

Течение эмульсий, в подготовке которых исключалось присутствие механических включений¹

Рахимов А.А.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа,
Центр «Микро- и наномасштабная динамика дисперсных систем», БашГУ, Уфа

Проводились опыты с водоуглеводородными эмульсиями с различными эмульгаторами в капиллярах длиной 2 см, диаметрами 40 и 100 мкм. Чтобы исключить влияние механических примесей, сопоставимых по размеру с диаметром капилляра, в первом случае компоненты эмульсии были профильтрованы через мелкоячеистые фильтры. Во втором случае полученная таким образом эмульсия фильтровалась дополнительно через систему, состоящую из 3-х сетчатых фильтров с размерами ячеек 30–40 мкм. В капилляре 100 мкм такая эмульсия приходила в состояние запираания. Дополнительная фильтрация эмульсии через сетчатые фильтры привела к увеличению вязкости, но при этом в 100 мкм капиллярах время до наступления запираания в 2–3 раза больше, чем у исходной. Реология использованных эмульсий хорошо описывается моделью Оствальда-де-Вааля. Определили, что запираание эмульсии в большей степени обусловлено наличием включений, а не вязкостью эмульсии.

1. Введение

Гидродинамика дисперсий жидкость–жидкость в микроканалах сталкивается с обнаруженным ранее свойством — динамическим запираанием, которое не может быть описано в пределах классических реологических представлений. Эффект динамического запираания, обнаруженный в экспериментах с микроканалами, состоит в том, что движение эмульсии через элемент микроканала со временем останавливается, несмотря на постоянно действующий перепад давления [1, 2]. Изучение течения эмульсий в микроканалах с сужениями и их использование в экспериментах с цилиндрическими капиллярами показало большую роль микровключений. Для исключения влияния механических примесей, сопоставимых по размеру с диаметром капилляра, которые могли бы играть определенную роль в процессе динамического запираания, в первом случае компоненты эмульсии были профильтрованы через мелкоячеистые фильтры. Во втором случае полученная таким образом эмульсия фильтровалась дополнительно через систему, состоящую из 3-х сетчатых фильтров с размерами ячеек 30–40 мкм. Состав и способ приготовления использованной эмульсии:

дизтопливо (зимнее) — 39,6% (профильтровали через фильтр Millipore 0,22 мкм); раствор хлорида натрия (26 г соли на 100 мл дистиллированной воды) — 59,4% (в магнитной мешалке мешали более 10 часов, отфильтровали через вату и далее через фильтр Millipore 0,22 мкм); эмульгатор «Композиция 24-09» — 1% (профильтрован через фильтровальную бумагу 2,7 мкм). По прошествии 40 минут после приготовления эмульсии наблюдается образование нескольких небольших (меньше 1 мм) коалесцировавших капель воды и частичное расслоение компонентов эмульсии. При встряхивании капли воды дробятся и эмульсия приобретает однородность, за время порядка часа происходит осаждение микрокапель эмульсии, появляется верхний слой углеводородной фазы (дизельное топливо с эмульгатором).

2. Методы и результаты

Несмотря на то, что все компоненты эмульсии были профильтрованы, не исключается возможность появления механических примесей из воздуха при перемешивании или каким-либо другим образом. Чтобы проверить их наличие и исключить влияние на запираание мы пропустили эмульсию через сужения 80 и 40 мкм в трубку, соединенную с микроканалом 100 мкм (рис. 1).

Эмульсия через подводющую полиэтиленовую трубку с внутренним диаметром 2,5 мм подается на

¹Работа выполнена при частичной поддержке Гранта Министерства образования и науки РФ (11.G34.31.0040), а также Программы фундаментальных исследований ОЭММПУ «Механика неоднородных жидкостей в полях внешних сил».

