



УДК 532.685; 665.622.43

# ЭФФЕКТ ДИНАМИЧЕСКОГО ЗАПИРАНИЯ ПРИ ТЕЧЕНИИ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ОБРАТНЫХ ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ<sup>1</sup>

*А. Т. Ахметов, В. В. Глухов, М. В. Мавлетов, А. Г. Телин*

Институт механики УНЦ РАН, Уфа; Уфимский филиал ЮганскНИПИнефть

**Аннотация.** Проведены экспериментальные исследования течений обратной высококонцентрированной водонефтяной эмульсии в ячейке Хили–Шоу и цилиндрических трубках различного диаметра. Приведены структуры плоских течений и поведение эмульсии в плоской и цилиндрической системах в состоянии «динамического запираания». Предложена математическая модель для его описания и проведено сопоставление с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** реология, ячейка Хили–Шоу, течение, обратная эмульсия, стабилизированная, водонефтяная эмульсия

---

## 1 Введение

Одними из интереснейших представителей дисперсных систем являются высококонцентрированные обратные водонефтяные эмульсии (ВОВНЭ). Следует отметить, что максимальной вязкостью такие системы, как правило, обладают в области концентраций 70–80% водной (дисперсной) фазы. Согласно общепринятой классификации при концентрациях дисперсной фазы выше 74% эмульсии называются высококонцентрированными. При таких концентрациях при достаточной диспергации эмульсии обладают свойствами твердых тел (сохраняют свою форму), в сосуде в гравитационном поле Земли они могут сохраняться годами, практически не

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (Грант НШ–2059.2003.1) и по программе фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН по научной программе «Динамика и акустика неоднородных жидкостей, газожидкостных систем и суспензий»

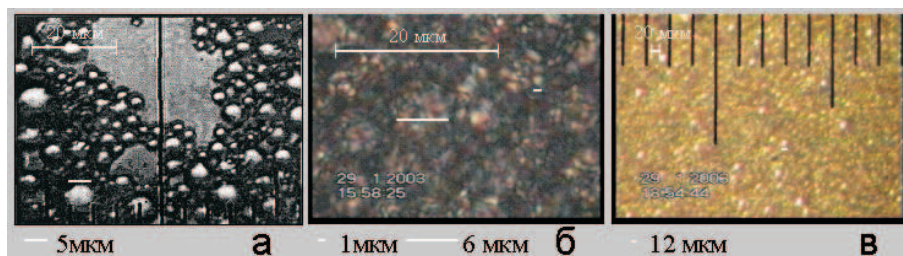


Рис. 1. Структуры нестабилизированной (а) и стабилизированной (б, в) эмульсий, наблюдаемые под микроскопом

изменяясь (седиментационная или статическая стабильность). При течении в каналах — в ячейке Хили–Шоу или пористой структуре они претерпевают существенные преобразования: происходит их реструктуризация и частичное разрушение — выделение водной фазы (динамическая нестабильность).

Наряду с рассмотренными выше эмульсиями, широко распространены стабилизированные эмульгаторами ВОВНЭ, к примеру: в пищевой промышленности, нефтедобывающей и лакокрасочной промышленности. Мы изучили течения в каналах и капиллярах ВОВНЭ, стабилизированных Нефтенолом, широко применяемым в потокоотклоняющих технологиях в нефтедобыче. Были проведены экспериментальные исследования плоских течений в прямоугольных каналах — ячейках Хили–Шоу и осесимметричных — в капиллярах. При течении с постоянным перепадом давления стабилизированных ВОВНЭ обнаружен удивительный для дисперсной системы «жидкость — жидкость» эффект «запирания», при более детальном исследовании оказавшийся эффектом динамического запирания.

## 2 Течение стабилизированной эмульсии в ячейке Хили–Шоу

Чтобы представить структуру инвертных дисперсных систем были получены микровидеоизображения использовавшихся ВОВНЭ, которые приведены на Рис. 1. Дисперсионный анализ состава нестабилизированной эмульсии показал, что основное количество микрокапель эмульсии имеет размер 2 мкм, на Рис. 1(а) видно, что наиболее крупные капли достигают размера 5 мкм. Стабилизированная эмульсия состоит из микрокапель размером 0,2–1 мкм (Рис. 1(б)), которые образуют некие конгломераты, при меньшем увеличении выглядящие как более крупные капли (Рис. 1(в)).

Для проведения исследования течения эмульсий в плоских каналах бы-

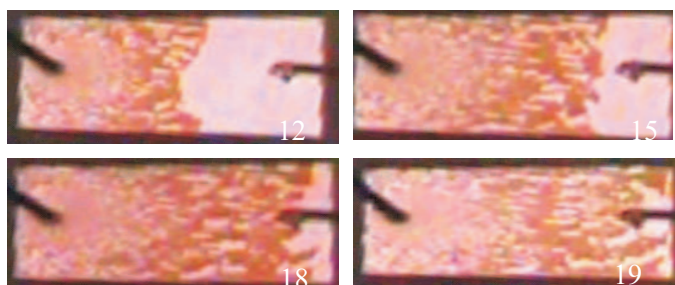


Рис. 2. Преобразование высококонцентрированной обратной водонефтяной эмульсии при течении в ячейке Хили–Шоу (20 мкм×2 см×4 см), заполненной водой. На рисунках указано время в секундах от начала нагнетания эмульсии

ла использована ячейка Хили–Шоу, состоящая из двух плоскопараллельных стеклянных оптических пластин с зазором 17, 20 или 35 мкм и размером 4 × 2 см, ограниченным фольгой. Жидкость подавалась по трубочкам через отверстие в верхнем стекле. Картина течения регистрировалась видеокамерой в масштабе модели и под микроскопом.

