



## ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ ДИСПЕРСИЙ «ЖИДКОСТЬ–ЖИДКОСТЬ» ЧЕРЕЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ МИКРОКАНАЛ<sup>1</sup>

*Ахметов А. Т., Саметов С. П.*

Институт механики УНЦ РАН, Уфа

**Аннотация.** Описано удивительное свойство обратных водоуглеводородных эмульсий, проявляющееся при течении в микроканалах, названное эффектом динамического запираения. Суть эффекта состоит в том, что течение эмульсии через участок микроканала со временем прекращается, несмотря на постоянно действующий перепад давления. Экспериментально получено, что эффект наблюдается при течении различных по составу эмульсий. Показано, что эффект проявляется при высоких градиентах давления, хотя и происходит частичное разрушение дисперсий. В работе предложен физический механизм запираения водоуглеводородных эмульсий в микроканалах, связанный с взаимодействием наноразмерных оболочек микрокапель воды.

### 1. Введение

Дисперсию из микрокапель воды, находящихся в углеводороде, принято называть обратной водоуглеводородной эмульсией. В частности, в нефтяной промышленности используются системы из микрокапель воды в нефти (инвертная водонефтяная эмульсия), микрокапель воды в дизельном топливе, техническое название такой инвертной эмульсии — жидкость глушения. Ста-

---

<sup>1</sup>Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ НШ-4381.2010.1 и гранта РФФИ № 08-01-97032, Программы фундаментальных исследований ОЭМПУ «Механика неоднородных жидкостей в полях внешних сил»

бильность таких систем обеспечивается природными, либо искусственными эмульгаторами из поверхностно-активных веществ (ПАВ). Течение жидкостей в каналах сопровождается линейной зависимостью от объемного расхода потока градиента давления. В случае с эмульсиями эта зависимость нелинейна и, более того, в микроканалах со временем расход эмульсии снижается до нуля, несмотря на действующий постоянный перепад давления. Это явление было названо эффектом динамического запираания [1].

Недавно вышла серия работ, в которых описан механизм прилипания и проскальзывания пенных слоев друг относительно друга [2]–[4]. В сдвиговом течении между пластинами в пенах происходит деформация пузырьков, смещение пенных слоев друг относительно друга, а также выжимание дисперсионной среды из области между пузырьками до тех пор, пока не возникают «черные пленки». «Черные пленки» могут достигать толщины до 3–5 нм, они термодинамически устойчивы и их устойчивость не ограничена во времени, поскольку для разрушения (прорыва) пленки необходимо преодолеть потенциальный энергетический барьер [5]. В результате пенная структура локально приходит в «отвердевшее» состояние, авторы предполагают, что подобное должно происходить и в концентрированных эмульсиях. Приведенный механизм используется для объяснения существующего предела текучести в пенах и эмульсиях. При значении напряжения ниже критического пенная структура сохраняет упругость, если напряжение выше критического — движется как жидкость. В случае исследованных в нашей работе эмульсий, судя по измеренным реологическим характеристикам, значение критического напряжения пренебрежимо мало по сравнению с напряжениями, сопровождающими эффект динамического запираания.

При динамическом запираании возникающие напряжения на несколько порядков превосходят критическое напряжение сдвига. Более того, уменьшение перепадов давления приводит к увеличению времени, в течение которого наступает запираание. Динамическое запираание водонефтяных эмульсий в капиллярах сопровождается переходом в ползучий режим [6] с последующим

замедлением течения, в ячейке Хили–Шоу происходит либо полная остановка течения, либо незначительное наличие микропотоков [7]–[8]. Возникает вопрос, как будет влиять на проявление эффекта запираания значительное увеличение градиента давления. В биологической дисперсии, крови любопытно изучить влияние оседания эритроцитов на динамическое запираание в микроканале.

## **2. Течение через микроканал при больших градиентах давления**

Для изучения процессов, происходящих при больших градиентах давления, изготовлен предельно укороченный капилляр с внутренним диаметром 100 мкм. Диафрагма из фольги толщиной 100 мкм с отверстием в центре припаяна к торцу медной трубки с внутренним диаметром 2,2 мм и внешним 3 мм. В предельно укороченном капилляре максимальный градиент давления может достигать гигантского значения 3 ГПа/м, подаваемое давление ограничено возможностями используемых нами полиэтиленовых трубок.

Измерение объема проводилось весовым методом, сигнал от электронных весов считывался через небольшие промежутки времени в компьютер, поэтому кривые на графиках, состоящие из точек, зачастую выглядят как сплошные линии.