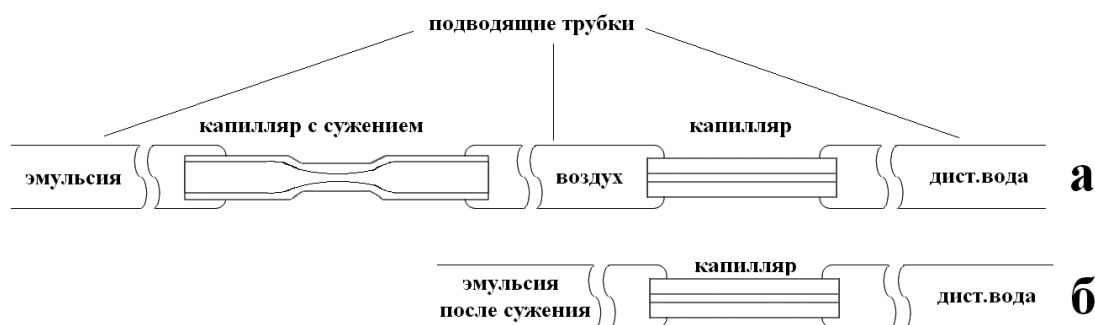


Рис. 1. Схема движения эмульсии под действием перепада давления (слева направо): а — через капилляр с сужением, б — течение через капилляр эмульсии, прошедшей через сужение

термоосаждающую трубку с внутренним диаметром 2 мм, соединенную с ней металлической трубкой. Термоосаждающая трубка соединена со стеклянным капилляром с сужением (80 мкм), имеющим во входной и выходной частях внешний диаметр 1,5 мм, внутренний — 700 мкм. После прохождения через сужение эмульсия собирается в соединительной полиэтиленовой трубке, которая в такой же последовательности соединена с капилляром, имеющим внешний диаметр 1,5 мм, внутренний — 100 мкм (рис. 1(а)). После того как в полиэтиленовой трубке накапливается достаточное количество эмульсии, прошедшей через микроканал с сужением, капилляр с сужением убирается и давление подается на ее вход (рис. 1(б)).

Цилиндрический микроканал с сужением можно охарактеризовать длиной 400 мкм, на которой отклонение от диаметра в узкой части 80 мкм не более 10% (в обе стороны).

При перепаде давления 100 кПа эмульсия с большой скоростью около 5 м/с протекает через сужение, это соответствует скоростям деформации сдвига $1,3 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, тем не менее визуальная деформация эмульсии не обнаруживается. На 270-ой секунде при течении через сужение течение эмульсии существенно замедляется и наступает закирание. За это время проходит достаточно большое количество эмульсии — 6 мл. Видеоизображения, иллюстрирующие изменения, происходящие в сужении при протекании эмульсии приведены на рис. 2.

На 250-ой секунде появляется неоднородность, когда проходит через нее прозрачная капля воды, в течении одного кадра видно, что эта некая полупрозрачная структура возможно, твердая частица. Далее, на нее начинают нагромождаться другие частицы и с 260-ой секунды по показаниям весов происходит уменьшение скорости потока, на 275-ой секунде расход уменьшается почти на порядок и на 325-ой секунде прекращается. По видеоизображениям видно, что начинается формирова-

ние четочной структуры, которая начинает проявляться через 5 секунд и достаточно отчетливо видна на приведенных кадрах через 15 секунд (340-ая секунда). По перемещению структуры можно оценить скорость в сужении — около 1 мм/с, что соответствует расходу 0,005 мкл/с, это на 3,5 порядка меньше начального расхода. Можно отметить, что при течении чистой эмульсии через плавное сужение эффект динамического закирания не проявляется. Наличие небольших волокнистых, либо других образований, которые застревают в сужении, не приводят к значительным изменениями расхода. Но скопление на них имеющихся, даже в профильтрованной эмульсии, мелких образований приводит к формированию твердой структуры, которая гидродинамически «прозрачна», но на ней происходит формирование структуры из микрокапель, приводящей к закиранию эмульсии.