Поведение эмульсии с эмульгатором и без него при движении в щелевых каналах существенно различно друг от друга. В ячейке Хили–Шоу при больших скоростях деформации сдвига обычная эмульсия существенно преобразуется: коалесцируют микрокапли (1–5 мкм) эмульсии, выделяются капли воды, которые по мере движения сливаются друг с другом (Рис. 2). Наблюдается красочная картина. Эмульсия движется сплошным фронтом, который по мере движения выравнивается. Видимые на рисунке капли воды по мере движения укрупняются, вытягиваются (скорость их движения значительно выше скорости несущей фазы), прорывают фронт движущейся эмульсии и сливаются с водой, которую вытесняет эмульсия. Со временем в щели образуются застойные зоны, в которых из исходной эмульсии происходит образование сложной эмульсии. Под микроскопом видно, что течение в щели осуществляется не сплошным потоком, а только по «руслам», в которых происходит также образование и движение водной фазы [1].

При нагнетании стабилизированной нефтенолом высококонцентрированной водонефтяной эмульсии в ячейку Хили–Шоу при перепадах давления в 150–200 кПа наблюдается выделение некоторого количества водной фазы из эмульсии. При уменьшении перепада до 50–100 кПа эмульсия ведет себя стабильно. Но во всех случаях обнаруживается эффект запирания ячейки со временем, хотя перепад давления оставался постоянным.

Для измерения расхода жидкости использовались весы марки НМ200

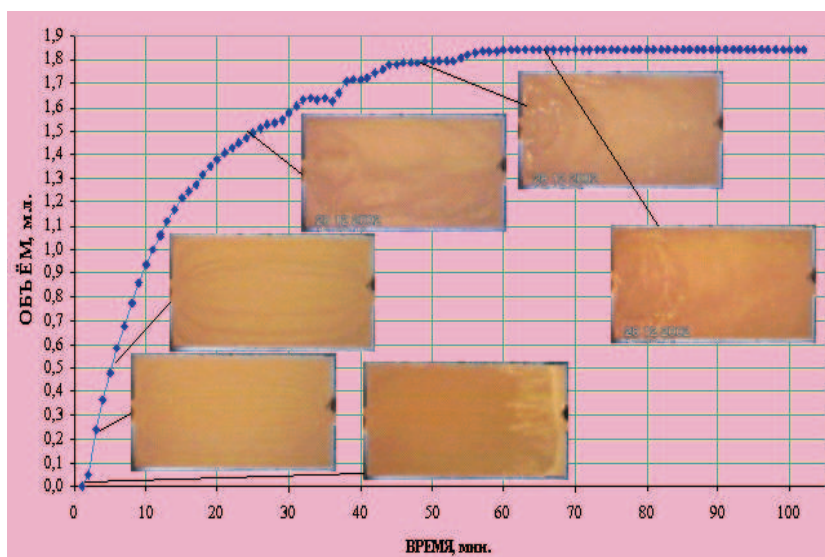


Рис. 3. Экспериментальная зависимость от времени объема прошедшей через ячейку Хили–Шоу ( $35 \text{ мкм} \times 4 \text{ см} \times 2 \text{ см}$ ) стабилизированной эмульсии при постоянном перепаде давления ( $100 \text{ кПа}$ ). Приведены видеозаписи структуры течения в различные моменты времени

с ценой деления  $0,1 \text{ мг}$ , показания которых фиксировались на компьютере. Вытекающий из модели флюид вытеснял из трубки дистиллированную воду, которая по трубочке подавалась в стаканчик с водой, располагавшийся на весах. Таким образом, вес дистиллированной воды пересчитывался в объем протекшей через модель жидкости. Для того, чтобы избежать влияния капиллярных эффектов, конец трубки был опущен в жидкость. С целью уменьшения погрешностей, связанных с испарением воды, на нее наливался тонкий слой веретенного масла.

