



УДК 532.135; 532.5

ДИНАМИЧЕСКОЕ ЗАПИРАНИЕ ОБРАТНОЙ ВОДОНЕФТЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ ПРИ РАДИАЛЬНО–РАСШИРЯЮЩЕМся ТЕЧЕНИИ В ЯЧЕЙКЕ Хили-Шоу ¹

А. А. Рахимов, А. К. Ахметов

Институт механики УНЦ РАН, Уфа

Аннотация. Изучено изменение структуры радиально–расширяющегося течения высококонцентрированной стабилизированной обратной водонефтяной эмульсии в плоском капиллярном канале. Обнаружен эффект динамического запираания, который заключается в том, что несмотря на постоянно действующий перепад давления между центром и внешней образующей ячейки, течение эмульсии со временем замирает. Показаны микропотoki в состоянии «запираания». Испытаны различные методы воздействия на систему в состоянии «запираания». Обнаружено, что движение возобновляется в сильных УЗ полях.

Ключевые слова: динамическое запираание, обратная водонефтяная эмульсия, дисперсная система «жидкость–жидкость», радиально–расширяющееся течение, ячейка Хили-Шоу

На основе ранее проведенных экспериментов обнаружен удивительный эффект динамического запираания течения дисперсной системы «жидкость–жидкость» в осесимметричном и плоском потоках [1]. Он состоит в том, что течение стабилизированной нефтенолом водонефтяной эмульсии в капиллярах разного диаметра и в щелевидной модели (ячейка Хили-Шоу) при постоянном перепаде давления со временем останавливается. При этом течение водонефтяных дисперсий сопровождается значительными изменениями их свойств, структуры и проявлением совершенно неожиданных

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы фундаментальных исследований ОЭМПУ РАН «Динамика и акустика неоднородных жидкостей газожидкостных систем и суспензий»

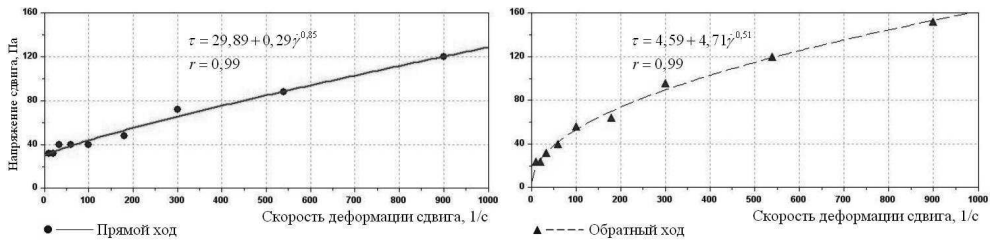


Рис. 1. Зависимость касательного напряжения от скорости деформации сдвига

эффектов [2]. Возникает вопрос, как будет изменяться структура течения и расход эмульсии в радиально–расширяющемся потоке со временем.

Для экспериментального изучения радиально–расширяющегося течения была использована стабилизированная нефтенолом водонефтяная эмульсия (состав: минерализованная вода — 73%, эмульгатор нефтенол НЗ — 4%, нефть — 20%, 32% водный раствор хлорида кальция — 3%), любезно предоставленная фирмой Химеко ГАНГ.

Стабилизированная эмульсия отличается большой динамической стабильностью [3], и даже имеющиеся капли в процессе измерения вязкости диспергируют в микрокапли [4]. Реологические характеристики эмульсии измерялись на ротационном вискозиметре с системой конус–пластина. Измерения касательного напряжения при постепенном повышении скорости деформации сдвига до определенного значения (прямой ход), а далее понижении (обратный ход) показывают, что по мере измерения эмульсия упрочняется (Рис. 1).

