

## ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ВОДОНЕФТЯНОГО КОНТАКТА В ОДНОРОДНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Б. Е. Кисиленко

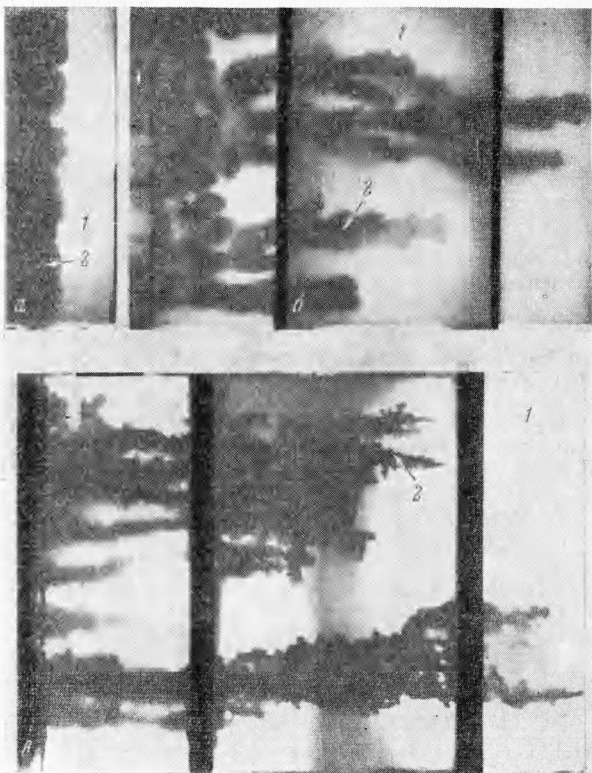
(Москва)

На основе экспериментального исследования устойчивости продвижения границы раздела двух несмешивающихся жидкостей в однородной пористой среде установлено, что для данного отношения вязкостей существует определенный диапазон скоростей, при которых граница раздела движется устойчиво, т. е., помимо верхнего предела устойчивости [1,2,3], установлено существование нижнего предела устойчивости. Снижение скорости вытеснения ниже этого предела устойчивости приводит к уменьшению коэффициента нефтеотдачи пласта. Показана роль капиллярных и вязкостных сил в диапазоне устойчивости и за его пределами.

Эксперименты были выполнены на насыщенных моделях. Моделью пористой среды служило молотое стекло с гидрофильной поверхностью, моделью нефти — вазелиновое масло, разбавленное неполярным керосином. Модель нефти вытеснялась дистиллированной водой. Поверхностное натяжение на границе модели нефти с дистиллированной водой составляло 35—40 эрг / см<sup>2</sup>. Проницаемость пористой среды равнялась 4 дарси.

Объемная прозрачность модели достигалась добавкой в вытесняемую фазу альфабромнафталина. Начальная водонасыщенность пористой среды не моделировалась.

Опыты проводились при различных скоростях вытеснения и отношениях вязкостей вытесняемой и вытесняющей жидкостей при прочих равных условиях. При этом менее вязкая жидкость вытесняла более вязкую, т. е. отношение вязкостей вытесняемой и вытесняющей жидкостей всегда было больше единицы.



Фиг. 1. Фронт вытеснения в однородной пористой среде (отношение вязкостей  $\mu_2 / \mu_1 = 12.5$ ): 1 — модель нефти, 2 — вода; а — устойчивое состояние границы раздела (скорость фильтрации  $v = 0.008$  см / сек), б — вязкостная неустойчивость ( $v = 0.01$  см / сек), в — капиллярная неустойчивость ( $v = 0.0008$  см / сек)

В общем случае устойчивость фронта вытеснения в однородной пористой среде, по-видимому, определяется следующими факторами: 1) капиллярными силами, 2) вязкостными силами, 3) скоростью вытеснения, 4) структурой порового пространства, 5) гравитационными силами.

Влияние гравитационных сил на устойчивость границы раздела в предлагаемой работе не исследовалось.

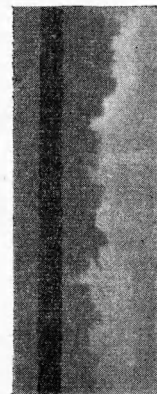
В диапазоне устойчивого перемещения границы раздела взаимодействие вязкостных и капиллярных сил таково, что фронт вытеснения движется равномерно (фиг. 1, а). В области высоких скоростей в диапазоне устойчивости капиллярные силы способствуют устойчивому продвижению поверхности раздела. По мере приближения скорости к верхнему пределу устойчивости при прочих равных условиях относительная величина капиллярных сил по сравнению с вязкостными уменьшается.

