

Влияние агрегатного состояния дисперсной фазы и ультразвукового воздействия на течение эмульсий в микроканалах¹

Рахимов А.А., Валиев А.А.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

В работе представлены результаты гидродинамических исследований обратных водоуглеводородных дисперсий: эмульсии и, приготовленной из неё путём заморозки дисперсной фазы, суспензии. Наряду с высокой вязкостью эмульсии, значительно превышающей вязкость несущей фазы, успех применения инвертных эмульсий в нефтяной промышленности обусловлен эффектом динамического запираания. Эффект состоит в том, что скорость течения эмульсий в капиллярных структурах и трещинах со временем падает на 3–4 порядка, несмотря на постоянно действующий перепад давления. В работе показано увеличение вязкости с уменьшением температуры, при этом степень запираания эмульсии выше, чем у приготовленной из неё суспензии. Ультразвуковое воздействие дает возможность управлять эффектом динамического запираания. Кратковременное влияние ультразвука позволяет восстановить течение, более же длительное воздействие приводит к тому, что запираание происходит даже в ультразвуке.

Ключевые слова: Водоуглеводородная эмульсия, суспензия, реология, эффект динамического запираания, ячейка Хеле–Шоу, ультразвуковое воздействие, перепад давления

1. Введение

В настоящее время эмульсии широко используются в потокоотклоняющих технологиях для щадящего глушения скважин блокирующей пачкой, в буровых растворах, также большую роль играют их смазочные свойства, реологические особенности и возможность регулирования плотности. Помимо высокой вязкости эмульсий, значительно превышающей вязкость несущей фазы, ключевую роль играет недавно обнаруженный эффект динамического запираания. Эффект заключается в замедлении скорости потока в капиллярах и трещинах на 3–4 порядка, несмотря на постоянно действующий перепад давления [1]. Реологические исследования водоуглеводородных эмульсий показывают увеличение вязкости с увеличением дисперсности эмульсий и более быстрое возникновение динамического

запираания. Увеличение концентрации водной фазы в эмульсии приводит к росту плотности упаковки микрокапель воды и её вязкости [2]. При течении с постоянным перепадом давления в микрожидкостных устройствах, изготовленных методом мягкой фотолитографии, использование высокоскоростной камеры позволило увидеть при запираании деформацию микрокапель воды в эмульсии, приготовленной из простых химических соединений. Движение происходило по каналам между кластерами из деформированных капель, не соответствующим радиальному направлению течения. Микрокапли воды при взаимодействии под давлением принимали форму многогранников со сглаженными углами. При прохождении узкой части микрокапли дробились на более мелкие, а также увеличивалась плотность упаковки за счет роста локальной концентрации и дисперсности, а значит, увеличивалась вязкость в этих областях, которая приводила к замедлению течения [2, 3]. Полученные результаты визуально подтверждают высказанную ранее гипотезу о том, что возникновение динамического запираания объясняется «трением» микрокапель воды

¹Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-31-00294-мол_а).

эмульсии — взаимодействием их оболочек, состоящих из ПАВ, деформацией капель воды под воздействием локального давления в местах резкого сужения микроканала, обеспечивая усиление взаимодействия капель и уплотнение структуры. Скопление капель во входной зоне микроканала приводит к значительному замедлению потока.

Создание эффективной технологии по увеличению нефтеотдачи пласта требует знания и понимания гидродинамических свойств и механизмов процессов протекания жидкости в микроканалах пористой среды. Настоящая работа посвящена решению двух задач, позволяющих расширить границы применимости эффекта динамического запираания:

1) изучение влияния деформации капель на течение эмульсии в ячейке Хеле–Шоу при возникновении запираания. Задача решалась путем сравнения гидродинамических особенностей при течении водоуглеводородной эмульсии и полученной из неё суспензии путём заморозки дисперсной фазы.

