

**Индукцированные акустическими полями процессы
структурообразования в высокомолекулярных средах**

*А. Р. Каримов, В. К. Богданов, Р. А. Валиуллин, Р. Ф. Шарафутдинов,
А. Ш. Рамазанов, А. А. Рухман, Т. Р. Хабиров, А. Е. Шиканов*

Рассмотрены механизмы разрушения и синтеза макромолекул, которые могут стимулироваться внешними акустическими полями в многофазной нефтяной дисперсной среде, содержащей большое количество растворенного в нефти газа. Предполагается, что динамика этих пузырьков зависит от изменения геометрии потока и возбуждения звуковых колебаний в потоке. Особое внимание уделено процессу изменения плотности жидкости за счет эффекта внутреннего эрлифта в жидкой дисперсной среде. Механически вызванные кинетические изменения макромолекул (разрушение и синтез коллоидных цепей) могут происходить, когда пузырьки схлопываются. Эти особенности могут быть использованы при обработке нефти и в геофизических исследованиях скважин для оценки нефтенасыщенности пластов.

Ключевые слова: акустический цилиндрический излучатель, магнитостриктор, пьезокерамический элемент, кавитация, полимерная жидкость, углеводороды, нефть, теплота разгазирования нефти, соли.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-2-128-143

Введение

По современной классификации нефтяные среды относят к классу жидких дисперсных систем [1–3], чьи характерные

структурные единицы меняются от микроскопических (10^{-7} см) до макроскопических (10^{-4} см) масштабов. При этом дисперсная фаза нефтяного раствора может быть как твердой, так и газообразной, при-

Каримов Александр Рашатович^{1,2,5}, в.н.с., профессор, д.ф.-м.н.

E-mail: ARKarimov@mephi.ru

Богданов Владислав Константинович¹, м.н.с.,

Валиуллин Рим Абдуллович⁴, профессор, д.т.н.

Шарафутдинов Рамиль Фаизырович⁴, профессор, д.ф.-м.н.

Рамазанов Айрат Шайхуллович⁴, профессор, д.т.н.

Рухман Андрей Александрович³, директор, к.т.н.

Хабиров Тимур Раильевич⁴, доцент, к.ф.-м.н.

Шиканов Александр Евгеньевич¹, профессор, д.т.н.

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

² Объединенный институт высоких температур РАН. Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13/2.

³ ООО «Ультразвуковые генераторы».

Россия, 108811, Москва, Восточный проезд, 7.

⁴ Башкирский государственный университет.

Республика Башкортостан, 450076, г. Уфа,

ул. Заки Валиди, 32.

⁵ Российский экономический университет

имени Г. В. Плеханова.

Россия, 117997, Москва, Стремянный пер., 36.

Статья поступила в редакцию 04 декабря 2020 г.

© Каримов А. Р., Богданов В. К., Валиуллин Р. А., Шарафутдинов Р. Ф., Рамазанов А. Ш., Рухман А. А., Хабиров Т. Р., Шиканов А. Е., 2021

чем чаще всего нефтяной раствор является смесью из частиц разных фаз.

С физической точки зрения, дисперсные частицы представляют собой совокупность большого числа взаимодействующих частиц, основные свойства которых отличаются от совокупности взаимодействующих молекул или атомов относительной слабостью межчастичных взаимодействий, имеющих порядок тепловой энергии. Такие особенности обусловлены большими размерами и формой коллоидных частиц, при этом в процессах образования и разрушения коллоидных структур преобладают энтропийные факторы, делающие нефтяные растворы особо чувствительными к относительно слабым внешним воздействиям различной физической природы. Данные физико-химические изменения могут проявиться как в условиях залегания нефти, так и в процессах добычи и переработки нефти. Поэтому они могут быть использованы как для диагностики нефтяных месторождений, так и для инициирования образования и деструкции различных макромолекулярных структур в нефтяных потоках.

В настоящей работе обсуждается возможность управления этими физико-химическими процессами с помощью внешних акустических полей, непосредственно воздействующих на коллоидные частицы при изменении макроскопических параметров среды заданным образом, например, при движении потока нефти в условиях, когда гидродинамические параметры потока будут меняться заданным образом, т. е. процесс воздействия на систему будет иметь быструю (акустические колебания) и медленную (нестационарное гидродинамическое течение) составляющую. Поэтому в зависимости от условий нахождения нефти в качестве управляющего фактора мы можем использовать одну из этих составляющих.