Зависимости объема протекшей через модель эмульсии от времени получались на компьютере по показаниям весов. Структура течения со временем менялась. Наиболее четко она проявилась при большем зазоре ячейки равном  $35 \text{ мкм}$ . Кривая, характеризующая заклинивание ячейки, приведена на Рис. 3. Там же приводятся видеозаписи структуры течения при различных значениях расхода эмульсии. При большем масштабе изменения структуры течения приводятся на Рис. 4. Довольно быстро после начала нагнетания эмульсии в ячейке Хили–Шоу устанавливается картина с ярко выраженными трубками тока, характеризующими ламинарное течение. По мере протекания эмульсии происходит реструктуризация потока и постепенное уменьшение объемного расхода. Картина течения из ярко выраженного ламинарного переходит в визуально турбулентное, хо-

тя при таких скоростях течения о турбулентности не может быть и речи. При переходе в состояние запираания течение носит явно нестационарный характер, наблюдаются пульсации всего потока, что отражается и на кривой расхода. В состоянии запираания ярко выделяется картина, соответствующая изобарам давления в напряженной среде. Состояние запираания сохраняется в течении длительного времени, но наблюдаемая структура в ячейке Хили–Шоу существенно преобразуется (Рис. 4). Под микроскопом эта картина еще более живописна (Рис. 6, 7).

Обнаруживаемое по показаниям весов, казалось бы, полное запираание, при более тщательном изучении с помощью микроскопа, показало наличие небольшого потока флюида у входного и выходного отверстий (Рис. 5). Величина потока на 4 порядка ниже исходного расхода и со временем не увеличивается, хотя структура эмульсии в ячейке и микромодели по истечении большого срока времени (сутки и более) значительно преобразуется (Рис. 7) и напоминает сложную эмульсию [1], образовывавшуюся при течении нестабилизированной эмульсии. Поскольку микропоток эмульсии всегда присутствует, обнаруженный эффект «запираания» мы назвали эффектом динамического запираания.

Были проведены реологические исследования стабилизированной ВО-ВНЭ на ротационном вискозиметре методом «конус–пластина». При этом было обнаружено, что эмульсия обладает явно выраженными реопектическими свойствами. На Рис. 8, иллюстрирующем зависимость вязкости от времени для эмульсии, находящейся между конусом и пластиной, при постоянной скорости деформации сдвига, видно, что происходит двукратное увеличение вязкости в течении 20 мин.

### 3 Течение стабилизированной эмульсии в цилиндрических трубках

Измерения вязкости проводились на ротационном вискозиметре Реотест 2.1 методом конус–пластина. Из реологических данных видно, что эмульсия является сложной реологической системой, это проявляется в наличии гистерезиса и свойства реопексии (Рис. 8). Если проводить измерения касательного напряжения, постепенно повышая скорость деформации сдвига (прямой ход), а затем, достигнув какого-то определенного значения скорости деформации сдвига, начать постепенно ее понижать (обратный ход), то значения касательного напряжения будут лежать на 2-х разных кривых, одна из них будет соответствовать прямому ходу, другая обратному (Рис. 9). Зависимость касательного напряжения от скорости деформации сдвига носит нелинейный характер, что особенно заметно в двойном логарифмическом масштабе (Рис. 10). Экспериментальные данные были

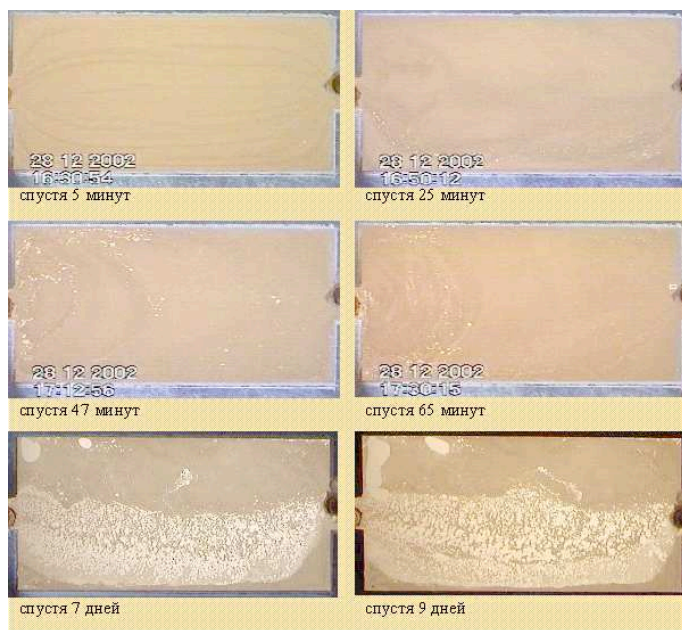


Рис. 4. Изменение структуры течения при динамическом запираии ячейки Хили–Шоу (перепад давления 100 кПа, на правом среднем видеоизображении прямоугольник у выходного отверстия соответствует полю, наблюдаемому под микроскопом)



Рис. 5. Микровидеоизображения единственного участка, у выходного отверстия, на котором при динамическом запираии наблюдается движение, параметры течения указаны стрелками. Ширина экрана — 700 мкм, потока — 200 мкм, перемещение 80 мкм за 12 с.