Параметры аппроксимационной зависимости $\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$ (модель Гершеля-Бакли) для водонефтяной эмульсии приведены на графике (Рис. 1), где τ — напряжение сдвига; $\dot{\gamma}$ — скорость деформации сдвига; r — коэффициент корреляции; графики аппроксимировались по методу наименьших квадратов. Процесс упрочнения наиболее ярко проявляется при снятии зависимости касательного напряжения от времени при постоянном значении $\dot{\gamma} = 900 \text{ с}^{-1}$ (Рис. 2), то есть эмульсия обладает свойством реопексии [4]. Следует также отметить, что кривая «упрочнения», как видно на графике (Рис. 2), насыщается через 35 минут.

Радиально–расширяющийся поток был реализован между двумя цилиндрическими плоскопараллельными стеклянными оптическими пластинами с зазором между пластинами 17 или 35 мкм и диаметром 57 мм. В центре одной из них было просверлено отверстие диаметром 2 мм, в которое была вставлена полиэтиленовая трубка с внутренним диаметром 1,43 мм, по ней при постоянном избыточном давлении подавалась эмульсия. На внешней образующей пластин было атмосферное давление. Кар-

тина радиально–расширяющегося течения записывалась на цифровую видеокамеру в масштабе модели и микромасштабе через микроскоп Stemi–2000С. Расход измерялся по перемещению мениска в градуированной трубке, по которой поступала эмульсия. Была проведена серия экспериментов с зазором 17 мкм и 35 мкм, при различных перепадах давления от 50 кПа до 300 кПа между входным отверстием и внешней образующей пластин. По показаниям градуированной трубки и по визуальным наблюдениям картины течения в масштабе модели движение эмульсии со временем во всех проведенных экспериментах полностью останавливается в интервале времени от 22 минут до 2,4 часа от начала эксперимента. На Рис. 3 приведен характерный результат, иллюстрирующий изменение расхода при ступенчатом увеличении давления после запираания. Увеличение давления на входе вдвое приводит к возобновлению движения с расходом несколько меньшим начального, и запираение наступает намного раньше. Повторное удвоение давления вновь приводит к возобновлению движения, но уже через 20 минут система вновь переходит в состояние запираания.

По результатам проведенных экспериментальных исследований были выделены основные этапы радиально–расширяющегося течения обратной водонефтяной эмульсии в ячейке Хили–Шоу при постоянном избыточном давлении (Рис. 4):

1. Начальный этап — формирование радиальных трубок тока (Рис. 4, кадр 1);

2. Второй этап — искривление радиальных трубок тока — хаотизация течения, сопровождающаяся уменьшением расхода эмульсии (Рис.4, кадр 2);

3. Третий этап (предшествующий запираанию) — конвульсивный процесс приостановления движения, характеризующийся формированием эквипотенциальных поверхностей (Рис. 4, кадр 3).

Изучение процессов происходящих в ячейке в состоянии запираания с помощью микроскопа (микромасштаб) позволяет обнаружить наличие микропотоков (Рис. 5). Скорость таких микротечений колеблется в пределах 2–5 мкм/с. Особенностью этих течений является то, что микропоток весьма извилист (Рис. 5, кадр 3), то есть движение происходит не в радиальном направлении, как следовало бы ожидать, а по выделившимся каналам, то есть структурированная в ячейке эмульсия препятствует движению вновь поступающей эмульсии.

Для проверки гипотезы о том, что запираение в радиально–расширяющейся ячейке обусловлено процессами у входа подобно суспензии по предложению член-корр. В. П. Казакова был проведен следующий эксперимент: во входное отверстие ячейки (внутри подводящей эмульсию трубки) поместили иголку, которую можно двигать и вращать по всему дну цилиндрического входного отверстия. После наступления состояния запираания