Основные физико-химические свойства нефтяных систем

Вкратце остановимся на основных физико-химических свойствах нефти, позволяющих рассчитывать на ожидаемые структурные изменения. Нефть представляет собой многокомпонентную, в общем случае многофазную среду низкомолекулярных и высокомолекулярных соединений, относящихся к различным гомологическим рядам [1–3]. Низкомолекулярные соединения представлены в основном парафиновыми, нафтенопарафиновыми и ароматическими углеводородами. Высокомолекулярная часть нефти состоит из высокомолекулярных парафиновых углеводородов и бициклических ароматических углеводородов ряда бензола и нафталина, смол и асфальтенов. Также следует иметь в виду, что некоторые соединения при уменьшении давления в среде, происходящем естественным образом при эксплуатации нефтяных залежей или подъеме нефти на поверхность, ниже давления насыщенных паров переходят в газовую форму. Точный состав попутного нефтяного газа зависит от состава нефти, в которой он растворен, условий залегания, но, как правило, он содержит углеводороды с примесью углекислого газа или азота, для которых давление дегазации лежит в диапазоне 50–200 атм [4]. Также в нефти в незначительном количестве присутствуют ванадий, хром, никель, железо, кобальт, магний, титан, натрий, кальций, германий, редкоземельные элементы, а также фосфор и кремний, однако массовое содержание этих элементов не превышает 1 %.

Данные компоненты нефти характеризуются различными размерами, массами и дипольными моментами, что определяет многообразие возможных вариантов установления межмолекулярных связей за счет

сил Ван-дер-Ваальса, осмотического притяжения и стерического отталкивания, приводящих к образованию разнообразных пространственных надмолекулярных структур, физико-химические свойства которых определяются характером межмолекулярных сил. В частности, энергия возникающих связей составляет 3,4–4,2 кДж/моль, что на два порядка меньше энергии химической связи из-за разного расстояния δ между атомами взаимодействующих молекул (330–600 пм и 120–160 пм соответственно) [3]. Тогда как энергия химической связи не зависит от молекулярной массы, энергия физической связи с ростом молекулярной массы возрастает. При большом числе атомов в молекуле энергия межмолекулярных связей может превышать энергию химической связи. В этом случае образующиеся ассоциаты могут обладать высокой прочностью, т. е. образование дисперсной фазы в основном происходит из высокомолекулярных соединений, энергия взаимодействия которых на несколько порядков выше, чем у низкомолекулярных. Однако в равновесии потенциальная энергия притяжения больших молекул уравнивается силами отталкивания за счет теплового движения, поэтому формирование обратимых ассоциированных состояний зависит от соотношения этих энергий. Таким образом, нефтяные среды в зависимости от внешних условий могут проявлять свойства молекулярных растворов или дисперсных систем, когда в зависимости от величины запасенной энергии могут формироваться коллоидные частицы различной формы и пространственных масштабов, имеющих развитую пространственную структуру [1–3].

На качественном уровне рассмотрим возможный сценарий формирования структуры нефтяной системы в случае, когда она проявляет свойства коллоидной

системы, но при этом происходит выделение растворенного газа. В таких условиях в зависимости от величины запасенной энергии могут формироваться пространственные образования различной формы и пространственных масштабов. Типичное экспериментальное распределение частиц по размерам в водно-нефтяной системе, стабилизированной частицами оксида алюминия, представлено на рис. 1, а [5]. В данном случае присутствие частиц оксида алюминия препятствует слипанию и укрупнению частиц. Как правило, такие зависимости теоретически описываются гауссовским распределением [2, 6]:

$$f(d) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(d - \bar{d})^2}{2\sigma^2}\right),$$

здесь d – диаметр коллоидной частицы; \bar{d} – арифметическое среднее и σ – стандартное отклонение, или логнормальным распределением

$$f(d) = \frac{1}{\sigma_L d \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(d_L - \bar{d}_L)^2}{2\sigma_L^2}\right),$$

здесь $d_L = \ln(d)$, \bar{d}_L и σ_L – соответствующее среднее и стандартное отклонение для d_L . Для наглядности оба этих распределения представлены на рис. 1, б [6]. Как видно из рисунка, в данном случае экспериментальное распределение более близко описывается логнормальным законом.