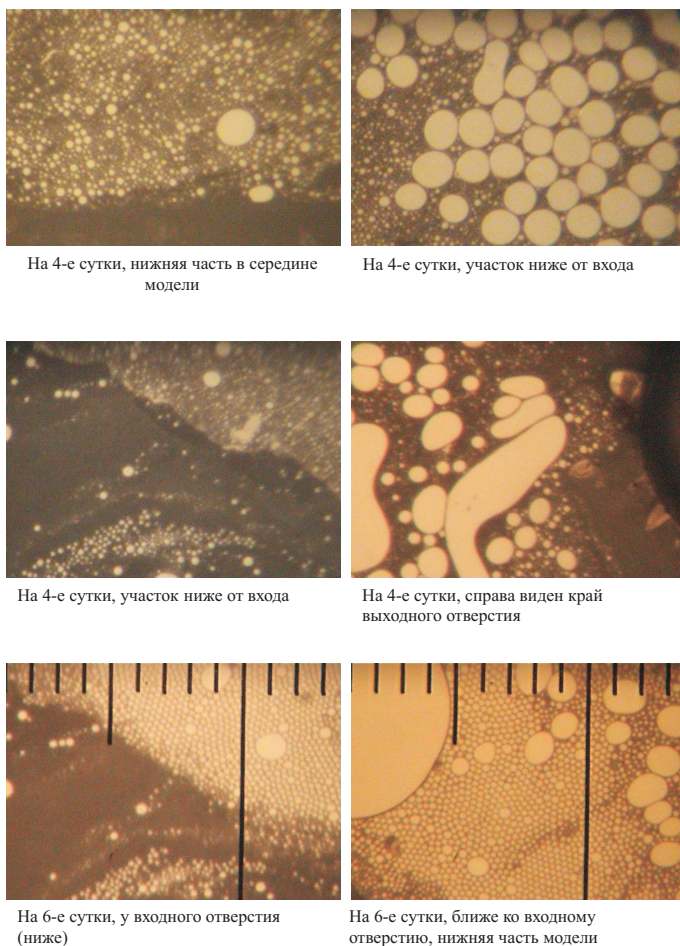


Рис. 6. Изменение структуры эмульсии в ячейке Хили–Шоу (зазор 17 мкм) со временем в состоянии динамического запирания при постоянном перепаде давления 50 кПа (МБС–10 объектив 0,6 х)

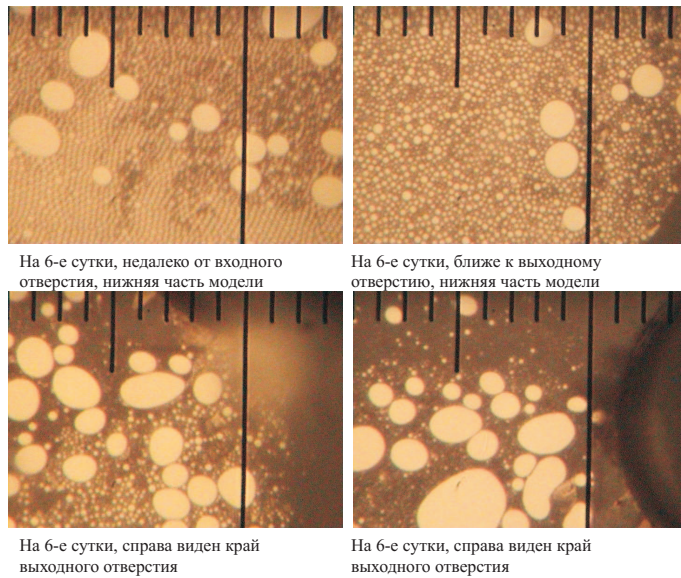


Рис. 7. Изменение структуры эмульсии в ячейке Хили–Шоу (зазор 17 мкм) со временем в состоянии динамического запираания при постоянном перепаде давления 50 кПа (МБС–10 объектив 0,6 x)(продолжение).



Рис. 8. Рост вязкости стабилизированной ВОВНЭ со временем при скорости деформации сдвига 900 1/с между конусом и пластиной (Реотест 2.1)



аппроксимированы степенной моделью Оствальда. Параметры аппроксимации приведены на Рис. 9, соответствующие значения вязкости — на Рис. 11. Данная эмульсия является также средой с нестационарными реологическими характеристиками, то есть ее поведение зависит от предыстории процесса деформирования. На Рис. 9–11. правые части получены для эмульсии, которая находилась между конусом и пластиной при измерении вязкости (прямой и обратный ход) и далее подверглась «упрочению» при вращении конуса с постоянной угловой скоростью  $900 \text{ с}^{-1}$ .

Изучение стабилизированных ВОВНЭ в осесимметричных течениях проводилось на капиллярах разного диаметра от 100 до 700 мкм. Также, как и в случае с ячейкой Хили–Шоу, использовались электронные весы для измерения объема протекающей эмульсии и компьютер для автоматической регистрации полученных значений. Для капилляров меньших диаметров чувствительности этой установки было недостаточно.