Эмульсия, прошедшая через сужение в количестве 6 мл, скопилась в подводящей трубке перед капилляром диаметром 100 мкм, длиной 2 см. При подаче перепада давления 100 кПа началось течение эмульсии (рис. 3).

Несколько больший расход в начале видимо

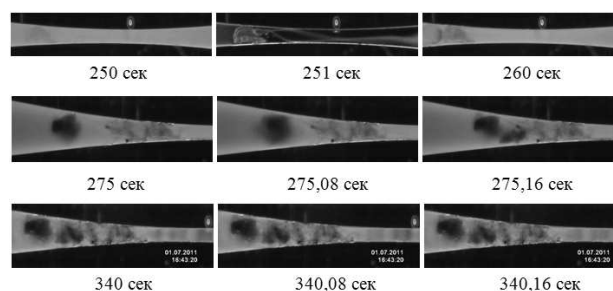


Рис. 2. Кадры, отображающие изменение картины течения эмульсии в сужении, под кадрами приведено время от начала подачи перепада давления 100 кПа

обусловлен частичным осаждением водной фазы в подводящей трубке у входа в капилляр. Величина расхода и скорости на начальном участке (10–50 с) $Q = 3,7$ мкл/с, $v = 0,47$ м/с, соответственно $\dot{\gamma} = 9400$ с⁽⁻¹⁾; далее (1300–1800 с) они стали равными $Q = 1,5$ мкл/с, $v = 0,19$ м/с, соответственно $\dot{\gamma} = 3800$ с⁽⁻¹⁾. Величина расхода значительно меньше, по сравнению с течением через сужение, из-за сравнительно большой длины капилляра. Запирание произошло через 15 минут, на кадрах видеозаписи видно образование четочной структуры, скорость течения в состоянии запирания снижается с 710 мкм/с до 9 мкм/с за 7 минут (рис. 4, кадры 1–3). Через полминуты после приведенного кадра давление увеличили до 200 кПа, появилось очень медленное течение, спустя 30 секунд оно стало быстро нарастать. Расход стал равным $Q = 3,6$ мкл/с, скорость — $v = 0,46$ м/с, соответственно $\dot{\gamma} = 9200$ с⁽⁻¹⁾ (в интервале 1700–1800 с); далее (в интервале 2250–2320 с) они стали равными $Q = 9,1$ мкл/с, $v = 1,16$ м/с, соответственно $\dot{\gamma} = 23200$ с⁽⁻¹⁾.

Соотношение скоростей при начальном перепаде и его удвоении также приблизительно удваивается, что говорит о том, что в этом диапазоне скоростей деформации неньютоновские свойства эмульсии практически не проявляются. Через 13 минут наступает запирание, переход кривой в состояние запирания с изломом возможно свидетельствует о том, что у входа сначала сформировалась твердая «пробка». Образующаяся четочная структура отображена на кадрах видеозаписи (рис. 4, кадр 4), по ним также оценены изменения скорости в состоянии запирания $v = 9$ мкм/с. При подаче 300 кПа (3012–3569 с) расход судя по графику не меняется, по видеозаписи видно небольшое увеличение скорости до 100 мкм/с (рис. 4, кадр 5). Сброс до нуля и подача давления 300 кПа (12 секунд длительность сброса и подача 3583–3779 с, второй раз сброс — 4 с, подача 3784–3833 с) не оказали влияния на запертую структуру, это по всей видимости свидетельствует о том, что «скелет» запирающей структуры состоит из твердых частиц, один из размеров которых меньше 80 мкм. Тем не менее они сформировали структуру, на которой далее образовалась запирающая структура из водных капель эмульсии.

