

03

Особенности течения дисперсии из микрокапель воды в микроканалах

© А.Т. Ахметов, С.П. Саметов

Институт механики Уфимского научного центра РАН
E-mail: alfir@anrb.ru

Поступило в Редакцию 17 июня 2010 г.

Обнаружено удивительное свойство обратных водоуглеводородных эмульсий, проявляющееся при течении в микроканалах, названное эффектом динамического запираания. Суть эффекта состоит в том, что течение эмульсии через участок микроканала со временем прекращается, несмотря на постоянно действующий перепад давления. Экспериментальные результаты показывают, что эффект наблюдается при течении различных по составу и реологическому поведению эмульсий. Показано, что эффект проявляется при весьма существенных градиентах давления, хотя и происходит частичное разрушение дисперсий. Предложен физический механизм запираания водоуглеводородных эмульсий в микроканалах, связанный с взаимодействием наноразмерных оболочек микрокапель воды.

Дисперсию из микрокапель воды, находящихся в углеводороде, принято называть обратной водоуглеводородной эмульсией. В частности, в нефтяной промышленности при глушении скважин в качестве блокирующей пачки и в потокоотклоняющих технологиях при добыче нефти используются системы из микрокапель воды в нефти (инвертная водонефтяная эмульсия), микрокапель воды в дизельном топливе (жидкость глушения). Стабильность таких систем обеспечивается природными либо искусственными эмульгаторами из поверхностно-активных веществ (ПАВ).

В гидродинамическом плане основной отличительной особенностью дисперсий является их большая вязкость по сравнению с вязкостью несущей фазы, этим же свойством обладают и рассматриваемые нами эмульсии. При течении эмульсий в капиллярных структурах, микроканалах различной конфигурации обнаруживается совершенно неожиданный эффект динамического запираания, который состоит в том, что течение эмульсии со временем прекращается, несмотря на постоянно действующий перепад давления. Такое название эффект получил ввиду того, что, несмотря на визуальную остановку течения, в микромасштабе

поток обнаруживается, но с гораздо меньшим расходом, расход течения снижается на 3–4 порядка и совсем с другой структурой течения микропотоков. Следует отметить, что во всех случаях проявления эффекта динамического запираания, изученных нами, размеры микрокапель более чем в 10 раз меньше характерных поперечных размеров каналов.

Эффект динамического запираания был обнаружен при течении концентрированных обратных водонефтяных эмульсий в плоском микроканале — ячейке Хили–Шоу с зазором $17\ \mu\text{m}$ между двумя толстыми оптическими стеклами, размеры ячейки $4 \times 2\ \text{cm}$ [1,2]. При течении в плоском микроканале этот эффект проявляется наиболее красочно и наглядно (рис. 1). Из двух различных обратных водонефтяных эмульсий одна (стабилизированная) обладала свойствами реопексии, в ней нефтяная фаза содержала искусственный эмульгатор, другая — тиксотропная, без искусственного эмульгатора. В обоих случаях концентрация водной фазы была 75%, размеры микрокапель воды в первом случае $0.3\text{--}1\ \mu\text{m}$, во втором — $1\text{--}2\ \mu\text{m}$. Ячейка Хили–Шоу располагалась горизонтально, водная дисперсия подавалась и выводилась через отверстия в верхнем оптическом стекле. Зависимость объема протекающей жидкости от времени фиксировалась по показаниям электронных весов, связанных с компьютером, картина структуры течения снималась на видеокамеру.

Вызывает удивление, что наряду со стабилизированной эмульсией, „упрочняющейся“ по мере движения, эмульсия без искусственного стабилизатора, разрушаясь по мере движения (выделяется водная фаза), также запирает ячейку Хили–Шоу (рис. 1, *b*). При течении стабилизированной эмульсии формируются трубки тока, далее происходит хаотизация структуры, образование линий „изобар“, и течение замирает (рис. 1, *a*). В случае эмульсии без искусственного стабилизатора происходит интенсивное выделение водной фазы в результате коалесценции микрокапель воды. Со временем выделившаяся водная фаза приобретает нитевидную структуру, течение останавливается.

