

УДК 532.546

© 2005 г. Н. А. БАРЫШНИКОВ, Г. В. БЕЛЯКОВ, С. Б. ТУРУНТАЕВ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫТЕСНЕНИЯ
ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ ИЗ ПОРИСТЫХ СРЕД**

Представлены результаты экспериментальных исследований течений развязкостных и несмешивающихся ньютоновских жидкостей в пористых средах. Исследования проводились на ячейке Хеле–Шоу, заполненной пористым материалом. Основное отличие от предыдущих работ – наблюдение за течением после прорыва вытесняющей жидкости к стоку. В ходе экспериментальных исследований получен ряд качественных и количественных результатов, поясняющих физику течения несмешивающихся жидкостей в капиллярах и пористых средах.

Ключевые слова: неустойчивость вытеснения, ячейка Хеле–Шоу, капилляр, вязкие несмешивающиеся жидкости.

При интенсификации добычи нефти путем вытеснения ее из коллектора водой вода обычно прорывается к устью скважины, оставляя в коллекторе значительную часть нефти. Исследованию этого явления посвящен ряд теоретических и экспериментальных работ, в том числе изучение двухфазных течений жидкостей в моделях пористого вещества, представляемого или ячейкой Хеле–Шоу, или отдельным капилляром [1,2]. В обоих случаях течение в среднем подчиняется закону Дарси–Пуазейля. Исследования, проведенные на плоской ячейке Хеле–Шоу, показали, что при вытеснении одной жидкости другой с меньшей вязкостью начальный фронт вытеснения становится неустойчивым. По ширине ячейки образуется струя (“палец”) вытесняющей жидкости той или иной ширины [1]. Без учета поверхностного натяжения граница раздела устойчива, если

$$\left(\frac{\mu_1}{k_1} - \frac{\mu_2}{k_2}\right)V + (\rho_1 - \rho_2)g > 0$$

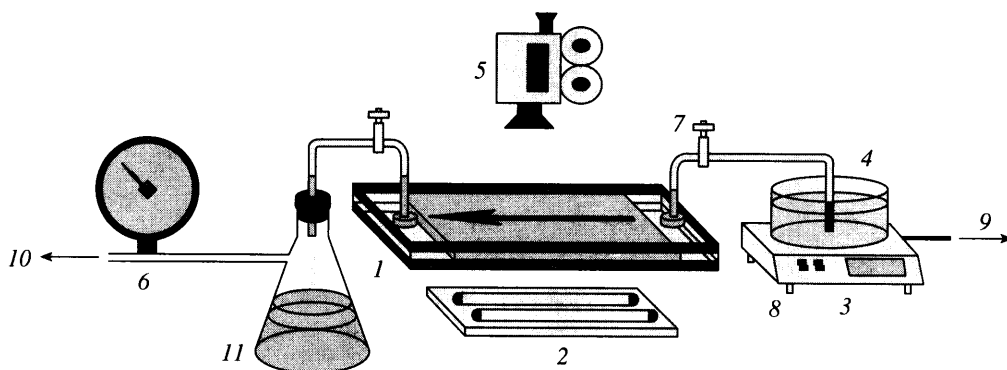
при противоположном неравенстве граница неустойчива.

Здесь индекс 1 относится к вытесняющей жидкости, индекс 2 – к вытесняемой жидкости, g – составляющая ускорения свободного падения на направление движения жидкости со скоростью V ; μ , k и ρ – соответственно вязкость, проницаемость и плотность жидкостей. Физическая суть появления “пальца” вытесняющей жидкости связывается с возникновением на поверхности раздела жидкостей возмущений в виде капиллярных волн, длина которых определяется соотношением вязкостных и капиллярных сил. Так, неустойчивость может появиться только при длине волны возмущения больше критической:

$$\lambda > \lambda_c = 2\pi \sqrt{\frac{Tk}{\mu_1 V (1 - \mu_2/\mu_1)}}$$

Здесь T – коэффициент поверхностного натяжения.