Визуальное наблюдение, как с использованием микроскопа, так и без него, какие-либо изменения при течении эмульсий в капиллярах не обнаруживали. Количественные характеристики обнаружили запираание или тенденцию к нему при больших диаметрах. Зависимости объема протекшей через капилляр эмульсии от времени приведены на Рис. 12. В эксперименте использовались 4-х сантиметровые куски капилляра, вырезанные из одного длинного капилляра, предварительно промытого спиртом и водой. Диаметр капилляра был 100 мкм, перепад давления на нем составлял 2 атм. Переход в состояние запираания, по сравнению с моделью трещины — ячейкой Хили–Шоу и капиллярной структурой — микромоделью, происходил намного более интенсивно, как видно из Рис. 12, за время порядка 2-х минут. Хотя диаметр капилляра намного превышал зазор модели трещины (17 и 35 мкм) и глубину каналов (15 мкм) микромодели [3]. Следует отметить некоторый разброс во времени и объеме протекшей жидкости до состояния запираания, несмотря на то что во всех 5 экспериментах использовались куски одного и того же капилляра. Величина расхода в переходном состоянии была более-менее одинаковой. Также существенное отличие от результатов на плоских моделях в том, что довольно значительную часть времени до начала запираания течение в капилляре идет с постоянным расходом, в то время как на плоских моделях объемный расход изменяется с самого начала эксперимента. В капиллярах переход от постоянного расхода к запираанию происходит довольно резко и составляет время не более половины минуты.

Гидравлическое сопротивление капилляра диаметром 250 мкм и длиной 4 см при протекании через него эмульсии оказалось слишком маленьким, что приводило к слишком большому расходу эмульсии, поэтому был взят капилляр длиной 25 см. Как и в предыдущем случае при постоянном перепаде давления, в течение некоторого времени стабилизированная

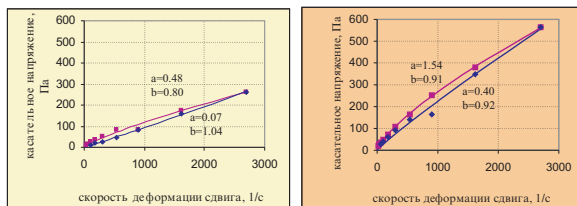


Рис. 9. Зависимость касательного напряжения стабилизированной ВОВНЭ от скорости деформации сдвига (прямой ход — ромбики и обратный — квадратики). Правый рисунок после упрочнения

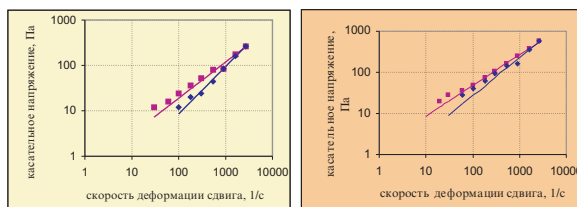


Рис. 10. Зависимость касательного напряжения стабилизированной ВОВНЭ от скорости деформации сдвига (прямой ход — ромбики и обратный — квадратики) в логарифмическом масштабе

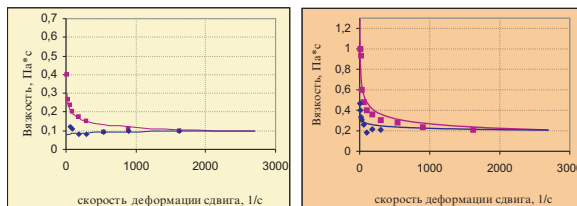


Рис. 11. Зависимость вязкости стабилизированной ВОВНЭ от скорости деформации сдвига (прямой ход — ромбики и обратный — квадратики). Правый рисунок после упрочнения

ВОВНЭ протекала практически с постоянным расходом (Рис. 13). В приведенном масштабе переход в состояние запираания происходит довольно резко. На самом деле картина перехода плавная, как на Рис. 12. При перепаде давления 25 кПа запираание произошло за 30 мин., что видно из нижней кривой Рис. 11, но далее произошел прорыв с довольно быстрым (8 минут) последующим запираанием. При последующей подаче перепада в 51 кПа течение возобновилось, но для запираания потребовалось более часа. В другом эксперименте (верхняя кривая) перепад давления составлял 100 кПа, запираание наступило довольно быстро. Но через 20 минут произошел произвольный прорыв и, далее, наступило запираание, для установления которого потребовался 1 час.

По прошествии значительного времени в капилляре обнаруживались прозрачные участки, которые, по всей видимости, состояли из воды, выделившейся из эмульсии. Изучение под микроскопом обнаружило очень медленное смещение их по капилляру; оказалось, что в состоянии запираания в капилляре на самом деле наблюдается очень медленное ползучее течение. О скорости течения можно судить по макровидеоизображениям, приведенным на Рис. 14, где светлые пятна, прерывающие темный капилляр с эмульсией, перемещаются вдоль по капилляру слева направо. В нижнем углу каждого видеоизображения видно текущее время с точностью до секунды, расстояние в 1 мм «пятна» преодолели более, чем за полчаса. Капилляр со стабилизированной ВОВНЭ находился в состоянии запираания двое суток при перепаде давления 100 кПа. При подаче перепада 200 кПа возникло очень медленное поршневое движение, которое довольно быстро перешло в ползучее движение, зависимость скорости этого течения от времени приведена на Рис. 15.

Детальное изучение запертой системы под микроскопом обнаружило, что в состоянии запираания на самом деле происходит медленное ползучее течение, объемный расход которого на 4 порядка меньше расхода в переходном состоянии, так что в случае капилляров эффект запираания также следует считать динамическим запираанием [4].