2) изучение влияния ультразвукового воздействия (УЗВ) на течение эмульсии. Задача решалась помещением ячейки Хеле–Шоу с эмульсией в ультразвуковую ванну и сравнением течения эмульсии до УЗВ, при УЗВ и после УЗВ.

Физический механизм запираания

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, что приводит к увеличению градиента давления, дальнейшей сепарации капель воды и их частичной деформации. Постепенно несущая фаза выжимается в местах сближения микрокапель аналогично черной пленке [4], проявляется сила трения, происходит структурирование эмульсии во входной зоне, преобразование капель воды из сферической формы в подобие многогранников, точки касания между каплями преобразуются в поверхности. 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, по результатам экспериментов,

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 [3, 5].

2. Влияние агрегатного состояния дисперсной фазы на гидродинамические и реологические свойства водоуглеводородной дисперсии

2.1. Методика эксперимента

В качестве гидравлической системы для исследования течения эмульсии и суспензии использовался цилиндрический микроканал внутренним диаметром 100 мкм и длиной 2 см. Обратная водоуглеводородная эмульсия (в/м) была приготовлена из простых химических элементов. Термостатирование обеспечивалось с помощью элемента охлаждения, работающего на основе эффекта Пельтье (Temperature module ТМ-РЕ-Р) в диапазоне температур $-10 \div +30$ °С. Изменение фазового состояния эмульсии и её компонент при различных температурах анализировалось на дифференциальном сканирующем калориметре (ДСК). Реологические исследования показали плавное изменение свойств дисперсии при понижении температуры и резкое — при переходе в отрицательные.

В работе [6] при приготовлении суспензии из обратной водоуглеводородной эмульсии с концентрациями воды 60%, 50%, 40% и 30% было получено, что образовавшаяся суспензия при концентрации 30% обладает текучестью, а суспензии с более высокими концентрациями вели себя почти как твердое тело, поэтому для замораживания решили использовать эмульсию с концентрацией водной фазы 30%. Использовалась обратная эмульсия в/м следующего состава: вода дистиллированная — 30%, углеводород — 70% (в углеводородной фазе декан — 92%, эмульгатор Span 80 — 16%). Эмульсия забиралась в шприц, герметизировалась и помещалась в морозильную камеру. При помощи вискозиметра ThermoScientific HAAKE MARS III с системой «двойной конус» проведены измерения касательного напряжения в дисперсии при различных скоростях деформации сдвига в диапазоне температур $+20 \div -5$ °С. Данные измерений, как для эмульсий, так и для полученной из неё суспензии, с большой степенью достоверности аппроксимируются степенной функцией модели жидкости Оствальда-де Вааля $\tau = k\dot{\gamma}^n$; где k — индекс консистенции; n — показатель неньютоновского поведения.