Максимальный коэффициент усиления неустойчивости достигается на длинах волн, близких к величине $\lambda = \sqrt{3} \lambda_c$.



Фиг. 1. Схема установки: 1 – ячейка Хеле–Шоу с поролоновым наполнителем, 2 – лампа для подсветки ячейки, 3 – весы, 4 – кювета, 5 – видеочкамера, 6 – манометр, 7, 8 – кран, 9 – компьютер, 10 – выход к насосу, 11 – сосуд для сбора жидкости

Обычно в экспериментах с “пустой” ячейкой Хеле–Шоу, когда толщина щели много меньше критической длины волны, фронт раздела неустойчив по ширине ячейки, но устойчив по толщине щели.

Исследования течений в капиллярах показали [3, 4], что вытесняющая менее вязкая жидкость движется в центральной части капилляра и оставляет за собой пленку более вязкой жидкости, “прилипшую” к стенкам капилляра. Толщина пленки зависит от соотношения вязкостных и капиллярных сил. В обоих случаях (ячейка Хеле–Шоу и капилляр) с ростом капиллярного числа (например, с увеличением скорости вытеснения) количество невытесненной жидкости как в экспериментах, так и по теории стремится к половине ее первоначального содержания [1–4].

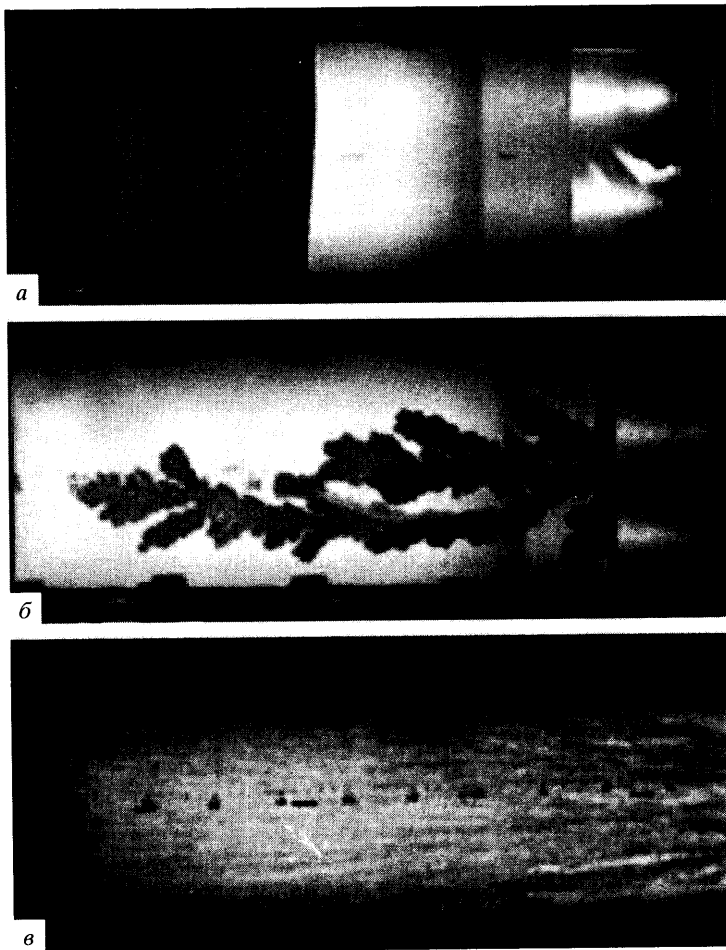
В работах [5, 6] исследуется влияние нелинейно-вязких и упруговязких свойств жидкостей на устойчивость как плоских так и радиальных фронтов вытеснения в ячейке Хеле–Шоу. Предсказывается, что вид формирующихся структур вытеснения чувствителен к реологическим особенностям жидкостей.