В капиллярах большого диаметра 680 мкм состояния запираания нам добиться не удалось, хотя некоторая тенденция к переходу к состоянию запираания, судя по графику, приведенному на Рис. 16, наблюдается. Расчеты, проведенные по формуле Пуазейля, привели к изменению значения эффективной вязкости от 100 до 200 мПа\*с. Такие же значения получались на вискозиметре (Рис. 11) до и после «упрочнения».

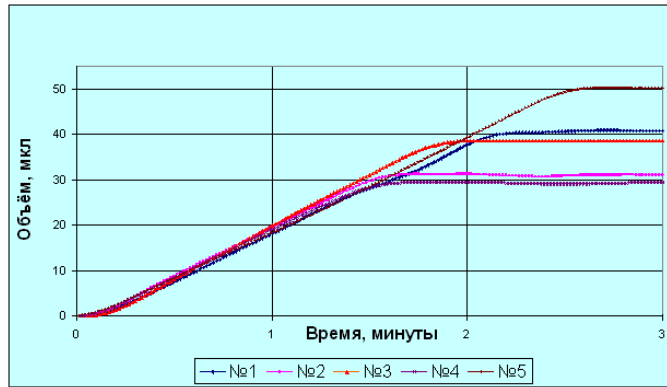


Рис. 12. Экспериментальная зависимость объема прошедшей через одинаковые капилляры (толщина — 100 мкм, длина — 4 см) стабилизированной эмульсии от времени при постоянном перепаде давления (200 кПа)

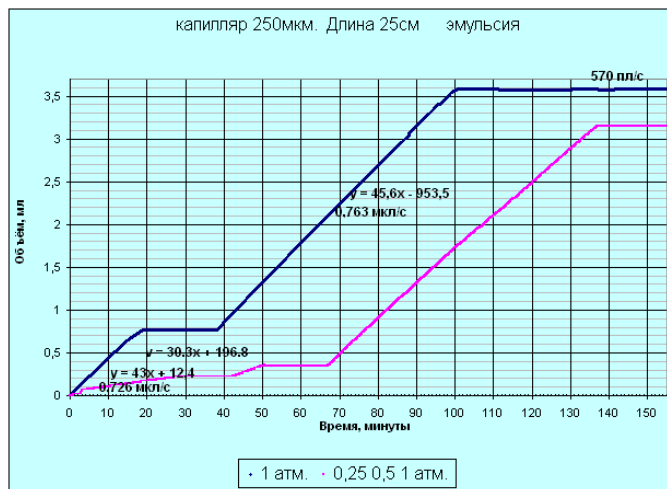


Рис. 13. Экспериментальная зависимость объема прошедшей через капилляр (толщина — 250 мкм, длина — 25 см) стабилизированной эмульсии от времени при постоянных перепадах давления (25 кПа, на 68 минуте 51 кПа, другой эксперимент 100 кПа)

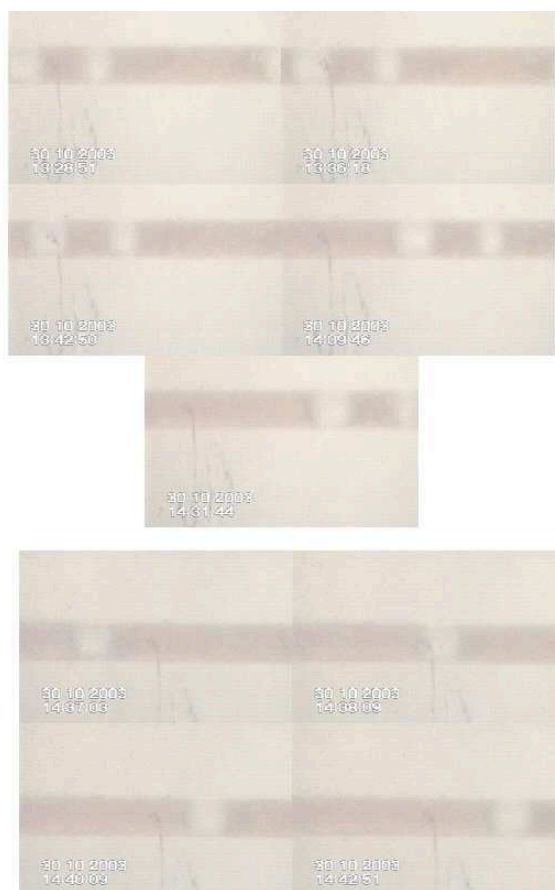


Рис. 14. Ползучее течение в состоянии динамического запираия в капилляре (250 мкм). Размер приведенного на изображении участка капилляра равен 2,2 мм





Рис. 15. Изменение скорости ползучего течения в состоянии заперения стабилизированной ВОВНЭ при подаче давления 200 кПа (система находилась в состоянии динамического заперения в течении 2-х суток при перепаде 100 кПа)