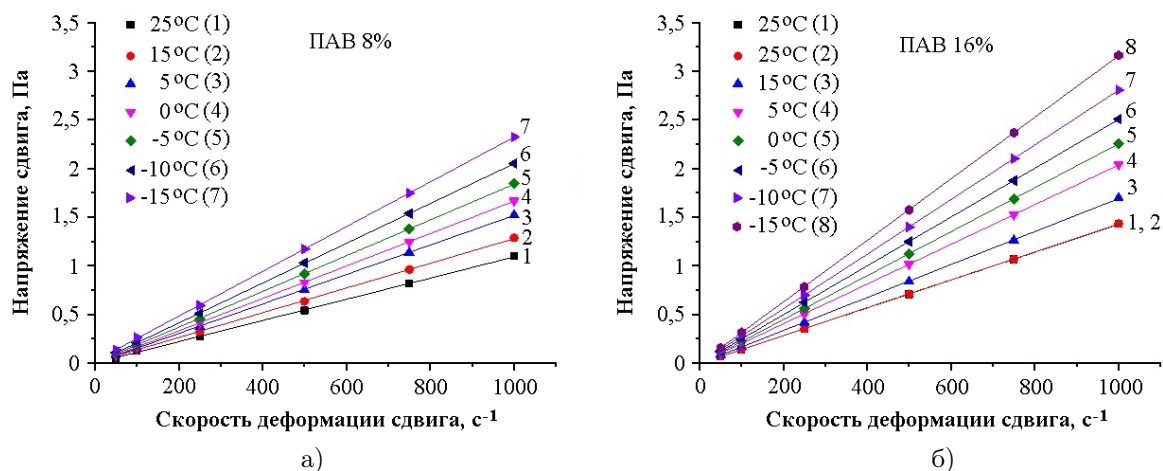


Рис. 1. Реологическая зависимость касательного напряжения от скорости деформации сдвига для углеводородной фазы эмульсии (декан и эмульгатор span 80) при различных температурах: а) для концентрации ПАВ 8%, б) для концентрации ПАВ16%

2.2. Результаты эксперимента

Температура плавления ПАВ и углеводорода ниже $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для определения реологического поведения углеводородной фазы эмульсии с изменением температуры провели измерения при температурах в градусах по Цельсию: 25, 15, 5, 0, -5, -10 и -15 (рис. 1). Получили линейную зависимость касательного напряжения от скорости деформации сдвига, вязкость тоже линейно зависит от температуры, снижение температуры приводит к увеличению динамической вязкости. С ростом концентрации ПАВ вдвое, вязкость углеводородной фазы увеличилась примерно в полтора раза. Снижение температуры с $+25$ до $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к удвоению динамической вязкости.

Проведено реологическое измерение эмульсии с концентрацией водной фазы 30% (рис. 2).

Для модели жидкости Оствальда-де Ваале были проведены расчеты течения через цилиндрический канал радиуса R , длиной l , при перепаде давления ΔP объёмного расхода по известной формуле

$$Q = \frac{n}{3n+1} \pi R^{\frac{3n+1}{n}} \left(\frac{\Delta P}{2kl} \right)^{\frac{1}{n}}$$

и построены расчетные кривые для расхода эмульсии через цилиндрический микроканал диаметром 100 мкм и длиной 2 см.

На рис. 3 приведены экспериментальные и расчетные кривые при тении эмульсии с концентрацией ПАВ 16% в углеводороде при $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и приготовленной из неё путём заморозки дисперсионной фазы суспензии при $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. На начальном участке времени экспериментально полученные расходы для эмульсии и суспензии составляют 14 и 10 мкл/с,

что близко к расчетным, которые составили 16 и 8,5 мкл/с.

Вязкость дисперсии увеличивается с уменьшением температуры, однако степень закипания эмульсии на 1,5 порядка выше, это обусловлено более плотной упаковкой микрокапель воды за счет их деформации при значительных градиентах давления. Твердые частицы (льдинки) суспензии слабо деформируемые, в отличие от капель эмульсии, что позволяет фильтроваться дисперсионной среде через структуру льдинок.

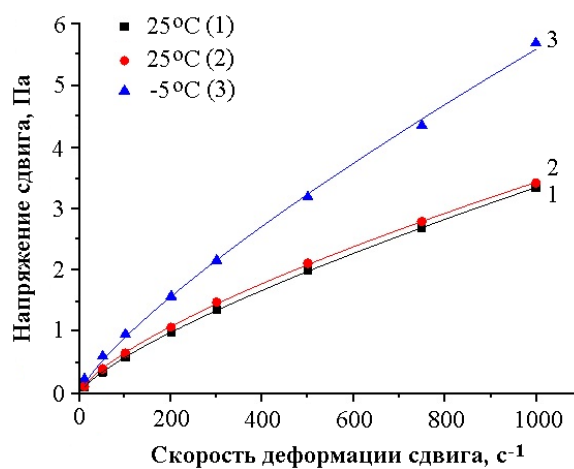


Рис. 2. Реологическая зависимость касательного напряжения от скорости деформации сдвига для эмульсии (концентрацией водной фазы 30%, концентрация ПАВ — 8% в углеводородной фазе) при различных температурах