Цель настоящей работы – исследовать картину вытеснения ньютоновской жидкости из ячейки Хеле–Шоу, щель которой заполнена пористым веществом с размером пор меньше критической длины капиллярной волны.

1. Методика проведения эксперимента. В качестве модели пористой среды использован лист поролона размерами $820 \times 180 \text{ мм}^2$ и толщиной 5 мм, сжатый до толщины $b = 1 \text{ мм}$ между двумя стеклянными пластинами, расположенными горизонтально. Несжатый поролон представляет собою объемное плетение полиуретановых нитей толщиной 0.05 мм, средним расстоянием между противоположными нитями около 0.5 мм и пористостью 0.975. К выходному отверстию ячейки (устью) через емкость для сбора жидкости подключен вакуумный насос, позволяющий создавать перепад давления до 1 атм. Входное отверстие ячейки посредством тонкостенной трубки соединялось с открытой кюветой с закачиваемой жидкостью, находящейся под атмосферным давлением. Вес закачиваемой жидкости регистрировался консольными электронными весами (с точностью до 0.01 г), подключенными к компьютеру. Такая схема позволяла регистрировать расход закачиваемой жидкости в непрерывном режиме. Картина течения в ячейке снималась видеочкамерой.

На ячейке Хеле–Шоу с поролоновым наполнителем проведены опыты по вытеснению минерального масла водой при перепадах давления $\delta P = 0.2, 0.5$ и 0.9 атм .

На первом этапе каждого эксперимента ячейка заполнялась вакуумным минеральным маслом марки ВМ-6 плотностью $\rho_m = 0.87 \text{ г/см}^3$ и динамической вязкостью $\mu = 0.9 \text{ г/с} \cdot \text{см}$ или маслом ВМ-1 плотностью $\rho_m = 0.86 \text{ г/см}^3$ и динамической вязкостью $\mu = 1.53 \text{ г/с} \cdot \text{см}$. Заполнение проводилось путем откачки насосом воздуха из колбы, соединенной со стоком ячейки, как показано на фиг. 1. Во избежание образования пузырьков воздуха внутри ячейки, масло предвари-



Фиг. 2. Невозмущенный фронт раздела масло (справа) – воздух (слева) (а), ветвистая структура фронта раздела вода (справа) – масло (слева) (б), равномерно заполненная смесь воды и масла ячейка (в)

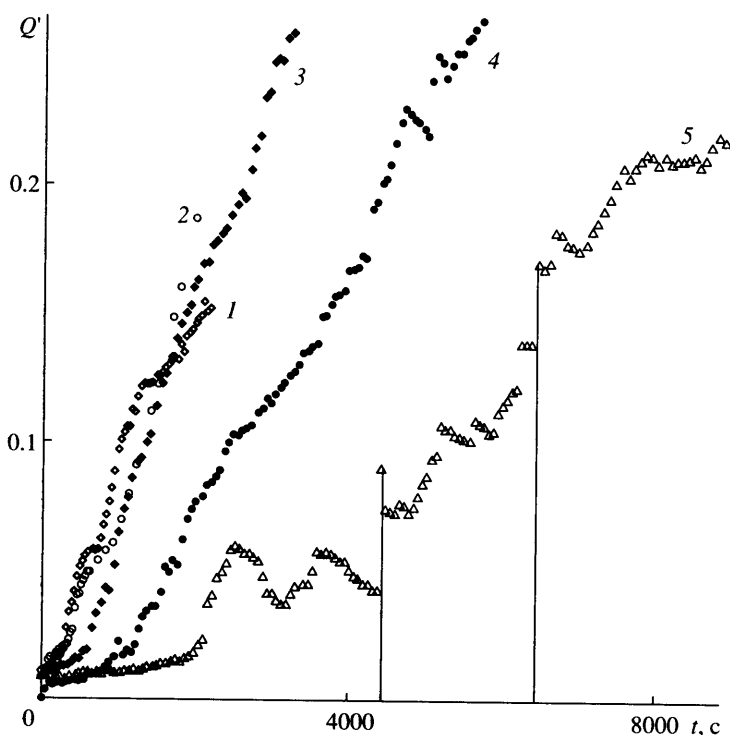
тельно кипятилось при давлении 10^{-3} мм рт.ст. и температуре около 200°C . В течение всего времени заполнения фронт масло–воздух оставался гладким (фиг. 2,а).