Наличие в системе частиц разного размера приводит к тому, что среда приобретает случайную дискретную структуру, состоящую из достаточно плотно заполненных частицами областей пространства и пустот между ними (по этому поводу см., например, [8, 9]). В качестве иллюстрации такой структуры на рис. 2 представлена типичная микрофотография водно-нефтяной среды [5].

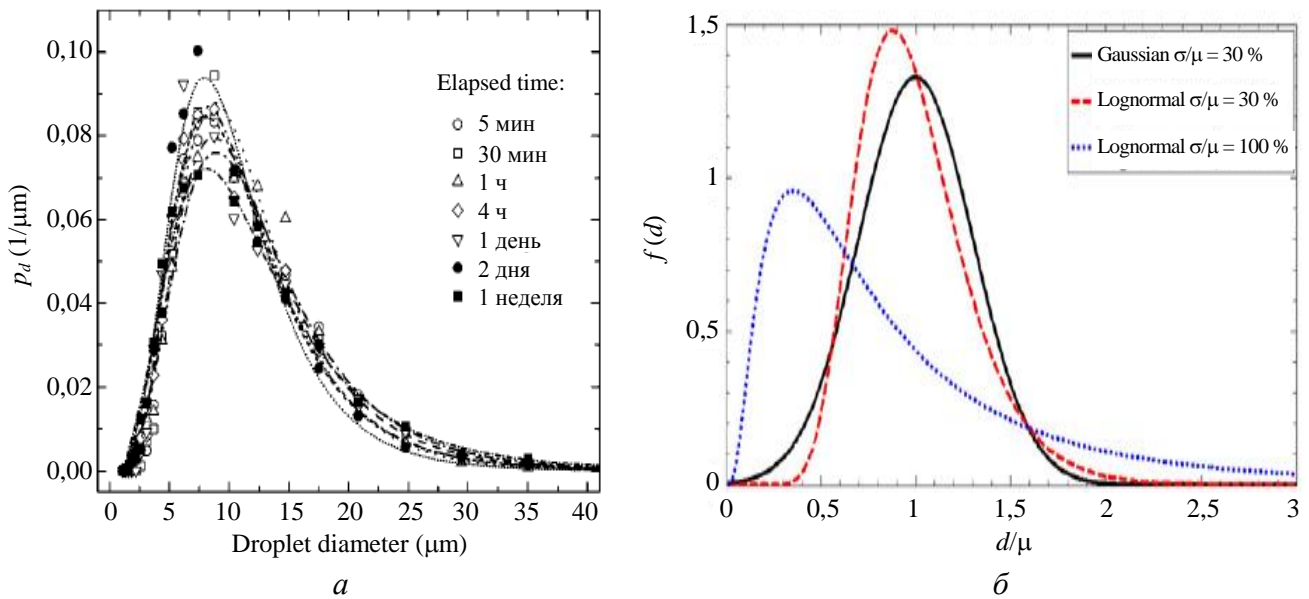


Рис. 1. Распределения по размерам частиц: а) – экспериментальное распределение в водно-нефтяной системе, стабилизированной частицами оксида алюминия [7] и б) – теоретические нормальное и логнормальное распределения.

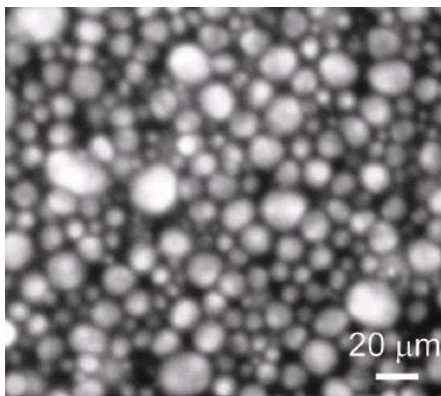


Рис. 2. Фотография микроструктуры водно-нефтяной системы, стабилизированной частицами оксида алюминия.