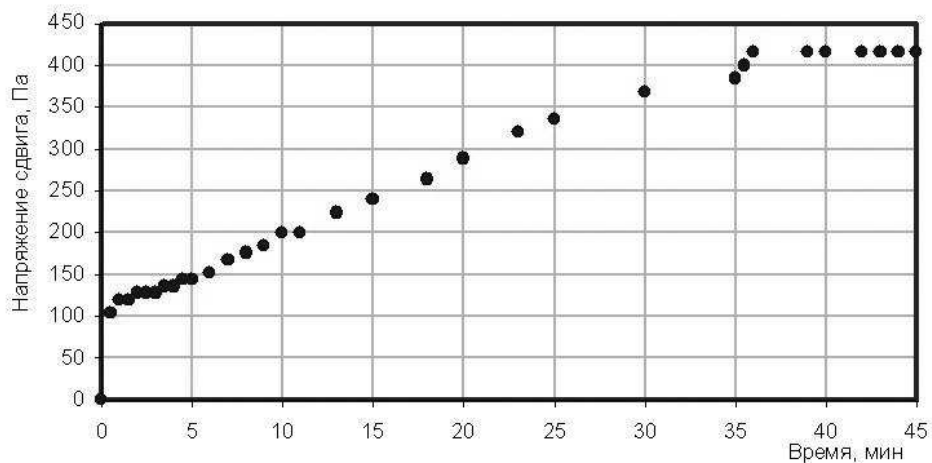


Рис. 2. Зависимость касательного напряжения сдвига от времени при скорости деформации сдвига $\dot{\gamma} = 900 \text{ с}^{-1}$

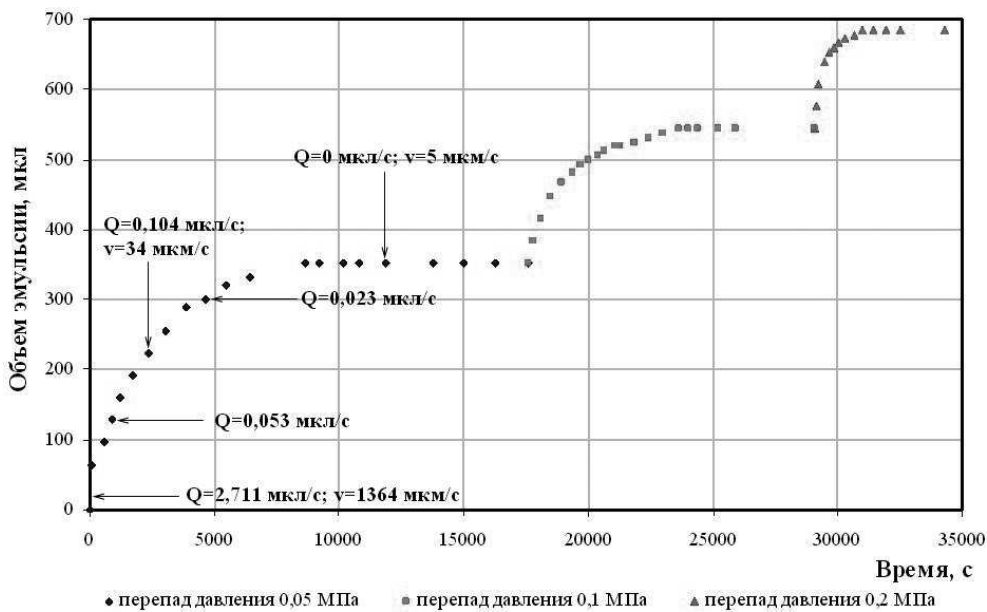


Рис. 3. Зависимость объема протекшей эмульсии от времени при ступенчатом изменении перепада давления