После окончания заполнения производилась прокачка масла через ячейку при разных перепадах давления. Во время прокачки регистрировалось изменение расхода масла во времени и по закону Дарси определялась проницаемость ячейки. Перепад давления на трубках не учитывался из-за того, что их проницаемость много больше проницаемости ячейки.

Проницаемость ячейки определялась по формуле

$$k = \frac{Q_e \mu}{\rho_m S_0 |\delta P / L|}$$

где $S_0 = 1.8 \text{ см}^2$, $L = 82 \text{ см}$. По окончании заполнения ячейки маслом, масло в кювете заменялось водой. После открытия кранов (7, 8, фиг. 1) вода начала поступать в ячейку, вытесняя масло. Картина течения регистрировалась на видеокамеру; одновременно фиксировались координата переднего кончика водяной струи и расход воды. Картина течения и расход жидкости фиксировались и после прорыва воды к устью ячейки. В опыте при перепаде давления 0.2 атм. из-за большой длительности эксперимента прокачка воды производилась в три этапа с перерывом в несколько дней.



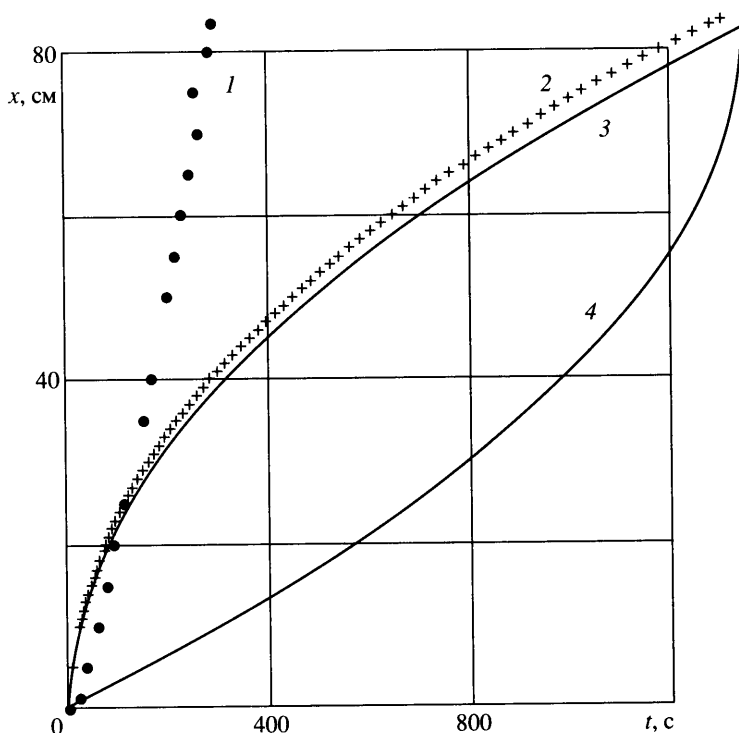
Фиг. 3. Зависимость безразмерных расходов воды $Q' = Q/Q_0$ через ячейку от времени t (δP атм., μ г/с \cdot см) = (0.9, 0.9); (0.9, 0.9); (0.5, 0.9); (0.5, 1.53); (0.2, 0.9) – данные 1–5. Вертикальные линии соответствуют временным остановкам закачки, Q_0 – расход воды через чистую ячейку

2. Результаты и обсуждение экспериментов. Размер пор наполнителя в среднем не превышал 0.5 мм. Другими словами, максимально возможная полудлина возмущающей волны, определяемая размером пор, на порядок меньше критической длины волны, полученной по теории Саффмэна–Тейлора, т.е. следовало ожидать, что граница раздела жидкостей в опытах будет устойчивой. Реально же оказалось, что фронт вытеснения в ячейке двигался в виде ветвящейся струи, причем скорости “ветвей” воды, последовательно отходящих вбок от стволовой части струи, со временем заметно падали (фиг. 2б), а на кончиках ветвей вода часто собиралась в капли. Чем больше был перепад давления, тем меньше становилась толщина “ветвей”.