При этом следует иметь в виду, что даже при гексагональной упаковке системы, состоящей из сферических частиц одинакового размера, теоретически допустимая степень заполнения пространства составляет $g_0 = 72\%$ [8, 9]. Величина g будет зависеть в первую очередь от соотношения количества частиц разного размера, а также от межмолекулярных взаимодействий, определяющих заполнение пространства частицами и процессы деструкции и образования частиц. В зависимости от этих параметров возможна как более плотная упаковка с $g > g_0$, так и случай

с $g < g_0$. Однако в любом случае среда содержит значительное количество пустот, которые при уменьшении давления ниже давления насыщения интенсивно будут заполняться растворенным газом при разгазировании нефти, т. е. по сути данные пустоты являются кавитационными зародышами, которые будут заполняться попутным газом, что может привести к интенсификации ряда физических процессов, полезных как для эксплуатации нефтяных месторождений и термогидродинамических исследований скважин по оценке состояния пласта, так и при последующей обработке нефти.

Ультразвуковая активация

Развитие данных кавитационных процессов будет определяться такими макроскопическими параметрами среды, как скорость, плотность, давление потока. При этом гидродинамические параметры потока, в свою очередь, могут меняться в зависимости от ограничивающей поток геометрии, а также амплитуды акустического поля. Такое комбинированное воздействие может быть осуществлено в схеме, изоб-

раженной на рис. 3. На качественном уровне рассмотрим происходящие здесь процессы.

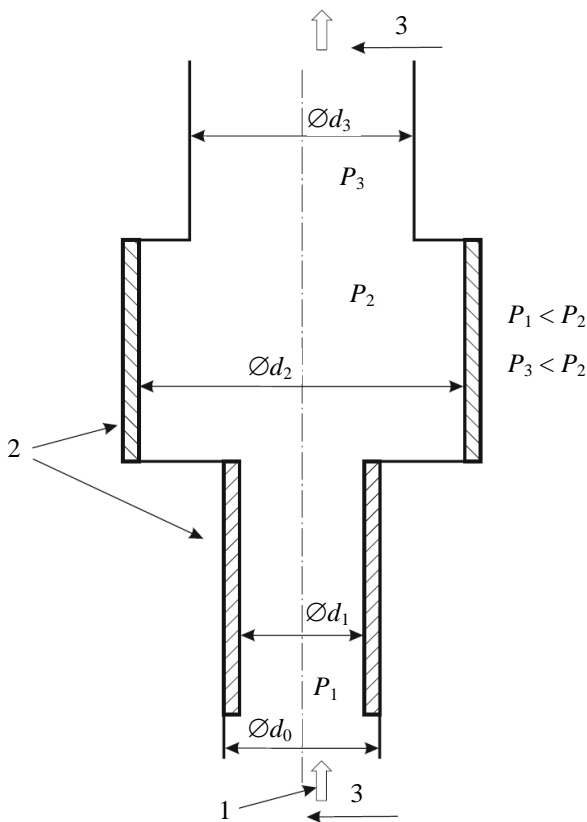


Рис. 3. Принципиальная схема кавитационной установки: 1 – поток нефти; 2 – акустические излучатели; 3 – гидродинамический тракт.

Прежде всего отметим, что непосредственное воздействие ультразвуковых волн на структуру коллоидных частиц невозможно. Действительно, физическая суть такого воздействия состоит в разрыве межмолекулярных связей. Для этого необходимо, чтобы на расстоянии порядка длины межмолекулярной связи δ под действием ультразвуковой волны возник необходимый перепад давления. Такой перепад может реализоваться на $\lambda/4$ длины акустической волны, т. е. должно выполняться соотношение $\frac{\lambda}{4} \approx \delta$. Приняв для дальнейших оценок в качестве характерных значений $\delta = 600$ пкм и скорость распространения упругих волн $a = 1500$ м/с

(это скорость звука в воде и биологических тканях [7]), из данного соотношения получаем $\omega > 10^{12}$ Гц, что значительно превышает верхнюю границу ультразвукового диапазона – 1 ГГц. Следовательно, ультразвуковая волна может воздействовать только на образующиеся в среде газовые пузырьки, например, в зоне акустического волновода, где падение давления будет сопровождаться ростом отдельных микроскопических пустот при их заполнении газом, содержащимся в окружающей среде, с одновременным аккумулярованием энергии растущей поверхностью пузырьков [10, 11]. В результате образуется двухфазная среда, содержащая огромное количество пузырьков, т. е. плотность среды существенно уменьшится, что может облегчить подъем нефти с больших глубин. По сути, здесь мы имеем дело с внутренним эрлифтом, когда газовые пузырьки образуются за счет внутренних процессов, происходящих в объеме нефтяной среды [4].