Верхний предел устойчивого продвижения фронта вытеснения четко прослеживается при любых отношениях вязкостей. Граница раздела будет всегда неустойчивой, когда скорость вытеснения станет превышать критическую, а длина волны возмущения

будет больше некоторой критической величины, зависящей от поверхностного натяжения на границе нефти с водой [1, 2]. При превышении критической скорости капиллярные силы уже не в состоянии поддерживать равномерное устойчивое перемещение фронта вытеснения. Поэтому в пористых средах формируются языки менее вязкой жидкости, проникающие в более вязкую. Это явление изучалось как на щелевых лотках [1, 2], так и на моделях пористой среды [1, 3]. На фиг. 1, б зафиксированы языки, формирование которых обусловлено, главным образом, действием вязкостных сил. В рассматриваемом эксперименте модель нефти вязкостью 12.5 *сП* вытеснялась со скоростью 0.01 *см / сек*. Непосредственной причиной нарушения устойчивости поверхности раздела при скорости выше критической являются малые возмущения на фронте вытеснения, которые обуславливаются микронеоднородностью пористой среды. При устойчивом продвижении водонефтяного контакта местные возмущения на границе раздела практически не влияют на форму фронта вытеснения.

Непосредственное наблюдение за процессом вытеснения позволяет считать, что разрастание вязкостных языков по мере движения вытесняющей фазы вдоль модели пористой среды будет уменьшаться из-за снижения фазовых проницаемостей жидкостей в зоне, занятой языками.

Фиг. 2. Развитие микроязыков на фронте вытеснения. Отношение вязкостей  $\mu_2 / \mu_1 = 1.15$



Если верхний предел устойчивости поверхности водонефтяного контакта экспериментально можно установить в достаточной степени точно, то нижний предел, ввиду постепенного нарушения устойчивости границы раздела, выявить сложнее. При низких скоростях вытеснения на фронте под действием капиллярных сил начинают образовываться микроязыки. Это хорошо видно на фотографии, приведенной на фиг. 2. Формирование этих языков определяется неоднородностью пор по размерам. Известно, что такая микронеоднородность присуща даже однородным пористым системам, изготовленным в лабораторных условиях. В данном эксперименте (фиг. 2) микроязыки по мере продвижения фронта не разрастались, что, по-видимому, объясняется достаточно большой величиной вязкостных сил. В области низких скоростей диапазона устойчивости вязкостные силы противодействуют развитию неустойчивости. При дальнейшем снижении скорости вытеснения капиллярные силы начинают оказывать доминирующее влияние на формирование фронта вытеснения. В этих условиях в зависимости от неоднородности пор по размерам возможно образование больших языков менее вязкой жидкости, проникающих в более вязкую. На фиг. 1, в приведен снимок, полученный при вытеснении модели нефти водой со скоростью 0.0008 *см / сек* и отношении вязкостей  $\mu_2 / \mu_1 = 12.5$ . На этом снимке отчетливо видны языки воды, проникающие в нефть под действием капиллярных сил.

Таким образом, если развитие неустойчивости при превышении верхнего предела определяется в основном вязкостными силами — область вязкостной неустойчивости (в американской литературе для этого явления принят термин *viscous fingering*), то развитие неустойчивости при скоростях, меньших нижнего предела, объясняется, главным образом, действием капиллярных сил; эту область можно назвать областью капиллярной неустойчивости. В области капиллярной неустойчивости за счет образования мелких щеликов нефтеотдача снижается. Поэтому, с точки зрения нефтеотдачи, малые скорости вытеснения неблагоприятны.

В заключение автор благодарит Г. И. Баренблатта и А. А. Кочешкова за постановку задачи и ценные советы при выполнении работы.

Поступила 28 VI 1961

#### ЛИТЕРАТУРА

1. C h u o k e R. L., van M e u r s P., van der P o e l C. The instability of slow, immiscible, viscous liquid — liquid displacements in permeable media. Trans. AIME, v. 216.
2. S a f f m a n, T a y l o r G. The penetration of a fluid into a porous medium or Hele — Shaw cell containing a more viscous liquid. P. R. S.
3. V a n M e u r s. The use of transparent three — dimensional models for studying the mechanisms of flow processes in oil reservoirs. Trans. AIME, v. 210.