В дальнейшем водяной поток при всех перепадах давления не оставался в границах проделанного в масле русла. Сразу после того, как струя воды достигала выхода из ячейки, застывшие боковые “ветви” начинали последовательно продвигаться по потоку, не смешиваясь с основным руслом и друг с другом. Со временем отдельные “капли” и струйки воды равномерно заполняли всю ячейку (фиг. 2,в), а расход воды через ячейку постепенно увеличивался (фиг. 3). Временное уменьшение расхода воды на некоторых участках графика соответствует выходу отдельных струек из устья ячейки.

На фиг. 4 приведены кинематические данные движения масляного фронта, полученные при вытеснении воздуха маслом и масла водой при перепаде давления $\delta P = 0.9$ атм., и их сравнение с данными, полученными по теории независимых капилляров [7].

Представляет определенный интерес сравнить картину вытеснения масла водой из “пористой” ячейки Хеле–Шоу и капилляра. С этой целью были проведены дополни-

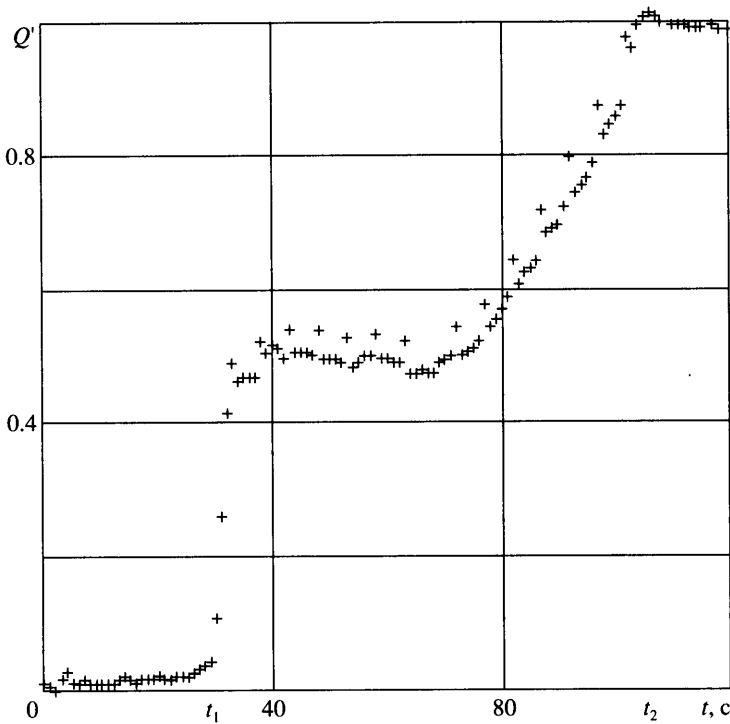


Фиг. 4. Зависимость от времени координаты конца струи воды при вытеснении масла (1), зависимость от времени координат фронта раздела масло–воздух при пропитке ячейки (2), те же зависимости, полученные из закона Дарси (3, 4)

тельные опыты по вытеснению масла водой из капиллярной трубки длиной 752 мм с диаметром отверстия 1.1 мм. За проходящим по капилляру фронтом раздела жидкостей оставался слой масла, прилегающий к стенкам капилляра. Этот слой легко обнаруживался, если выровнять давление на концах трубки: спустя небольшой промежуток времени под действием поверхностных сил несмешивающиеся жидкости каплями собирались вдоль капиллярной трубки. Сразу после прорыва воды к выходу из капилляра на всей поверхности прилегающего слоя масла возникала движущаяся мелкая волновая рябь. Из наблюдений следовало, что бегущие волны возникали только после того, как водяная струя выходила к концу капилляра и одновременно с этим исчезал мениск на переднем кончике водяной струи.