Возникают вопросы, как будет влиять на проявление эффекта запираания изменение толщины зазора, перепада давления, в чем причины запираания (значение входа и объема ячейки). Чтобы проверить универсальность проявления эффекта, варьировать параметрами, можно рассмотреть более простую постановку, например осесимметричное течение через цилиндрический микроканал, и далее рассмотреть поведение эмульсии в системе сложных микроканалов. Оказалось, что в цилиндрических капиллярах также наблюдается эффект динамического

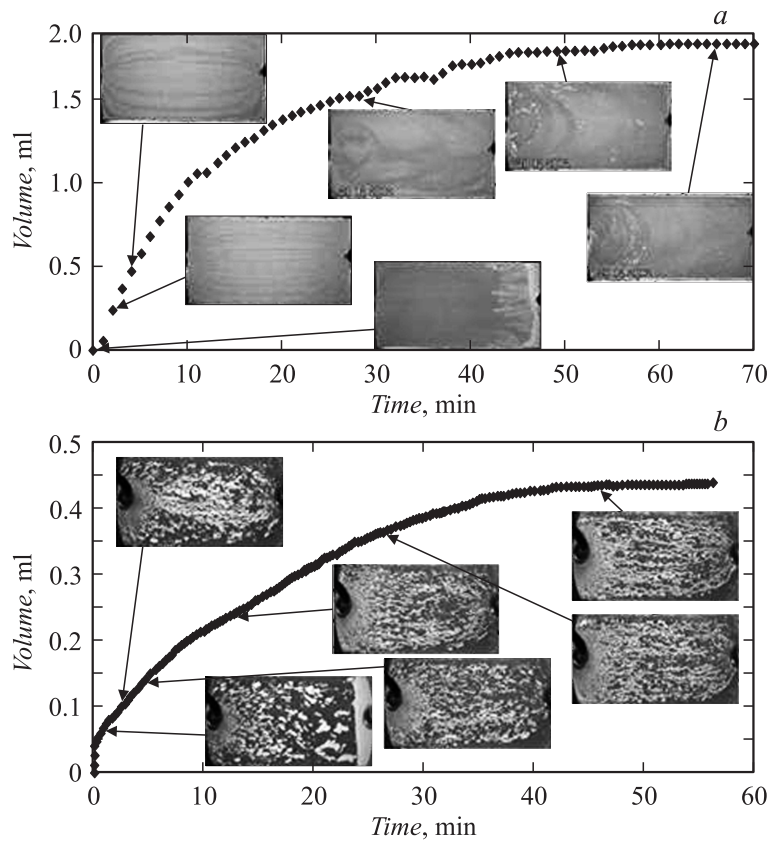


Рис. 1. Зависимость объема протекшей эмульсии от времени в ячейке Хили–Шоу с кадрами, отображающими структуру течения эмульсии в ячейке в различные моменты времени: *a* — стабилизированная искусственным эмульгатором эмульсия, перепад давления 100 кПа; *b* — эмульсия без искусственного эмульгатора, перепад давления 200 кПа.

запирания [2]. Но существуют определенные границы проявления эффекта в зависимости от диаметра капилляра. К примеру, при диаметре капилляра $600\ \mu\text{m}$ эффекта запирания мы не обнаружили, при диаметрах 250 , 100 , $40\ \mu\text{m}$ эффект был зарегистрирован.