Течение эмульсий через укороченный микроканал переходит в состояние запираания на порядок быстрее по сравнению с течением через стеклянный капилляр (рис. 1). При малом времени запираания удобно провести тестирование различных по составу эмульсий на проявление эффекта запираания. Сравнивались обратные эмульсии с одинаковой дисперсностью, одинаковой концентрацией непрерывной фазы, которые отличались используемым искусственным эмульгатором. Состав водонефтяных эмульсий следующий: дистиллированная вода — 60%, нефть — 36%, эмульгатор — 4%. Эмульгаторы: «Нефтенол НЗ», «Нефтенол НЗб», «Ричмойл 31/3», «Ричмойл 27/4», «РХП-60». Размер

капель воды 1–2 мкм, число оборотов мешалки 400 об/мин. Расход эмульсии находился по линии тренда, его значение в мкл/с соответствует коэффициенту при  $x$  на графиках (рис. 1)

По результатам серий экспериментов можно сказать, что течение тестируемых эмульсий обнаруживает динамическое запирание, кроме случая с эмульсией с эмульгатором «РХП–60», с ним запирание произошло лишь в одном из пяти случаев. В случае эмульсии с эмульгатором «Нефтенол НЗб» запирание происходит всегда, для остальных эмульгаторов имеет место не запирания один-два раза из общего числа экспериментов — наклонные линии на рис. 1.

Метод с истечением отличен тем, что не требует специализированного оборудования и основан на измерении параметров вытекающей струйки. Он не требует электронных весов, воздушного компрессора или баллона с газом — можно использовать обычный автомобильный насос с датчиком давления. Трубка с диафрагмой помещается вертикально, выходным отверстием вверх, система заполняется эмульсией, при подаче перепада давления появляется струйка эмульсии, которая впоследствии может прекратиться в результате динамического запирания (рис. 2). В левом верхнем углу цифрами обозначено время с начала истечения.

Из рис. 2 видно, что в процессе запирания струйка движется не вертикально, а под некоторым углом (это связано с несимметричностью геометрии отверстия). На первом кадре рис. 2 высота струйки гораздо выше области, захватываемой объективом камеры, и составляет 50–60 см. Далее высота струйки постепенно снижается, и течение полностью прекращается, запирание произошло за 48 секунд. По высоте струи жидкости качественно оценивается расход течения.

Высота струи дистиллированной воды при перепаде давления 100 кПа (градиент давления — 1 ГПа/м) достигает отметки в 80 см. С удивлением было замечено, что высота струйки исследованных эмульсий была в промежутке 60–70 см, что примерно на 20% меньше высоты струи воды. В то время, как вязкость

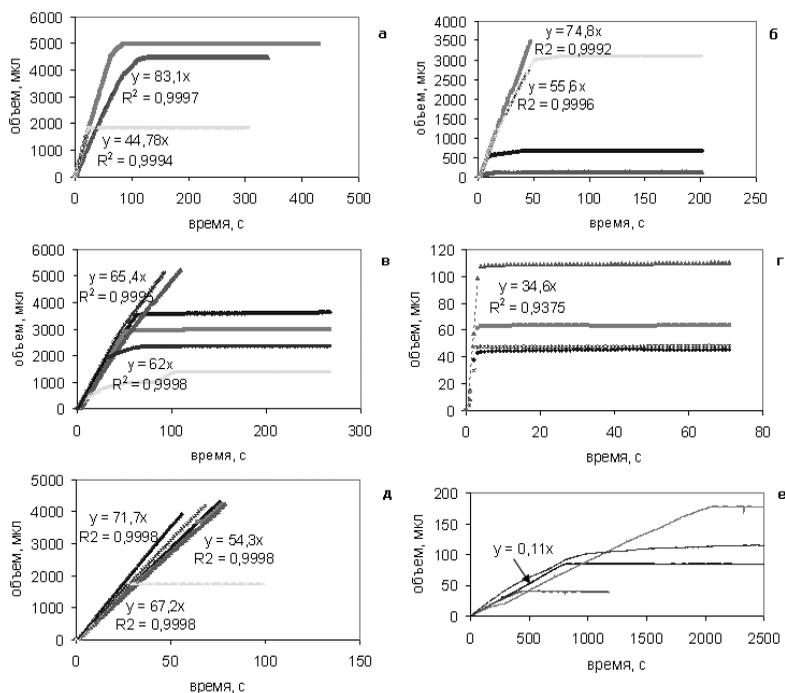


Рис. 1. Графики зависимости объема протекшей эмульсии с различными эмульгаторами: а) «Ричмойл 27/4», б) «Нефтенол НЗ», в) «Ричмойл 31/3», г) «Нефтенол НЗ6», д) «РХП-60», е) «Нефтенол НЗ», капилляр 4 см от времени при перепаде давления 100 кПа