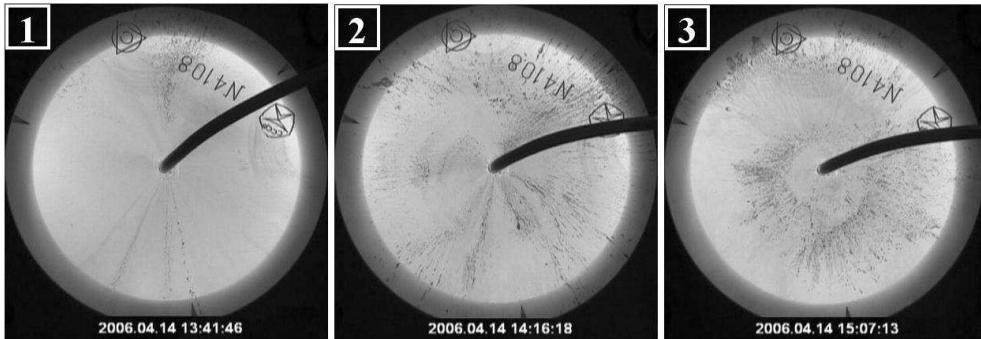


Рис. 4. Изменение структуры течения в радиально–расширяющемся потоке при постоянно действующем перепаде давления

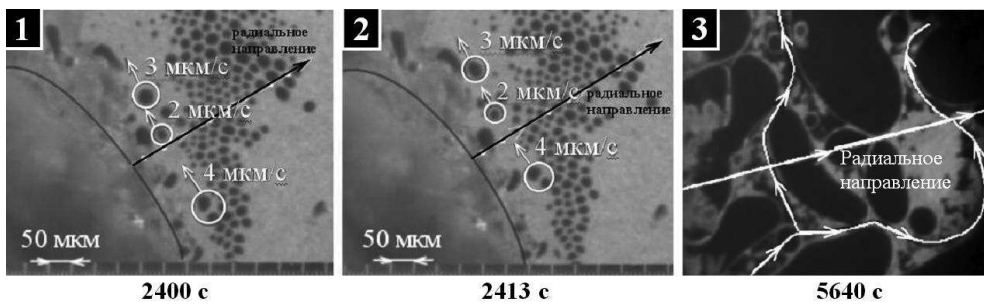


Рис. 5. Микропотоки в состоянии запираия (под кадрами указано время от перехода системы в состояние запираия)

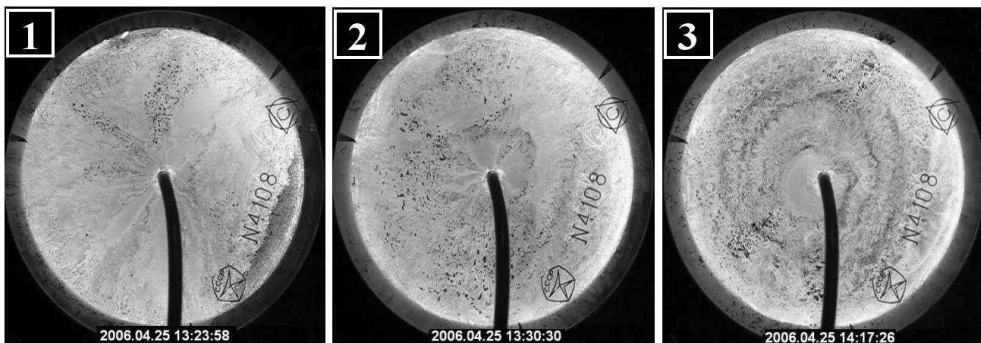


Рис. 6. Изменение структуры течения после воздействия ультразвуковых полей

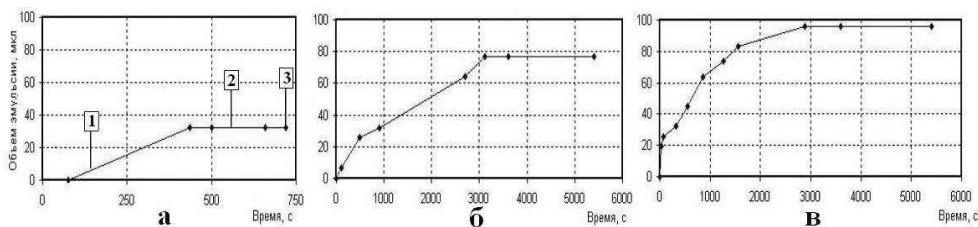


Рис. 7. Влияние мощных УЗ полей на эффект динамического запираания в радиальной ячейке