Параллельно с экспериментом в капилляре провели реологические измерения эмульсии (рис. 5). Линии прямого и обратного хода с хорошей степенью достоверности аппроксимируются зависимостью Оствальда-де-Ваале $\tau = 0,0532\dot{\gamma}^{0,9034}$ Па. Соответствующая ей зависимость для вязкости имеет вид: $\eta = 0,053\dot{\gamma}^{(-0,097)}$ Па·с, при этом $\eta = 0,034$ Па·с для $\dot{\gamma} = 100$ с⁽⁻¹⁾ и $\eta = 0,027$ Па·с для

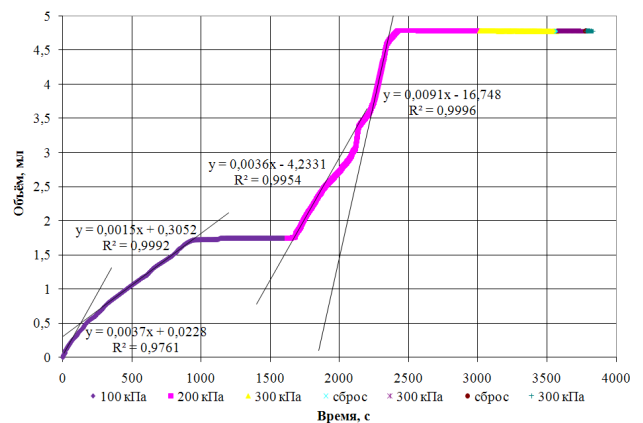


Рис. 3. Зависимость объема (прошедшей через сужение) эмульсии протекающей через капилляр 100 мкм при перепаде давления 100, 200, 300 кПа, сброс и подача давления 300 кПа — 2 раза

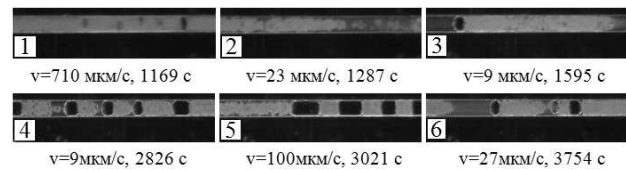


Рис. 4. Структура течения в капилляре после запирания при перепадах давления 100 и 200 кПа

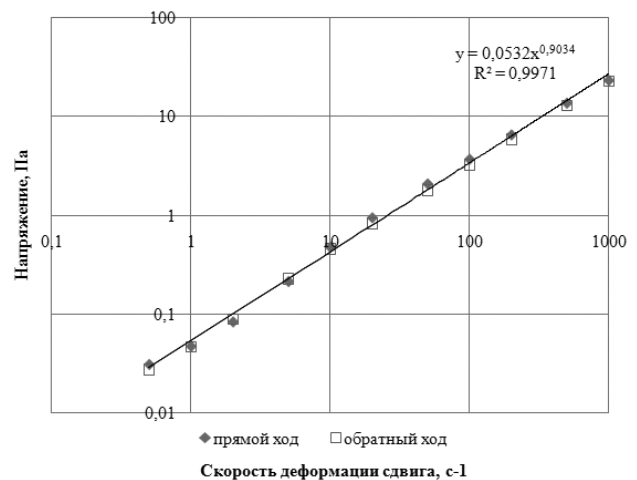


Рис. 5. Реологическая зависимость эмульсии в двойном логарифмическом масштабе

$\dot{\gamma} = 1000 \text{ с}^{-1}$). Прямой и обратный ход практически совпадают, что говорит о динамической устойчивости эмульсии.

Была проведена серия экспериментов по течению эмульсии через цилиндрический микроканал с сужением, его можно охарактеризовать длиной 400 мкм, на которой отклонение от диаметра в узкой части 40 мкм не более 10% (в обе стороны). Во всех случаях в течении первых 10–30 секунд в сужении появились соринки.