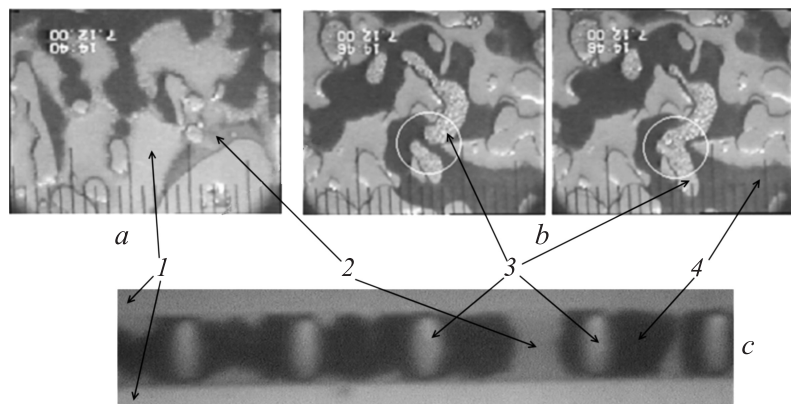


Рис. 2. Движение эмульсии в капиллярной структуре микромодели (*a, b*, градиент давления направлен снизу вверх) и в отдельном капилляре (*c*). Цифрами обозначены: 1 — эмульсия, 2 — вода, 3 — нефть, 4 — скелет породы (не вытравленная часть стекла).

Детальное изучение структуры течения под микроскопом по всей длине канала обнаруживает, что одновременно со снижением скорости потока по всей длине капилляра появляются капли воды, размеры которых сопоставимы с диаметром капилляра, течение переходит в поршневой режим [3]. Достаточно быстро устанавливается четочная, чередующаяся структура, при этом расстояние между каплями по всей длине практически одинаково, и вся эта структура, напоминающая шлагбаум, очень медленно ползет. Скорость потока становится на 2–3 порядка ниже относительно первоначальной и продолжает замедляться, по прошествии длительного времени скорость потока падает еще на 1–2 порядка. К этому времени происходит частичная деструкция эмульсии, выделение водной и несущей нефтяной фаз в микроканале (рис. 2), скорость течения ничтожно мала ($0.2 \mu\text{m/s}$). Можно попытаться объяснить эффект за счет поверхностных сил, как в случае с пенами. В стеклянном капилляре длиной 4 см образуется около 200 менисков на каплях воды; нужно отметить, что на рис. 2, *c* не наблюдается никакой разницы между отступающим и наступающим углами, разница между которыми определяла бы сопротивление движению капель. Тем не менее даже при грубой оценке сверху по

формуле Лапласа со значением поверхностного натяжения на границе воды с несущей фазой 5 mN/m суммарный перепад давления будет составлять 40 kPa , что на порядок меньше перепада давления при динамическом запираании.

В качестве сложной капиллярной структуры была использована система каналов, отображающих картину пор аншлифа нефтеносного керна, изготовленная методом избирательного химического травления. Полученную таким образом модель в мировой практике принято называть микромоделью [4]. Отличительной особенностью нашей микромодели является ее разборность за счет использования оптических пластин с высокой плоскостностью поверхностей, которые сажаются на оптический контакт [5]. При течении эмульсии в микромоделю при постоянно действующем перепаде давления также обнаруживается динамическое запираание. При нагнетании эмульсии в микромодель происходит некоторое расслоение фаз [6]. Вязкость несущей фазы (нефти) существенно меньше вязкости эмульсии, при больших градиентах давления некоторая часть нефти фильтруется между микрокаплями воды и выходит вперед (рис. 2, *a*). В эмульсии, протекающей по каналам сложной конфигурации, микрокапли воды коалесцируют, выделяется водная фаза, которая течет по каналам со скоростью, существенно превышающей скорость эмульсии, при этом образовавшиеся представительные капли водной фазы продолжают сливаться друг с другом (рис. 2, *b*). Аналогичная картина течения наблюдается в отдельном капилляре, но после наступления запираания (рис. 2, *c*). На рис. 2, *a* и *b* в нижней части кадров видна шкала объект-микрометра с ценой деления $10 \mu\text{m}$, диаметр капилляра на рис. 2, *c* соответствует $100 \mu\text{m}$. Скелет породы соответствует не вытравленной части стекла, аналогичен стенкам капилляра, на фотографиях — наиболее светлые участки.