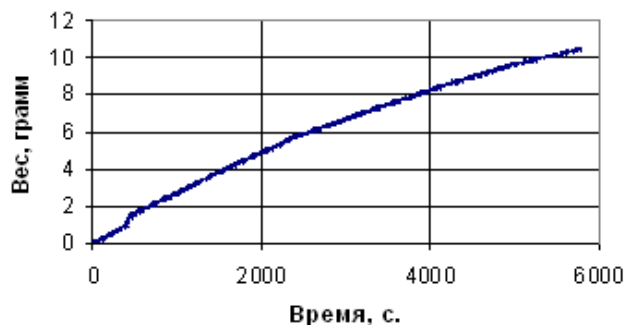


Рис. 16. Экспериментальная зависимость массы протекшей стабилизированной ВОВНЭ от времени через капилляр диаметром 680 мкм

## 4 Математическое моделирование

Обнаруженный эффект динамического запираания в плоских и осесимметричных течениях для дисперсных систем «жидкость-жидкость», на первый взгляд, совершенно не объясним. Единственное предположение, которое может объяснить наблюдающееся запираание, состоит в том, что микрокапельки воды, «ощетинившиеся», словно ежики, молекулами ПАВ, в стабилизированной эмульсии ведут себя подобно песчинкам в суспензиях. Исходя из высказанного предположения, предпринята попытка описать эффект динамического запираания на основе модели вязкосыпучих сред.

Мы использовали приведенную в монографии [5] задачу о движении вязкосыпучих сред в плоском канале [6]. Модель запираания основана на предположении, что в потоке формируется упругое ядро, которое со временем растет и происходит запираание.

При отсутствии массовых сил уравнения для напряжений  $\sigma$  в щели длиной  $L$  и шириной  $2a$ , на торцах которой заданы равномерно распределенные давления  $p_1$  и  $p_2$ , имеют вид:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0. \quad (1)$$

Считается, что движение происходит только вдоль щели по оси  $x$ . Тогда из уравнения неразрывности следует, что  $v_x$  является функцией координаты  $y$ . Для вязкосыпучей среды компоненты тензора напряжений в плоском случае связаны соотношением

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\sigma_{xy}^2 = \sin^2 \varphi \left[ \sigma_x + \sigma_y + 2k \operatorname{ctg} \phi - \frac{2\mu}{\sin \phi} \frac{\partial v_x}{\partial y} \right]^2, \quad (2)$$

где  $\varphi$  — угол внутреннего трения;  $k$  — коэффициент сцепления;  $\mu$  — вязкость. В случае изотропной деформации главные компоненты тензора напряжений и скоростей деформации совпадают, что приводит к зависимости

$$\frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} = \frac{\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}}{\frac{\partial v_x}{\partial x}}. \quad (3)$$

Из (3) следует

$$\sigma_x = \sigma_y = p. \quad (4)$$

Соотношения (1), (2) и (4) составляют замкнутую систему уравнений для определения неизвестных напряжений и скорости течения  $v_x$ . На стенке ставится условие прилипания. Их решение дает следующее выражение для расхода [6]:

$$Q = 2 \left[ \int_{y_0}^a v_x(y) dy + v_x(y_0)y_0 \right] = \frac{p_1 - p_2}{\mu L} \cos^2 \varphi (a - y_0)^2 \frac{2a + y_0}{3}, \quad (5)$$

где  $v_x(y_0)$  — скорость ядра потока;  $y_0$  — ширина потока;  $\int_{y_0}^a v_x(y) dy$  — расход части потока, свободной от ядра.

Множитель 2 в (1) связан с симметрией задачи относительно  $y = 0$ .

Случай течения вязкой и вязкопластичной жидкости получается из (5) при  $\varphi = 0$ ,  $k = 0$  и  $\varphi = 0$  соответственно.

В экспериментах измеряемой величиной является не расход, а масса (суммарный объем), для того чтобы ее найти необходимо проинтегрировать (4) по времени. Из теории не вытекает каких-либо предпосылок о закономерности роста ядра. Обычно для того, чтобы получить решение берут простейшей вариант линейный вариант линейной зависимости [7]:

$$y_0 = bt, \quad (6)$$

где  $b$  — скорость роста ядра.

Интегрируем последнее выражение от 0 до  $t$ , получим

$$V = k (2a^3t - 1.5a^2bt^2 + 0.25b^3t^4). \quad (7)$$

Полученное выражение было использовано нами для сопоставления теоретических результатов с экспериментальными зависимостями. Значения подобранных параметров для некоторых опытов приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Значения подобранных параметров для некоторых опытов

	h, mkm	$\Delta P$ , atm	k	$\varphi$	b, m\s
1	17	0,5	66703,67	82,7311	1,47753E-09
2	17	0,5	156406,6	78,82851	1,88098E-09
3	17	1	260690,6	79,81252	7,74679E-09
4	17	1	240415,4	80,22076	2,41682E-09
5	17	1,5	203205,4	82,67481	2,13592E-08
6	17	2	99583,59	85,56672	1,98727E-08
7	17	2,5	438913,3	81,65417	1,56234E-08
8	35	1	175070,2	81,66603	7,31356E-09