Граница возмущенного рябью слоя масла продвигалась от входа в капилляр к его выходу, оставляя за собой чистую поверхность трубки. Со временем масло из капилляра полностью вытеснилось, а расход воды стал соответствовать расходу через чистый капилляр. Время “очистения” капиллярной трубки было примерно в два с половиной раза больше времени прохождения фронтом раздела жидкостей всей длины капилляра. График расхода воды через капилляр от времени при перепаде давления 0.2 атм. показан на фиг. 5.

Если перепад давления на концах капилляра уменьшить на порядок, то толщина остающегося за фронтом вытеснения слоя масла становилась настолько малой, что после выравнивания давления на концах капилляра ни масло, ни вода не собирались в капли, а расход воды сразу после ее выхода из капилляра соответствовал расходу через чистый капилляр.



Фиг. 5. Зависимость безразмерного расхода воды $Q' = Q/Q_0$ через капилляр от времени t ($Q_0 = 0.94$ г/с). Момент входа воды в капилляр ($t = 0$ с), момент выхода воды из капилляра ($t_1 = 29$ с), момент полного очищения капилляра ($t_2 = 102$ с)

Кинематика вытеснения воздуха маслом из ячейки Хеле–Шоу с поролоновым наполнителем хорошо описывается моделью независимых капилляров [7] (фиг. 4). Время вытеснения маслом воздуха, вычисленное по этой модели $t = 1/2L^2(\mu_1 + \mu_2)/(k\delta P)$ фактически соответствует измеренному в эксперименте. Однако при вытеснении масла водой полное время прохождения ячейки самой быстрой струйкой воды в несколько раз меньше времени, предсказанного моделью независимых капилляров. Более быстрое движение водяной струи в ячейке, заполненной маслом, обусловлено значительным снижением сопротивления движению, возникающим из-за малого поперечного размера струи относительно полной ширины ячейки. Похожая картина наблюдается при вытеснении масла водой и воды маслом из одиночного капилляра. Время заполнения капилляра маслом и время вытеснения маслом воды совпадают со временем, рассчитанным для капилляра с проницаемостью $k = r^2/8$, где r – радиус отверстия капилляра. Однако при вытеснении из капилляра масла водой время прохождения струйки воды от начала капилляра к его концу меньше ожидаемого.

Причиной данного расхождения во временах движения границы раздела жидкостей является слой масла, прилегающий к стенке капилляра, образование которого исследовано в экспериментальной работе [4]. Из этой работы следует, что при вытеснении масла водой из капиллярной трубки, когда величина капиллярного числа становится больше единицы ($\mu U/T > 1$), относительная величина прилипшего к стенке масляного слоя h_0/r стремится к 0.3, т.е. при больших скоростях вытеснения водой масла из капилляра около половины от первоначального количества масла, заполнявшего капил-

ляр, остается на его стенках. Если U – скорость движения передней границы раздела жидкостей в капиллярной трубке, а V – средняя скорость вытесняемой жидкости, то из равенства расходов впереди и сзади границы раздела жидкостей следует, что

$$\frac{V}{U} = \left(1 - \frac{h_0}{r}\right)^2$$

В другом предельном случае (малых скоростей вытеснения), когда капиллярные силы становятся больше вязкостных сил $\mu U/T \ll 1$, толщина прилипшей пленки стремится к нулю, а скорости вытесняющей и вытесняемой жидкостей сравниваются. В этом случае картина вытеснения становится схожей с рассмотренным выше движением несмешивающихся жидкостей в модели изолированных капилляров при условии полного вытеснения одной жидкостью другой.