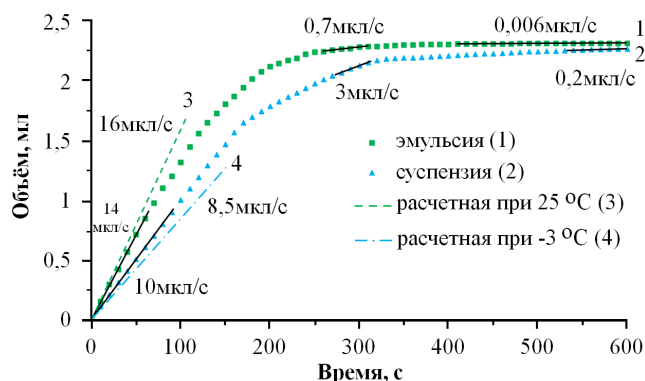


Рис. 3. Зависимость объема эмульсии и суспензии, протекающих через цилиндрический микроканал ($d = 100$ мкм, $l = 2$ см) от времени, при постоянном перепаде давления 200 кПа

3. Изучение влияния ультразвука

3.1. Методика эксперимента

Гидродинамика дисперсных систем определяется физико-химическими свойствами дисперсных сред, геометрией канала, их масштабом и взаимодействием со стенками. В качестве дисперсионных сред использовались водонефтяные эмульсии. Для исследования гидродинамических особенностей течения использовалась промышленная эмульсия ЖГ (жидкость глушения). Эмульсия изготавливалась следующим образом: углеводородная фаза, состоящая из 48% дизельного топлива (зимнее) и 4% эмульгатора нефтенола НЗ 6 перемешивалась при 1800 об/мин и к ней постепенно вливалась дистиллированная вода (48%) в течение 7 минут. Далее 15 минут шло перемешивание при 3700 об/мин. Изучение реологических свойств с помощью вискозиметра НААКЕ MARS III показало, что эмульсия хорошо аппроксимируется степенной зависимостью модели жидкости Оствальда-де Вааля. Размеры дисперсных частиц — капель — в этой эмульсии составляли 1–5 мкм.

Радиально-расширяющийся поток был реализован между двумя цилиндрическими плоскопараллельными стеклянными оптическими пластинами диаметром 57 мм с зазором между ними 17 мкм. 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 внешнюю образующую пластин прикладывалось атмосферное давление. Картина радиально-расширяющегося течения записывалась на цифровую видеокамеру в масштабе модели и микромасштабе через микроскоп Stemi-2000C. Расход измерялся по перемещению мениска в гра-

дуированной трубке, по которой поступала эмульсия. При течении в ячейке Хеле–Шоу при перепаде давления 100 кПа запирание происходило за время порядка нескольких минут.

3.2. Результаты эксперимента

Состояние запирания очень устойчиво, в течение нескольких суток микропотоки только уменьшаются, механические воздействия приводят к изменениям, заметным только в микромасштабе. Для исследования влияния ультразвуковых полей модель в состоянии запирания (при постоянно действующем избыточном давлении 100 и 200 кПа) помещалась в ультразвуковую ванну УЗВ 3/100 ТН (мощность генератора 150 ± 30 Вт, рабочая частота 25–28 кГц).

Воздействие ультразвука приводит к прорыву запирания, причем увеличение длительности воздействия УЗ полей обуславливает рост расхода и времени до наступления запирания. Структура потока после воздействия мощных УЗ полей меняется приблизительно таким же образом, как и при обычном запирании [7].

Проведен эксперимент при течении эмульсии ЖГ в ячейке Хеле–Шоу с радиально-расширяющейся моделью при перепаде давления 100 кПа (рис. 4). В течение минуты произошло запирание. Воздействие в течение 15 секунд ультразвуком на эмульсию ЖГ, запертую при перепаде давления 100 кПа, привело к разрушению структур в эмульсии ЖГ, прорыву запирания и возобновлению течения.