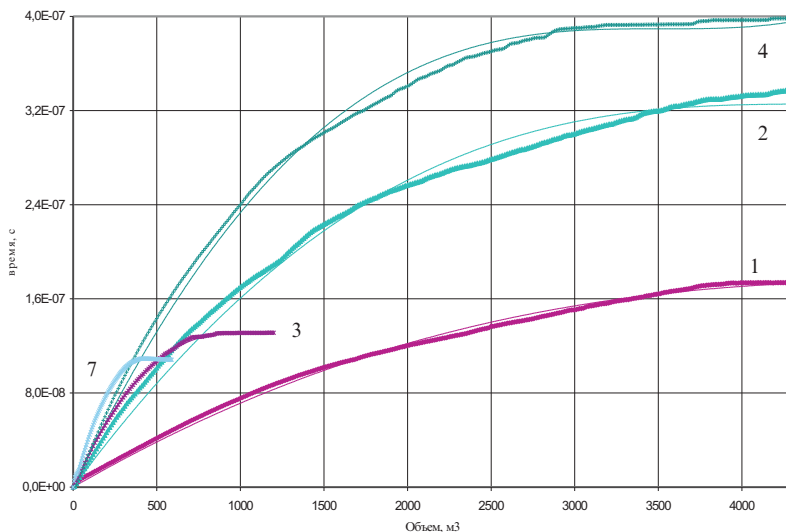


Рис. 17. Сопоставление теоретических (сплошные линии) и экспериментальных (маркеры) зависимостей объема эмульсии, протекшей через модель трещины (толщина 17 мкм) от времени при различных постоянных перепадах давления. (цифрами указан номер эксперимента в Таблице 1)

Видно, что чем больше скорость ядра потока, тем быстрее происходит запирание. Данное обстоятельство указывает на непротиворечивость данной модели. Хотя, наблюдаемая картина течения очень сложна и вряд ли можно говорить, что единственной причиной «запирания» является образование ядра в потоке, в целом данные зависимости удовлетворительно описывают переход гидродинамического течения стабилизированной ВОВНЭ в щели в состояние динамического запирания, что видно на Рис. 17.

Таким образом, в результате исследования установлено, что в широком диапазоне гидродинамических условий (изменение параметров ячейки вдвое, перепада давления от (50 до 300 кПа) в ячейке Хили–Шоу происходит динамическое запирание стабилизированной ВОВНЭ.

В осесимметричном течении происходит резкий переход от течения с постоянным расходом к состоянию динамического запирания. Предложенный физический механизм динамического запирания, основанный на предположении, что микрокапельки воды, «ощетинившиеся» молекулами ПАВ, ведут себя подобно твердым частицам в суспензии, привел к удовлетворительному описанию зависимости объема протекшей эмульсии от времени.

## 5 Заключение

В результате исследований установлено, что в широком диапазоне гидродинамических условий (изменение параметров ячейки вдвое, перепада давления от 50 до 300 кПа) в ячейке Хили–Шоу происходит динамическое запирание стабилизированной высококонцентрированной обратной водонефтяной эмульсии. В осесимметричном течении также обнаружен эффект динамического запирания, в сравнении с плоским течением в этом случае происходит резкий переход от течения с постоянным расходом к состоянию динамического запирания. Приведенный физический механизм динамического запирания, основанный на предположении, что микрокапельки воды, «ощетинившиеся» молекулами ПАВ, ведут себя подобно твердым частицам в суспензии, приводит к удовлетворительному описанию зависимости объема протекшей эмульсии от времени.

## Список литературы

- [1] Ахметов А. Т., Михальчук Т. Н., Решетников А., Хакимов А, Хлебникова М. Э., Телин А. Г. Физическое моделирование фильтрации водонефтяных эмульсий в пористой среде // Вестник инженерингового центра ЮКОС. 2002. № 4. С. 25–31.
- [2] Ахметов А. Т., Телин А. Г., Глухов В. В., Мавлетов М. В. Движение эмульсий в щелевых и пористых структурах // Труды 12-го Европейского симпозиума «Повышение нефтеотдачи пластов». Казань. 2003. 856 с. С. 212–217.
- [3] Ахметов А. Т., Телин А. Г., Глухов В. В., Мавлетов М. В., Силин 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. 2003, апрель. С. 54–58.
- [4] Ахметов А. Т., Телин А. Г., Глухов В. В., Силин А. С. Физическое моделирование и методы визуализации при разработке основ нетрадиционных технологий на базе инвертных дисперсий // Технологии ТЭК. Нефть и капитал. (В печати).
- [5] Мирзаджанзаде А. Х., Хасанов М. М., Бахтизин Р. Н. Этюды о моделировании сложных систем нефтедобычи. Уфа: Гилем, 1999. 464 с.
- [6] Басович И. Б., Бернадинер М. Г., Ерошина Л. В. Особенности течения вязкосыпучих сред в трубах // ПМТФ. 1977. № 6. С. 159–164.
- [7] Огибалов П. М., Мирзаджанзаде А. Х. Механика физических процессов. М.: МГУ, 1976. 367 с.