В отличие от случая, рассмотренного в [4], в проведенном эксперименте масло, заполняющее капилляр, удавалось полностью вытеснить и при больших скоростях водяной струи, при которых, однако, еще не возникает турбулентность ($Re < 1500$). Механизм вытеснения при этом принципиально отличался от механизма, описываемого капиллярной моделью: слой масла, остававшийся после прорыва водяной струи, затем вымывался из капилляра бегущими по поверхности раздела масло–вода волнами. Подобный волновой механизм течения при постоянном расходе в тонком слое вязкой жидкости рассматривался в работе [8].

В пористой, заполненной маслом ячейке после выхода первой водяной струи к устью ячейки бегущих волн, наблюдавшегося в капилляре, не возникало, а ячейка последовательно заполнялась отдельными водяными струйками. Когда ячейка равномерно заполнилась водой и стало не видно перемещений границ раздела воды и масла, количество оставшегося в ячейке масла составило около 25% от первоначального, а отношение расхода воды к расходу в чистой от масла ячейке составило 0.2–0.25. К этому времени содержание масла в выходящей из ячейки жидкости стало менее 1%. Поэтому на данном последнем этапе вытеснения течение можно считать почти неизменным во времени и по всей ячейке. Вода течет по системе капилляров, проделанных ею в пропитанной маслом пористой среде.

Таким образом, в ячейке Хеле–Шоу, щель которой заполнена пористым веществом с размером пор меньше критической длины волны, граница вытеснения вязкой жидкости остается неустойчивой. На этом первом этапе вытеснения образуются древообразные структуры поверхностей раздела жидкостей, первоначальный вид которых определяется не столько гидродинамикой, сколько конструкцией пористого вещества. Поэтому ни капилляр, ни пустая ячейка Хеле–Шоу не могут в полной мере моделировать вытеснение вязкой жидкости из пористого коллектора.

Заключение. Эксперименты, проведенные на заполненной пористым веществом ячейке Хеле–Шоу, подтвердили положение теории Саффмэна–Тейлора о неустойчивости фронта вытеснения, когда менее вязкая жидкость вытесняет более вязкую. Однако картина неустойчивого течения определяется не длиной возмущающей течение капиллярной волны, а геометрией пористого пространства.

После выхода первой струи вытесняющей жидкости к стоку ячейка равномерно заполняется последующими струями вытесняющей жидкости тем быстрее, чем больше перепад давления.

Эксперимент по вытеснению из капилляра масла водой выявил возможность полной очистки капилляра от масла, связанную с возникновением волнообразного течения после выхода вытесняющей жидкости к устью капилляра. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 03-05-64625 и НШ-567.2003.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Saffman P.G., Taylor G.I.* The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid. // Proc. Roy. Soc. Lond. on. ser. A. 1958. V. 245. № 1242. P. 312–329.
2. *Park C.-W., Homsy G.M.* Two-phase displacement in Hele Shaw cells: Theory // J. Fluid Mech. 1984. V. 139. P. 291–308.
3. *Bretherton F. P.* The motion of long bubbles in tubes. // J. Fluid Mech. 1961. V. 10. Pt 2. P 166–188.
4. *Taylor G. I.* Deposition of a viscous fluid on the wall of a tube. // J. Fluid Mech. 1961. V. 10. Pt 2. P. 161–165.
5. *Бернадинер М.Г., Ентов В.М.* Гидродинамическая теория фильтрации аномальных жидкостей. М: Наука, 1975. 199 с.
6. *Городцов В.А., Ентов В.М.* Неустойчивость фронтов вытеснения неньютоновских жидкостей в ячейке Хеле–Шоу. // ПИММ. 1997. Т. 61. № 1. С. 115–131.
7. *Washburn E.W.* The dynamics of capillary flow. // Phys. Rev. 1921. V. 17. № 3. P. 273–283.
8. *Каница П.Л.* Научные труды. Физика и техника низких температур. М: Наука, 1989. 392 с.

Москва

Поступила в редакцию
13.V.2004