Однако, уже в течение минуты вновь произошло запирание. Запирание оказалось неустойчивым, по истечении 5 минут (с 1760 до 2070 секунды, рис. 4, данные табл. 1) вновь возобновилось течение, прошло 1,2 мкл эмульсии за полторы минуты до повторного запирания (с 2070 до 2160 секунды), что сопоставимо с объемом эмульсии протекшей до запирания без УЗВ.

Далее рассматривалось влияние длительного УЗВ (рис. 5, табл. 2). Эмульсия ЖГ при перепаде давления 100 кПа «заперлась» в ячейке Хеле–Шоу уже через 7 секунд. На 450 секунде на эмульсию воздействовали постоянным ультразвуком. Произошел кратковременный прорыв запертой структуры, эмульсия «заперлась» в ультразвуке через 85 секунд (с 450 по 535 секунду).

Для изучения влияния воздействия на структуру, запирающую эмульсию ЖГ в ячейке Хеле–Шоу при разных перепадах давления провели эксперимент с чередующейся подачей перепада давления, ультразвука, удвоения давления и повторного УЗВ (рис. 6, табл. 3).

Таблица 1. Данные для рис. 4

Время, сек.	Объем мкл	Расход мкл/с	
0	0		$\Delta P = 100$ кПа
21	1,108	0,05276	
24	1,2465	0,04617	
45	1,385	0,00660	
60	1,45425	0,00462	
130	1,4681	0,00020	
300	1,48195	0,00008	
960	1,4958	0,00002	
1740	1,4958	0,00000	
1760	2,14675	0,03255	
2070	2,28525	0,00045	
2160	3,4902	0,01339	
3120	3,4902	0,00000	

Таблица 2. Данные для рис. 5

Время, сек.	Объем мкл	Расход мкл/с	
0	0		$\Delta P = 100$ кПа
0,5	0,1385	0,27700	
1,5	0,277	0,13850	
7	0,4155	0,02518	
285	0,436275	0,00007	
450	0,4432	0,00004	УЗВ
453	0,554	0,03693	
457	0,6925	0,03463	
460	0,831	0,04617	
463	0,9695	0,04617	
465	1,108	0,06925	
470	1,2465	0,02770	
475	1,385	0,02770	
490	1,5235	0,00923	
535	1,59275	0,00154	
1350	1,59275	0,00000	

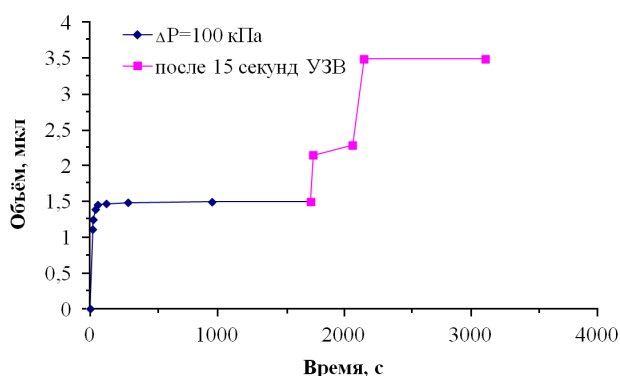


Рис. 4. Расходная характеристика эмульсии ЖГ при 100 кПа до УЗВ и после 15 секунд УЗВ

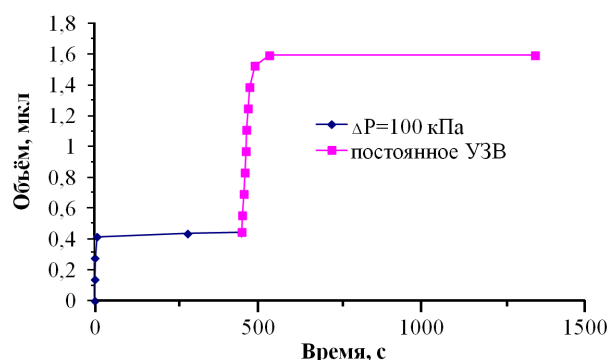


Рис. 5. Расходная характеристика эмульсии ЖГ при 100 кПа до УЗВ и при дальнейшем постоянном УЗВ