К тому же, на выходе установки, в месте, где происходит резкое увеличение давления, будет проходить схлопывание пузырьков с локальным выделением запасенной энергии, что может привести к разрыву среды [10–12], т. е. селективным образом может меняться структура среды, ее физико-химические свойства. В данном случае кавитационная область представляет собой своеобразный трансформатор мощности, в котором сравнительно медленно накапливаемая энергия освобождается в течение очень короткого времени, в результате чего мгновенная мощность во много раз превосходит среднюю, вводимую излучателем в эту область.

В зависимости от соотношения между характерными параметрами в схеме на рис. 3 будут реализовываться различные пути эволюции кавитационных зародышей. Чтобы на качественном уровне определить необходимые условия реализации рассматриваемых процессов структурооб-

разования, оценим по порядку величины характерные временные и пространственные масштабы индуцированных волновых движений газожидкостной полимерной среды и колебательные свойства отдельных пузырьков.

В линейном приближении собственная частота колебаний пузырьков для адиабатического процесса определяется соотношением [11]: $\omega_b = v_s / b$, где b – характерный радиус пузырька, $v_s = \sqrt{3\gamma p / \rho}$, здесь γ – показатель адиабаты для газа в пузырьке, p – давление газа в пузырьке и ρ – плотность окружающей пузырек жидкости. Как уже отмечалось, здесь под быстрым гидродинамическим процессом подразумевается внешнее акустическое воздействие с характерной частотой ω (см. рис. 3), отвечающее за накачку пузырьков энергией, что реализуется при условии

$$\omega \gg \omega_b. \quad (1)$$

К тому же, длина акустической волны накачки λ должна быть меньше характерного размера пузырька (или по крайней мере соизмерима), т. е. должно выполняться соотношение

$$\lambda \ll b. \quad (2)$$

В противном случае будет осуществляться колебательный режим во всей области акустического воздействия. При этом передача возбуждения от акустических колебаний к пузырькам может происходить во всей среде, подвергающейся воздействию, в целом и за время меньшее ω^{-1} . На полупериоде колебания, соответствующем уменьшению давления в среде, возникают благоприятные для роста пузырьков условия. На данном временном промежутке за счет диффузии растворенного газа в пузырьках может увеличиваться давление. Необходимым условием этого является малость характерного времени диффузии по сравнению с ω^{-1} . На втором полупериоде, когда происходит увеличе-

ние давления, возможно уменьшение размеров пузырьков, вплоть до их схлопывания. Очевидно, что возможность реализации того или иного сценария развития зависит от давления внутри пузырьков и полного гидродинамического давления в среде, т. е. в этом случае внешнее акустическое воздействие является скорее управляющим, а не силовым фактором.

В рассматриваемом случае медленный процесс – это изменение макроскопических параметров жидкости в заданной геометрической конфигурации, управляющее ростом и схлопыванием пузырьков. Как видно из рис. 3, основное изменение скорости и давления потока происходят в области волновода из-за изменения поперечного сечения трубы. Примем в качестве характерной скорости потока максимальную скорость V_3 в области волновода, а в качестве характерного пространственного масштаба – длину волновода L . Тогда в качестве меры медленного процесса можно взять величину $\tau_g = \frac{L}{V_3}$. Тогда условие $\tau_g \gg \omega^{-1}$ будет определять возможность контроля динамики пузырьков за счет изменения гидродинамических параметров течения. Это соотношение удобно переписать в виде

$$\frac{L\omega}{V_3} \gg 1. \quad (3)$$

Таким образом, при определенном внешнем акустическом воздействии и надлежащем выборе геометрии гидродинамического тракта в потоке полимерной жидкости возможно организовать течение, в котором будет реализовываться режим внутреннего эрлифта с последующей активацией кинетических реакций.

Теперь перейдем к обсуждению экспериментальной реализации предлагаемой схемы. В качестве акустических излучателей можно воспользоваться ультразвуковым источником на базе магнестриктора

или пьезоэлектрического элемента. В широкой области кавитационной установки с диаметром d_2 предлагается использовать промышленный излучатель ЦМС-8, состоящий из катушки, намотанной на тороидальный сердечник, собранный из пластин пермендюра и охватывающий указанный цилиндрический участок. Схема данного устройства приведена на рис. 4. Излучатель имеет резонансную частоту 8 кГц, мощность 4 кВт.