Чтобы избежать влияния соринки при течении в микроканалах, описанная ранее эмульсия, полученная из фильтрованных компонентов, была дополнительно пропущена через 3 последовательно закрепленные сетки с размерами ячеек не более 30 мкм, используемые в инфузионных системах для внутривенного вливания. Через сетчатые фильтры эмульсия поступала в шприц, из него проводилось заполнение подводящих трубок. Далее, по использованной ранее схеме (рис. 2(а)), эмульсия проходила через сужение 40 мкм и собиралась у входа капилляра диаметром 100 мкм. В течении часа набралось 1,8 мл эмульсии, дополнительная фильтрация существенно изменила влияние включений. Тем не менее, в конце первого часа образовалась некоторая структура, на которой произошло заширение.

Дополнительно профильтрованную эмульсию, прошедшую через сужение 40 мкм, начали прокачивать при перепаде давления 100 кПа через капилляр длиной 2 см диаметром 100 мкм (рис. 6). Предположительно в этой эмульсии никаких включений размером более 40 мкм не может быть. Эмульсия, протекающая через микроканал, по прохождении 450 с переходит в состояние динамического заширения. При подаче перепада давления 200 кПа течение возобновляется практически с удвоенной скоростью и достаточно быстро течение останавливается. Подача давления 300 кПа никаких изменений не вызывает. Соответствующие графику кадры приведены на рис. 7. Можно отметить, что четочная структура проявилась спустя небольшое время после подачи 200 кПа.

Реологические свойства использованных эмульсий с хорошей достоверностью аппроксимируются степенной зависимостью, т.е. моделью Оствальда-де-Вааля (рис. 8, 9). Уменьшение вязкости при последующих измерениях скорее всего связано с оседанием дисперсии в перерывах между измерениями, поэтому в расчетах необходимо использовать результаты первых измерений, полученные при «прямом ходе».

Линии прямого и обратного хода с хорошей степенью достоверности аппроксимируются зависимостью Оствальда-де-Ваале. Для прямого

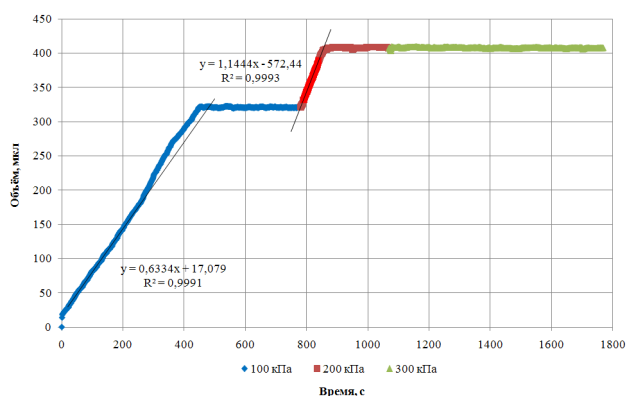


Рис. 6. Зависимость объема от времени протекшей перед этим через сужение эмульсии при пропускании через капилляр длиной 2 см, диаметром 100 мкм при ступенчатом изменении перепада давления

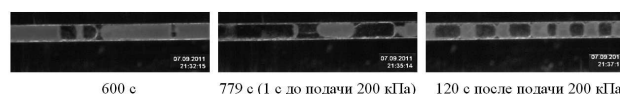


Рис. 7. Визуализация течения в капилляре диаметром 100 мкм, под кадрами время от начала движения