Сначала подали перепад давления 100 кПа, за 42 секунды эмульсия «заперлась» в ячейке. Расход до 1800 секунды составил 0,00003 мкл/с, в сравнении с начальным участком, составляющим 0,01389 мкл/с, он уменьшился в 463 раза. На 1800 секунде произошло окончательное запираение, до 2580 секунды расход равен нулю по показаниям электронных весов. На 2580 секунде подали постоянное УЗВ. Произошел прорыв запертой структуры, спустя 7,5 минут (на 3030 секунде) произошло запираение в ультразвуке. На 3960 секунде подали перепад давления 200 кПа. Произошел прорыв запираения, расход за первые 20 секунд (с 3960 по 3980) составил 0,029 мкл/с, что чуть больше, чем в 2 раза превышает расход при подаче перепада давления 100 кПа (0,01389 мкл/с). За 17 минут (с

3980 до 4980 секунду) расход по показаниям весов упал до нуля. На 5400 секунде повторно подали постоянное УЗВ. Произошло небольшое движение в течение минуты с расходом, в 33 раза ниже расхода при перепаде давления 200 кПа, и последующее длительное течение длительностью 16 минут (с 5460 до 6420 секунды), за время которого расход упал до нуля. Можно отметить, что характер наступления запираения в УЗВ и при подаче перепада давления 200 кПа совпадают: резкий скачок расхода в течение минуты и длительное уменьшение в течение 16–17 минут с последующим падением расхода до нуля. То, что расход вначале резко растет, объясняется прорывом запертой структуры, а его последующее длительное замедление связано с блокировкой зон выхода в ячейке Хеле–Шоу.

Таблица 3. Данные для рис. 6

Время, сек.	Объем мкл	Расход мкл/с	
0	0		$\Delta P = 100$ КПа
19	0,264	0,01389	
42	0,528	0,01148	
1800	0,5808	0,00003	
2580	0,5808	0,00000	
2604	0,6864	0,00440	УЗВ1
2623	0,792	0,00556	
2652	0,8976	0,00364	
2702	0,9504	0,00106	
3030	1,0032	0,00016	
3960	1,0032	0,00000	
3980	1,584	0,02904	
4020	1,6896	0,00264	
4100	1,7424	0,00066	
4180	1,7952	0,00066	
4280	1,8216	0,00026	
4560	1,8744	0,00019	
4740	1,9008	0,00015	
4980	1,9536	0,00022	
5400	1,9536	0,00000	УЗВ2
5460	2,0064	0,00088	
5820	2,0592	0,00015	
6420	2,112	0,00009	
7560	2,112	0,00000	

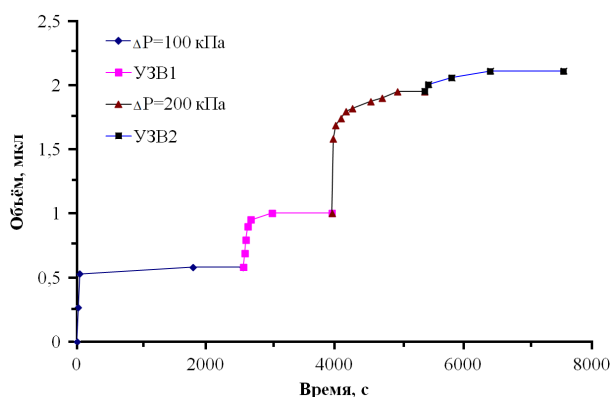


Рис. 6. Расходная характеристика эмульсии ЖГ при разных перепадах давления и постоянном УЗВ