Многочисленные эксперименты с механическим воздействием на входную зону капилляра показали, что основной причиной запираания эмульсий является структура у входа в капилляр, образующаяся в трубке, подводящей эмульсию к капилляру, протяженность этой структуры не превышает $500 \mu\text{m}$. Образование такой структуры возможно при действии силы трения между микрокаплями воды, на поверхности которых находятся молекулы ПАВ длиной $\sim 3 \text{ nm}$, расположенные перпендикулярно к поверхности [7]. С такой оболочкой из молекул ПАВ микрокапли воды подобны „ежику“.

При осесимметричном течении в цилиндрическом микроканале по мере уменьшения его длины возрастает усредненный градиент

давления. Мы решили максимально уменьшить длину канала, при этом стеклянный капилляр заменили отверстием в металлической фольге толщиной $100\ \mu\text{m}$. Фольга с отверстием припаивалась к торцу медной трубки с внутренним диаметром $1.5\ \text{mm}$, на которую одевалась полиэтиленовая трубка. Таким образом, был изготовлен предельно укороченный капилляр длиной $100\ \mu\text{m}$, диаметром $100\ \mu\text{m}$, в этом случае при перепаде давления $300\ \text{kPa}$ усредненный градиент давления в канале будет $3\ \text{GPa/m}$. Оказалось, что в укороченном капилляре также обнаруживается эффект динамического запираания в диапазоне от 50 до $300\ \text{kPa}$, характерные зависимости приведены на рис. 3, *a*. Значения времени до запираания при одних и тех же перепадах давления с той же самой эмульсией в различных экспериментах отличаются друг от друга ввиду сложности механизма запираания, хотя начальные значения расходов жидкостей одинаковы. При течении эмульсии через капилляры ее начальный расход соответствовал значениям, определяемым эффективной вязкостью, то же было в укороченном капилляре при градиентах давления до $50\ \text{MPa/m}$. Увеличение градиента давления до $3\ \text{GPa/m}$ приводило к нелинейному росту расхода, который возрастает до значений, близких к расходу воды (рис. 3, *b*). Это связано с образованием подслоя воды из микрокапель эмульсии на стенке канала. Самое удивительное, что, несмотря на разрушение эмульсии на стенке, запираание на таком коротком канале наступает, и гораздо раньше, чем в четырехсантиметровом капилляре такого же диаметра. Если при градиентах давления до $50\ \text{MPa/m}$ значения расходов при определенном перепаде давления практически равны, то при высоких градиентах давления происходит разброс в значениях расхода, что, по всей видимости, связано с нестабильностью образующегося подслоя.

Укороченный микроканал позволяет проводить тестирование эмульсий практически без лабораторного оборудования, достаточен автомобильный насос с манометром. Для этого выходная часть микроканала направляется вертикально вверх в воздухе. При нагнетании эмульсии отчетливо видна струйка жидкости высотой $50\text{--}100\ \text{cm}$, которая через некоторое время уменьшается до полной остановки. Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с лабораторными измерениями. Таким образом, эффект запираания приобретает угадливость, и укороченный капилляр позволяет достаточно просто производить тестирование эмульсий.

Запираание микрокаплями воды, находящимися в дисперсионной среде, каналов, чьи размеры во много раз превышают размеры микро-