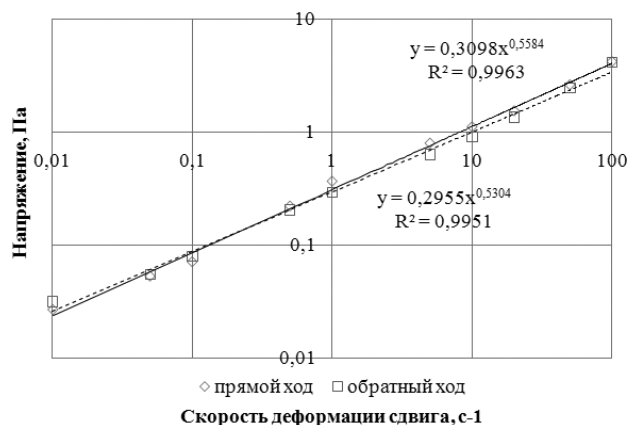


Рис. 8. Реологическая зависимость эмульсии в двойном логарифмическом масштабе

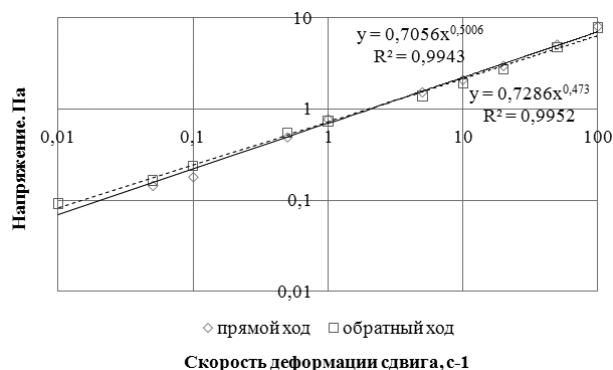


Рис. 9. Реологическая зависимость дополнительно фильтрованной эмульсии в логарифмическом масштабе

хода $\tau = 0,3098(\dot{\gamma})^{0,5584}$ Па. Соответствующая ей зависимость для вязкости имеет вид: $\eta = 0,3098\dot{\gamma}^{0,4416}$ Па·с, при этом $\eta = 0,04204$ Па·с для $\dot{\gamma} = 100$ с⁽⁻¹⁾.

Дополнительная фильтрация эмульсии через сетчатые фильтры привела к увеличению вязкости (рис. 9), это, по всей видимости, обусловлено дроблением капель при продавливании эмульсии через 3 слоя сеток. Меньшее изменение вязкости при последующих измерениях можно объяснить уменьшением скорости седиментации при меньших размерах микрокапель эмульсии.

Линии прямого и обратного хода с хорошей степенью достоверности аппроксимируются зависимостью Оствальда-де-Ваале $\tau = 0,7056\dot{\gamma}^{(0,5006)}$ Па. Соответствующая ей зависимость для вязкости имеет вид: $\eta = 0,7056\dot{\gamma}^{(0,4994)}$ Па·с, при этом $\eta = 0,08029$ Па·с для $\dot{\gamma} = 100$ с⁽⁻¹⁾.

3. Заключение

В результате проведенных экспериментов с эмульсией из отфильтрованных компонентов, с дополнительной фильтрацией самой эмульсии и протеканием через сужения можно отметить:

1. Наблюдающиеся запираания в сужениях всегда обусловлены появлением рыхлой или твердой частицы, застревающей в сужении.

2. Приведенные попытки с изучением течения эмульсии через обычно используемый капилляр, предварительно пропущенной через сужение, диаметр которого меньше капилляра, и в 2,5 раза меньше, дополнительно профильтрованные от включений, показали, что во всех случаях обнаруживается эффект динамического запираания. Не исключается, что включения даже меньшего размера по сравнению с диаметром капилляра способствуют наступлению динамического запираания.

3. Реология использованных эмульсий хорошо

описывается моделью Оствальда-де-Вааля, дополнительная фильтрация приводит к некоторому увеличению вязкости.

Список литературы

- [1] Ахметов А., Телин А., Глухов В., Мавлетов М., Силян М., Гаевой Е., Магадов Р., Хлобыстов Д., Байкова Е. Особенности течения высококонцентрированных обратных водонефтяных эмульсий в трещинах и пористых средах. Технологии ТЭК. Нефть и капитал, апрель, 2003 С. 54–58.
- [2] Ахметов А.Т., Рахимов А.А., Саметов С.П. Новое свойство эмульсий при течении в микроканалах — важное для технологий извлечения нефти // Материалы VII международной конференции «Химия нефти и газа». Томск, 2009. С. 362–367.