мы вращали и скребли иголкой в цилиндре у входа в ячейку. Это привело к тому, что скорость движения в микромасштабе увеличилась в несколько раз (до 10–15 мкм/с), но через 2–3 минуты оно начало конвульсивно приостанавливаться, и система вновь перешла в первоначальное состояние запираания, причем по градуированной трубке движение не было зафиксировано. При повторном шевелении иголкой на входе в ячейку с системой ничего не происходило, даже в микромасштабе.

Состояние запираания очень устойчиво, в течении нескольких суток микропотоки только уменьшаются и существенно замедляются. Возник вопрос; каким образом можно вывести систему из такого состояния, к примеру, каково будет влияние акустического воздействия? После запираания модель помещалась в воду и подвергалась действию ультразвукового излучателя Ультратон (избыточное давление не отключалось). Никаких изменений при 20 минутном воздействии заметить не удалось. В следующем подобном эксперименте модель находилась в состоянии запираания (при постоянно действующем избыточном давлении 200 кПа) в течение двух суток, после чего помещалась в ультразвуковую ванну УЗВ 3/100 ТН со значительно более мощными УЗ полями (мощность генератора 150 ± 30 Вт, рабочая частота 25–28 кГц) на 2, 5, 10 минут. Структура потока после воздействия мощных УЗ полей (Рис. 6) меняется приблизительно таким же образом, как и при обычном запираании; при повторных воздействиях картина аналогична.

Кривые зависимостей объема протекшей эмульсии приведены на Рис. 7 (в квадратиках указаны номера кадров, приведенные на Рис. 6). Из графиков видно, что увеличение длительности воздействия УЗ полей приводит к увеличению расхода и времени до наступления запираания.

Таким образом, при радиально–расширяющемся течении стабилизированная нефтенолом обратная водонефтяная эмульсия (микрокапли воды в нефти) проявляет эффект динамического запираания, при этом трансформирующаяся в ячейке эмульсия образует застойные зоны, которые препятствуют движению закачиваемой эмульсии по радиальным линиям тока. При моделировании эффекта динамического запираания наряду с процес-

сами, происходящими у входа в капиллярную систему, необходимо учитывать структурные преобразования в капиллярной щели.

Основными этапами радиально–расширяющегося течения обратной водонефтяной дисперсии в ячейке Хили-Шоу при постоянном избыточном давлении являются: формирование радиальных трубок тока, хаотизация течения, образование эквипотенциальных поверхностей.

Действие мощных УЗ полей позволяет в какой-то мере управлять эффектом динамического запирания.

Список литературы

- [1] Ахметов А., Телин А., Глухов В., Мавлетов М., 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.
- [2] Ахметов А. Т., Глухов В. В., Мавлетов М. В. Проблемы моделирования течения инвертных водонефтяных дисперсий в капиллярах // Труды Математического центра имени Н. И. Лобачевского. Т. 27 // Казанское математическое общество. Материалы XVII сессии Международной школы по моделям механики сплошной среды // Казань: Издательство Казанского математического общества. 2004. С. 30–41.
- [3] Ахметов А., Телин А., Корнилов А. Дисперсионные и реологические характеристики обратных водонефтяных эмульсий на основе нефтей приобского и мамонтовского месторождений // Научно-технический вестник. ЮКОС. № 9. 2004. С. 43–50.
- [4] Телин А., Ахметов А., Калимуллина Г. Тестирование обратных водонефтяных эмульсий с анолитом и сеноманской водой в качестве блокирующих жидкостей для глушения скважин // Научно-технический вестник. ЮКОС. № 10. 2004. С. 50–56.