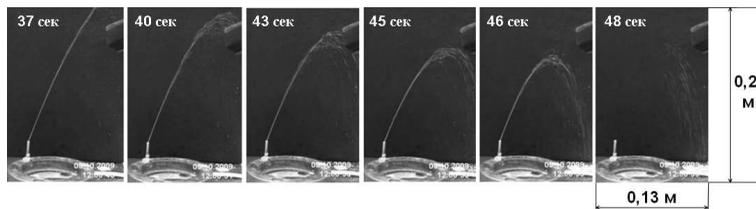


Рис. 2. Кадры с истекающей струей, перепад давления 100 кПа

эмульсий, измеренная при течении через стеклянный капилляр, в 200 раз выше воды. Такой большой расход эмульсии объясняется образованием подслоя воды на стенке отверстия за счет коалесценции микрокапель воды.

По результатам экспериментов с истечением была составлена таблица для выбранных эмульсий: времени запираания и высоты, образующейся струи, в целом, результаты аналогичны полученным весовым методом. При этом, как указано ранее, не требуется дорогостоящее оборудование: электронные весы, компьютер и компрессор, что очень привлекательно в полевых условиях для тестирования приготовленных «на месте» эмульсий.

В укороченном капилляре обнаруживается эффект динамического запираания в диапазоне перепадов давления от 50 до 300 кПа, характерные зависимости приведены. 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. Если при градиентах давления до 50 МПа/м 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 (рис. 3) [9]. Разрушение происходит начиная с перепада давления 45 кПа.

Следует отметить, что эмульсия, содержащая эмульгатор «Нефтенол НЗб», не только проявляет свойство запираания, но и, судя по расходу, испытывает наименьшее разрушение из всех исследованных составов эмульсий, что связано с наличием бентонита в составе эмульгатора «Нефтенол НЗб».

Были проведены эксперименты по исследованию влияния ультразвукового поля на запертую систему. После запираания модель помещалась в воду и подвергалась действию ультразвукового излучения ванны «УЗВ 3/100 ТН» (избыточное давление не отключалось). В результате мощное ультразвуковое (УЗ) воздействие приводит к возобновлению движения эмульсии в мембране. Кривые зависимостей объема протекшей эмульсии после воздей-

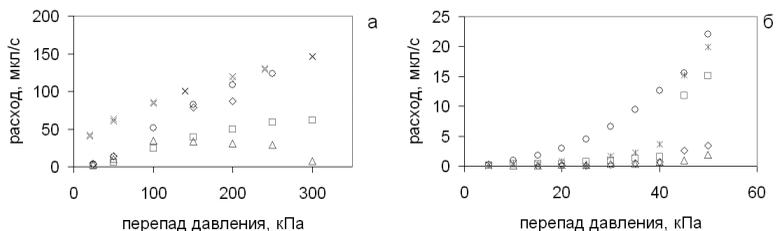


Рис. 3. Зависимость величины расхода при ступенчатом изменении перепада давления в малом диапазоне давлений,  $\times$  — вода,  $\diamond$ ,  $\square$ ,  $\circ$ ,  $\triangle$ ,  $*$  — водонефтяная эмульсия в пяти сериях экспериментов при одинаковых внешних условиях: а) эмульсия и дистиллированная вода, б) эмульсия при малых перепадах давления

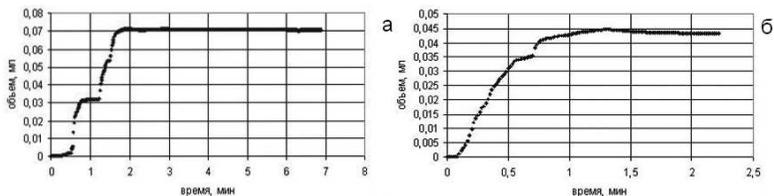


Рис. 4. Влияние мощных УЗ полей на состояние запираения при течении через диафрагму при постоянно действующем перепаде давления: а) 100 кПа, б) 50 кПа

ствия на систему мощными УЗ полями приведены на рис. 4(а) и при постоянно действующем поле (рис. 4(б)).