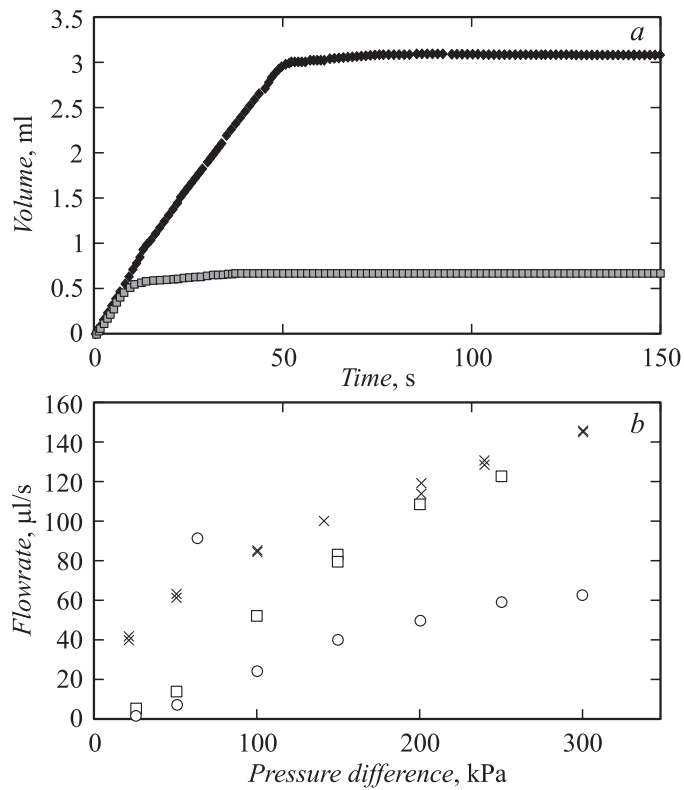


Рис. 3. Зависимость объема протекшей жидкости от времени (*a*, при перепаде давления 100 кПа) и величины расхода на начальном участке при различных перепадах давления (*b*, крестики — вода, прямоугольники и кружки — водонефтяная эмульсия в двух сериях экспериментов).

капель, само по себе удивительно. Физическая сторона динамического запирания связана с взаимодействием наноразмерных оболочек из молекул ПАВ, окружающих микрокапли воды, проявлением силы трения между оболочками, деформацией капель. У входной зоны микроканала формируется структура из микрокапель, начинающая замедлять поток. В этой зоне возрастает градиент давления, капли деформируются, точки соприкосновения переходят в поверхности, по мере роста градиента

давления сферические формы преобразуются в „многогранники“, образующие малопроницаемую структуру.

Таким образом, в дополнение к традиционным гидродинамическим свойствам дисперсий жидкость–жидкость, при течении в микроканалах добавляется эффект динамического запираания, проявляющийся в широком диапазоне значений градиента давления (1 МПа/м–3 ГПа/м). Формирующаяся структура из микрокапель воды в углеводороде сдерживает огромные градиенты давления, несмотря на частичное разрушение при образовании подслоя воды, обеспечивающего начальный расход высоковязкой эмульсии, почти равный течению чистой воды. Важно отметить, что наличие предельно укороченного канала позволяет производить подбор эмульсий, обладающих эффектом динамического запираания, практически без специального оборудования.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ НШ-3483.2008.1 и гранта РФФИ № 08-01-97032-р_поволжье.а.

Список литературы

- [1] *Akhmetov A., Telin A., Glukhov V., Mavletov M.* // Progress in Mining and Oilfield Chemistry. Budapest: Akademiai Kiado, 2003. V. 5. P. 287–295.
- [2] *Ахметов А., Телин А., Глухов В., Силин М.* Физическое моделирование и методы визуализации при разработке основ нетрадиционных технологий на базе инвертных дисперсий // Технологии ТЭК. Нефть и капитал. М., 2004. № 1(14). С. 33–36.
- [3] *Ахметов А.Т., Мавлетов В.В., Глухов В.В.* // Материалы XVII сессии Международной школы по моделям механики сплошной среды. Казань: Изд. Казан. мат. об., 2004. Т. 27. С. 30–41.
- [4] *Davis J.A., Jones S.C.* // J. Petrol. Technology. 1968. № 2. P. 1413–1428.
- [5] *Нигматулин Р.И., Ахметов А.Т., Федоров К.М.* // Докл. АН СССР. 1987. Т. 293. С. 558–562.
- [6] *Ахметов А., Телин А., Хлебникова М., Хакимов А., Михальчук Т., Решетников А.* // Вестник инженерингового центра. 2002. № 4. С. 25–31.
- [7] *Mittell K.* Мицеллообразование, солубилизация и микроэмульсии М.: Мир, 1980. Гл. 2. 598 с.