В узкой области кавитационной установки с диаметром d_1 предлагается воспользоваться стандартным цилиндрическим пьезокерамическим излучателем ЦПКП-22, имеющим резонансную частоту 22 кГц, мощность 1 кВт. Данные парамет-

ры обеспечивают эффективную инициацию зародышей кавитационных пузырьков при низком пороге энергии генерации.

Поэтому излучатель устанавливался на входе кавитационной установки, охватывая ее цилиндрический участок с диаметром d_1 . В этом объеме он обеспечивает генерацию множества мелких кавитационных пузырьков в среде, перетекающей в зону с диаметром d_2 , где они могут приобретать большую энергию.

Для контроля мощностных характеристик магнестриктора, которые затем пересчитывались на поток энергии излучаемой акустической волны (излучаемая мощность), использовалась электрическая схема, представленная на рис. 5.

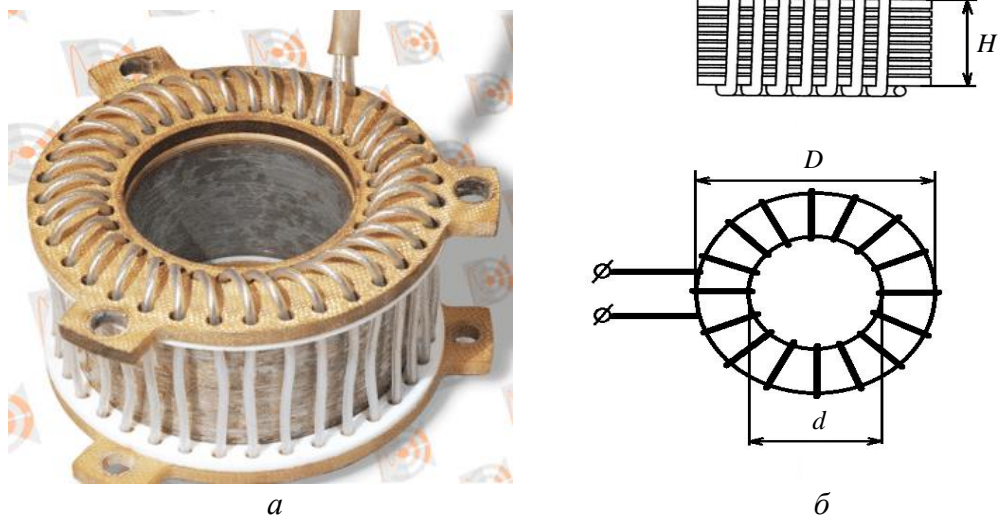


Рис. 4. Используемый ультразвуковой источник: а) – внешний вид цилиндрического магнестрикционного преобразователя и б) – эскизная схема излучателя.

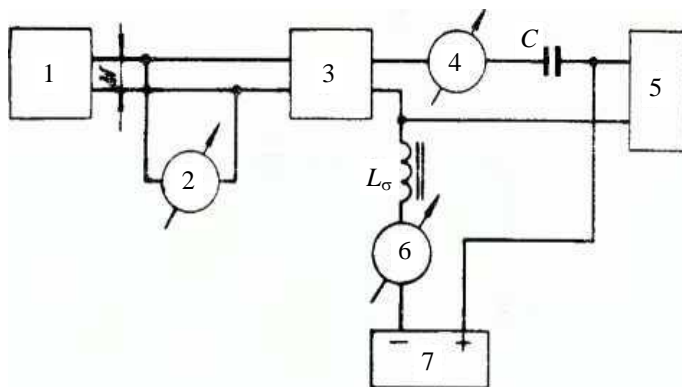


Рис. 5. Схема для снятия характеристик излучателя: 1 – генератор переменного тока; 2 – вольтметр; 3 – ваттметр; 4 – амперметр переменного тока; 5 – магнестриктор; 6 – амперметр постоянного тока; 7 – источник постоянного тока.