### 3. Течение биологической дисперсии — крови

Кровь представляет собой взвесь дисперсных частиц: эритроцитов, лейкоцитов, тромбоцитов, так называемых форменных элементов, в несущей жидкости — плазме крови. Эритроциты, чья концентрация в крови на несколько порядков больше, чем остальных форменных элементов, имеют форму сплюснутых сфер диаметром 6–8 мкм, составляют 50% от общего объема и оказывают основное влияние на вязкость крови. Оболочка эритроцитов состоит из двойного липидного слоя, близкого по свой-

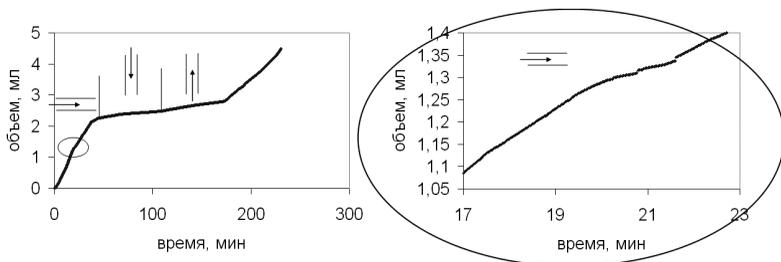


Рис. 5. Расход крови через капилляр диаметром 100 мкм под перепадом давления 13 кПа

ствам слою из ПАВ. Течение крови через капилляр диаметром 100 мкм длиной 2 см при постоянно действующем перепаде давления 13 кПа, как и в экспериментах проводившихся ранее при других условиях [10], с течением времени приостанавливается (рис. 5).

Первое кратковременное замедление наступило спустя 20 минут после начала эксперимента. Приблизительно через 25 минут расход резко уменьшился, что предшествовало закиранию. При этом наблюдалась высокая концентрация эритроцитов у входа капилляра. На протяжении первых 45 минут капилляр находился в горизонтальном положении. Затем систему повернули (момент обозначен вертикальной чертой) таким образом, что капилляр принял вертикальное положение, кровь поступала сверху, течение остановилось. Цвет крови у входа в капилляр приобрел более темный цвет, как и ранее, это объясняется повышенной концентрацией эритроцитов. В таком положении система находилась 60 минут, далее (этот момент обозначен второй вертикальной чертой) систему повернули на  $180^\circ$ , т.е. кровь подавалась снизу вверх. Темная зона из эритроцитов начинает осветляться снизу вверх вследствие оседания эритроцитов. Снижение концентрации эритроцитов у входа приводит к возобновлению расхода. Это еще раз подтверждает, что эффект динамического закирания крови обусловлен ее дисперсным составом и наличием эритроцитов.

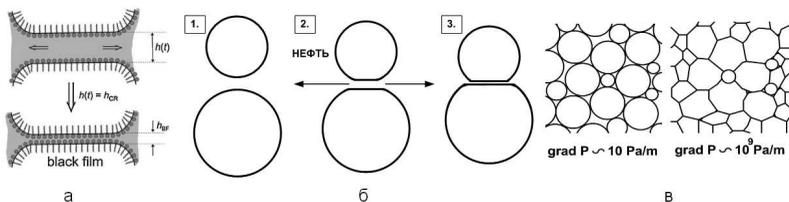


Рис. 6. Выжимание дисперсионной среды из пространства а) между пузырями пены [2], б) между каплями воды эмульсии, в) преобразование сферических капель воды эмульсии в «многогранники» при больших градиентах давления у входной зоны микроканала

Эксперимент проводился дипломницей, студенткой физического факультета БашГУ Г. М. Мирсаяповой.

#### 4. Обсуждение результатов

Как указывалось выше, при сближении пузырьков в пене [2]–[4], движущейся в сдвиговом потоке, происходит выжимание дисперсионной среды из пространства между пузырьками пены (рис. 6(a)) до появления черных пленок, в которых взаимодействие между соседними слоями, состоящими из молекул ПАВ, затрудняет касательные смещения слоев — аналогично трению между твердыми поверхностями. Авторы предполагают, что в концентрированных эмульсиях процессы аналогичны.

Физический механизм динамического запираания обратных водоуглеводородных эмульсий в микроканалах связан с образованием структуры из микрокапель воды у входа в микроканал. Поверхность микрокапель воды покрыта молекулами ПАВ эмульгатора, размеры которых около 3 нм.

Если рассмотреть течение эмульсии у входа в микроканал, на который на начальном этапе приходится весь перепад давления, с течением времени происходит некоторая сепарация микрокапель воды, у входа их концентрация возрастает, что приводит к увеличению вязкости во входной зоне и падению части перепада давления на зоне у входа в капилляр. Это приводит к увеличе-

нию градиента давления, дальнейшей сепарации капель воды и их частичной деформации (рис. 6(б)). Постепенно несущая фаза выжимается в местах сближения микрокапель аналогично черной пленке; проявляется сила трения, происходит структурирование эмульсии во входной зоне, преобразование капель воды из сферической формы в подобие многогранников, и точки касания между каплями преобразуются в поверхности (рис. 6(в)).