4. Заключение

Вязкость дисперсии увеличивается с уменьшением температуры, однако степень записания эмульсии на 1,5 порядка выше, чем записание суспензии, что обусловлено более плотной упаковкой микрокапель воды за счет их деформации при значительных градиентах давления. Твердые частицы (льдинки) суспензии слабо деформируемы, в отличие от капель эмульсии, что позволяет фильтроваться дисперсионной среде через структуру льдинок. Таким образом, ещё раз подтверждается вывод о том, что ключевую роль в падении скорости течения при постоянном перепаде давления на 2 и более порядка, играет не столько вязкость дисперсии, сколько эффект динамического записания, заключающийся в деформации микрокапель воды, их способности создавать плотную структуру с отсутствием фильтрации сквозь неё, которую не могут создать твердые недеформируемые частицы.

Действие ультразвуковых полей при радиально-расширяющемся течении практически полностью восстановило первоначальный расход, но время записания после выключения излучателя зависело от времени воздействия. При более длительном облучении система постепенно начинала запирается, изменение структуры течения и время перехода в состояние записания были примерно такими же, как и первоначально, при отсутствии ультразвуковых полей. Таким образом, мощные УЗ поля можно использовать для управления эффектом динамического записания, что имеет большое практическое значение.

Список литературы

- [1] 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. 2004. № 1(14). С. 33–36.
- [2] Рахимов А.А., Ахметов А.Т. Экспериментальные исследования гидродинамических эффектов при течении обратных водоуглеводородных эмульсий в микроканалах // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2016. Т. 11, № 1. С. 30–37.
- [3] Рахимов А.А. Изучение эффекта динамического записания в микроканале, влияние включений // Вестник Башкирского университета. 2013. Т. 18, № 2. С. 344–349.
- [4] 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).

- [5] Саметов С.П. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему: «Гидродинамические эффекты при течении эмульсий в осесимметричных микроканалах». Уфа, 2011.
- [6] Ахметов А.Т., Валиев А.А. Влияние агрегатного состояния дисперсной фазы на гидродинамические и реологические свойства эмульсий и суспензий // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. Вып. 9 // Материалы V Российской конференции с международным участием «Многофазные системы: теория и приложения», посвященной 20-летию со дня основания Института механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН (Уфа, 2–5 июля 2012). Часть II. Уфа: Нефтегазовое дело. 2012. С. 18–21.
- [7] Ахметов А.Т., Рахимов А.А., Ахметов А.К. Динамическое запирание обратной водонефтяной дисперсии при радиально-расширяющемся течении в ячейке Хили-Шоу // Современные методы физико-математических наук. Труды международной конференции. 9–14 октября 2006 г., г. Орел. Т. 2. Орел: Изд-во ОГУ, Полиграфическая фирма «Картуш». 2006. С. 83–89.

Influence of the aggregate state of the dispersed phase and ultrasonic effect on the flow of emulsions in microchannels

Rakhimov A.A., Valiev A.A.

Mavlutov Institute of Mechanics, Ufa

The paper presents the results of hydrodynamic studies of inverse water hydrocarbon dispersions: emulsions and, prepared from it by freezing the dispersed phase, suspension. In addition to the high viscosity of the emulsion, a much higher viscosity of the carrier phase, the success of the use of invert emulsions in the oil industry is due to the dynamic blocking effect. The effect is that the flow velocity in the capillary structures and cracks decreases by 3-4 orders of magnitude, in spite of the constantly acting pressure drop. The work shows an increase in viscosity with decreasing temperature, while the degree of blocking of the emulsion is higher than that of the suspension prepared from it. The ultrasonic effect makes it possible to control the effect of dynamic blocking. The short-term effect of ultrasound makes it possible to restore the flow, while a longer exposure leads to the fact that blocking occurs even in ultrasound.

Keywords: water hydrocarbon emulsion, suspension, rheology, dynamic blocking effect, Hele–Shaw cell, ultrasonic effect, pressure drop



Многофазные системы:
модели, эксперимент, приложения

ИМех им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Статья рекомендована к публикации
Программным комитетом VI Российской конференции
«Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения»