводного периода разработки.

3.1. Рассчитывают радиус кругового участка пласта, эквивалентного по площади элементу семиточечной схемы размещения скважин:

$$r_K = \sqrt{\frac{F}{\pi}}, [M].$$

3.2. Определяют продолжительность безводного периода разработки по формуле

$$t^{\star} = \frac{\pi \cdot h \cdot r_K^2 \cdot m}{q \cdot f'(S_B)} , \quad [\text{сут}]$$

Определение производят дважды – для случая, когда соотношение вязкостей воды и нефти равно 1:16, и для случая, когда это соотношение равно 1.

Вывод

Выравнивание вязкостей нефти и воды приведёт к **уменьшению** / **увеличению** продолжительности безводного периода разработки на ... сут, или в ... раза (для условий задачи).

Ожидаемое снижение / **ожидаемый прирост** добычи безводной нефти составит ... тыс.м³.

С целью увеличения продолжительности безводного периода, кроме изменения вязкостей, можно рекомендовать оптимизировать такие параметры, как ...

Математическая обработка результатов лабораторных экспериментов по вытеснению нефти водой показала, что зависимости относительных фазовых проницаемостей для нефти k_H и для воды k_e от водонасыщенности S представляются в виде аналитических соотношений:

$$k_H(S) = \left(\frac{S^* - S}{S^* - S_{CB}} \right)^2 \quad \text{при } S_{CB} \leq S \leq S^* ;$$

$$k_B(S) = \begin{cases} \left(\frac{S - S_{CB}}{S^* - S_{CB}} \right)^2 & \text{при } S_{CB} \leq S \leq S_1 ; \\ A \cdot \left(\frac{S - S_{CB}}{S^* - S_{CB}} \right)^{1/2} & \text{при } S_1 \leq S \leq 1 . \end{cases}$$

При этом: $A=0,845$, насыщенность связанной водой $S_{CB}=0,09$, предельная водонасыщенность $S^*=0,74$. Динамическая вязкость вытесняющей воды $\mu_e=1$ мПа·с, динамическая вязкость нефти $\mu_H=18$ мПа·с. В качестве одного из методов воздействия на продуктивный пласт рассматривается термальное заводнение. Известно, что оно будет способствовать снижению вязкости нефти в 3 раза.

Докажите, что этот метод действительно будет эффективен в условиях пласта с заданными характеристиками.

Требуется:

- 1) оценить влияние соотношения вязкостей нефти и воды на величину безводного коэффициента вытеснения нефти при «непоршневом» вытеснении нефти водой;
- 2) доказать целесообразность применения термального заводнения с учётом характера смачиваемости породы.

Выполнение работы

1. Получение диаграммы относительных фазовых проницаемостей.

1.1. Определяют значение S_1 из условия:

$$\left(\frac{S - S_{\text{CB}}}{S^* - S_{\text{CB}}} \right)^2 = A \cdot \left(\frac{S - S_{\text{CB}}}{S^* - S_{\text{CB}}} \right)^{1/2}$$

1.2. Задают значения S в диапазоне от S_{CB} до 1 с шагом 0,05 и рассчитывают ОФП, результаты записывают в таблицу .

S	0,09	0,10	0,15	0,20	...	...	...	S_1	...	0,74	...	...	1
k_n	1,000									0	0	0	0
k_e	0												1,000

1.3. Строят диаграмму относительных фазовых проницаемостей.

1.4. По форме кривых ОФП делают вывод о характере смачиваемости породы (гидрофильная / гидрофобная).

2. Получение графиков функции обводнённости (функции Бакли-Левретта).

2.1. Определяют функцию обводнённости для соотношений вязкостей воды и нефти 1:18 (обычное заводнение) и 1:6 (термальное заводнение) по формуле

$$f(S) = \frac{k_B(S)}{k_B(S) + \frac{\mu_B}{\mu_H} \cdot k_H(S)}.$$

2.2. Результаты определений записывают в таблицу

S	0,09	0,15	0,20	0,25	...	...	...	...	...	...	0,70	0,74
$f_1(S)$	0											1,000
$f_2(S)$	0											1,000

2.3. Строят графики функции $f_1(S)$ и $f_2(S)$.

3. Определение коэффициента безводного вытеснения нефти.

3.1. На графиках функций $f_1(S)$ и $f_2(S)$ строят касательные, проводя их из точки $S=S_{св}$, и находят координату точки касания S_B .

3.2. Определяют безводный коэффициент вытеснения нефти по формуле

$$\eta_{б.в.} = \frac{S_B - S_{св}}{1 - S_{св}}$$

Определение производят дважды – для случая, когда соотношение вязкостей воды и нефти равно 1:18 (обычное заводнение), и для случая, когда это соотношение равно 1:6 (термальное заводнение).

Вывод

Термальное заводнение только за счёт изменения соотношения вязкостей воды и нефти будет способствовать **уменьшению** / **увеличению** коэффициента безводного вытеснения нефти на ... д. ед. (для условий задачи). Соответственно, будет **меньше** / **больше** и коэффициент безводного нефтеизвлечения.

Из графика ОФП видно, что порода-коллектор **гидрофильная** / **гидрофобная** (присутствуют все три признака **гидрофильности** / **гидрофобности**). Следовательно, в пластовых условиях на поверхности минерального скелета породы **не могут** / **могут** образовываться граничные слои (плёнки) из высокомолекулярных компонентов нефти, которые при обычном заводнении малоподвижны. Термальное заводнение **не будет** / **будет** способствовать их отмыванию и дополнительному извлечению нефти из пласта. Это **является** / **не является** косвенным доказательством эффективности метода.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой относительный коэффициент подвижности, и как с его помощью определить тип вытеснения нефти водой?
2. В чём заключается сущность «непоршневого» вытеснения нефти водой?
3. Приведите математическое выражение закона Дарси для случая совместной фильтрации нефти и воды как двух несмешивающихся жидкостей.
4. Постройте схематично и проанализируйте диаграмму относительных фазовых проницаемостей для нефти и воды.
5. Как по диаграмме относительных фазовых проницаемостей для нефти и воды определить характер смачиваемости породы?
6. В чём заключается физический смысл функции Бакли-Леверетта? Приведите выражение и постройте график функции Бакли-Леверетта.
7. В расчёте каких показателей вытеснения участвуют значение фронтальной водонасыщенности и производная функции Бакли-Леверетта, соответствующая этому значению?
8. Как влияет на эффективность процесса вытеснения соотношение вязкостей воды и нефти (вытесняющей и вытесняемой фаз)?