Таким образом, можно предположить, что под действием большого градиента давления нефтяная фаза выжимается из пространства между микрокаплями воды. В результате движение эмульсии останавливается. Между тем, как показал опыт, при градиентах давления порядка 1 ГПа/м время запираания гораздо меньше, чем в случае градиентов 10 МПа/м. Вероятно, при больших градиентах деформирование микрокапель воды происходит гораздо быстрее.

Эффект динамического запираания крови в капиллярах отличается от случая водоуглекислотных эмульсий тем, что запираание не столь устойчиво. По всей видимости, это связано с тем, что между оболочками эритроцитов не столь сильное взаимодействие при тесном соприкосновении, как у оболочек, состоящих из молекул ПАВ. Другая особенность связана с оседанием эритроцитов, которая может привести в автоколебательному режиму при течении крови через сужение снизу вверх.

## 5. Заключение

В дополнение к традиционным гидродинамическим свойствам концентрированных дисперсий жидкость–жидкость (высокая вязкость по сравнению с несущей фазой), при течении в микроканалах добавляется эффект динамического запираания, проявляющийся в широком диапазоне значений градиентов давления (1 МПа/м – 3 ГПа/м), а состояние «запираания» сохраняется в течение достаточно длительного времени. При больших градиентах давления расход эмульсии с давлением нелинейно возрастает, при 3 ГПа/м почти равен расходу воды, что связано с частичным разрушением эмульсии — образованием водного

подслоя из коалесцирующих микрокапель. Тем не менее, даже в этом случае с течением времени формируется структура из микрокапель воды в углеводороде, которая сдерживает огромные градиенты давления.

Обнаруженный эффект динамического запираания крови в стеклянном капилляре, обусловленный взаимодействием наноразмерных оболочек эритроцитов, может рассматриваться как одна из возможных причин возникновения инфаркта и инсульта в живых организмах со стенозами в кровеносной системе.

Ультразвуковые поля можно использовать для регулирования эффекта динамического запираания.

## Список литературы

- [1] Akhmetov A., Telin A., Glukhov V. and Mavletov M. Flow of Emulsion through Slot and Pore Structures // Progress in Mining and Oilfield Chemistry. 2003. Vol. 5. P. 287–295.
- [2] Denkov N. D., Tcholakova S., Golemanov K. and Lips A. Jamming in Sheared Foams and Emulsions, Explained by Critical Instability of the Films between Neighboring Bubbles and Drops // Physical Review Letters. 2009. PRL **103**, 118302(4).
- [3] Denkov N. D., Tcholakova S., Golemanov K., Ananthapadmanabhan K. P. and Lips A. Viscous Friction in Foams and Concentrated Emulsions under Steady Shear // Physical Review Letters. 2008. PRL **100**, 138301(18).
- [4] Denkov N. D., Tcholakova S., Golemanov K., Ananthapadmanabhan K. P. and Lips A. The role of surfactant type and bubble surface mobility in foam rheology // Soft Matter. 2009. **5**, 3389–3408(20).
- [5] Кругляков П. М., Ексерова Д. Р. Пена и пенные пленки. М: 1990. С. 427.
- [6] Ахметов А., Телин А., Глухов В., Силин М. Физические моделирование и методы визуализации при разработке основ нетрадиционных технологий на базе инвертных дисперсий // Научно-технологический журнал «Технологии ТЭК». 2004. С. 33–36

- 
- [7] Ахметов А. Т., Глухов В. В., Мавлетов М. В., Телин А. Г. Эффект динамического запираания при течении стабилизированных высококонцентрированных обратных водонефтяных эмульсий // Труды Института механики Уфимского научного центра РАН. 2006. Вып. 4. С. 117–135.
- [8] Ахметов А. Т., Рахимов А. А., Саметов С. П. Проявление эффекта динамического запираания обратных водонефтяных эмульсий в элементах пласта // Труды Института механики Уфимского научного центра РАН. 2008. Вып. 6. С. 19–26.
- [9] Ахметов А. Т., Саметов С. П. Особенности течения дисперсии из микрокапель воды в микроканалах // Письма в ЖТФ. 2010. Том 36, вып. 22. С. 21–28.
- [10] Ахметов А. Т., Закиров К. Р., Саметов С. П. Возможный механизм образования инфаркта // Труды Института механики Уфимского научного центра РАН. 2008. Вып. 6. С. 13–19.