В процессе ее испытаний была показана возможность варьирования излучаемой акустической мощности. Полученная экспериментальная зависимость излучаемой мощности от частоты (рис. 6) подтверждает возможность управления режимами генерации ультразвуковой волны в необходимых пределах, а также оптимальной настройки аппаратуры, обеспечивающей заданные изменения физико-химических свойств обрабатываемой жидкости. Достоверность полученных данных косвенно подтверждаются успешными экспериментами с углеводородами, описанными в работе [13].

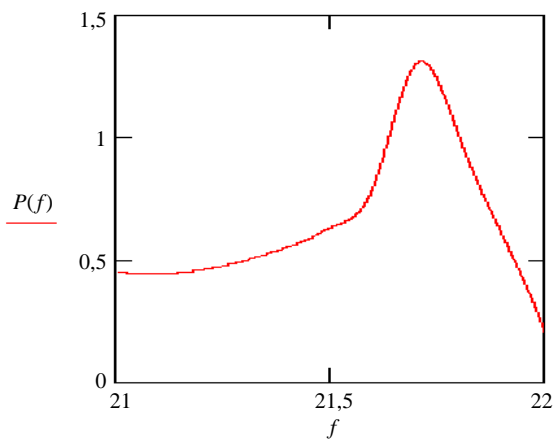


Рис. 6. Характерный график зависимости излучаемой мощности (относительные единицы) от частоты (кГц) [13].

Таким образом, описанная установка может стать инструментом, позволяющим управлять динамикой кавитационных зародышей, стимулируя заданным образом их рост и последующее схлопывание, изменяя гидродинамические параметры потока или варьируя интенсивность внешнего акустического поля. Однако ускорение потока может смениться его торможением, когда кинетическая энергия жидкости превращается в тепловую форму. В результате будет происходить локальное увеличение давления, приводящее к схлопыванию пузырька с выделением запасенной энергии практически в так называемой сингулярной точке, что в свою очередь может привести к разрыву среды [10–12].

Кинетика при развитии гидродинамических сингулярностей

Поскольку в этой сингулярной точке будет происходить мгновенное увеличение концентрации вещества и энергии, то здесь возникают благоприятные условия для ускорения кинетических реакций, которые в обычных условиях проходят при повышенной температуре во всем технологическом объеме или вообще не могут быть инициализированы. Например, выделяющейся в процессе схлопывания пузырька энергии может оказаться достаточно для возбуждения, ионизации и диссоциации молекул попутных газов внутри кавитационной полости [11, 12]. В этом случае можно предположить, что данные частицы, столкнувшись с фрагментами разорванных высокомолекулярных цепей, войдут в состав этих фрагментов. Таким образом могут возникать принципиально новые макромолекулярные структуры.

Наиболее просто и наглядно особенности воздействия сингулярностей на химическую кинетику можно качественно продемонстрировать на примере одномерных систем [14–16]. Для одномерного потока с реакциями первого порядка (заметим, что такими реакциями можно моделировать расщепление надмолекулярных образований) распределение плотности в лагранжевых координатах (x, t) имеет вид [16]:

$$n(x, t) = \frac{\gamma n_0 e^{-kt}}{\gamma + (1 - e^{-\gamma t}) \frac{dV_0}{dx}}, \quad (4)$$

здесь γ – частота неупругих столкновений; k – константа реакции; n_0 – начальная плотность; V_0 – начальная скорость потока. Как видно из данной формулы, при $\frac{dV_0}{dx} < 0$ всегда есть момент времени $t = t_*$, когда знаменатель обращается в ноль, т. е. плотность неограниченно возрастает в этот момент для некоторой координаты $x = x_*$. Поскольку скорость соответствующей

щей кинетической реакции пропорциональна плотности и константе k , зависящей от температуры, то скорость реакции также неограниченно возрастет в окрестности $x = x_*$ в заданный момент времени.

Для определенного типа начальных распределений возможно образование множественных коллапсов. Мы рассмотрим это в пределе $\gamma \rightarrow 0$, $k \rightarrow 0$ для начального распределения скорости в виде [16]:

$$V_0(x) = x + B \sin\left(\frac{x}{L}\right), \quad (5)$$

и гауссовского профиля начальной плотности

$$n_0(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right), \quad (6)$$

здесь B и L – положительные константы и при $B/L \gg 1$ возникает распределение плотности, изображенное на рис. 7.

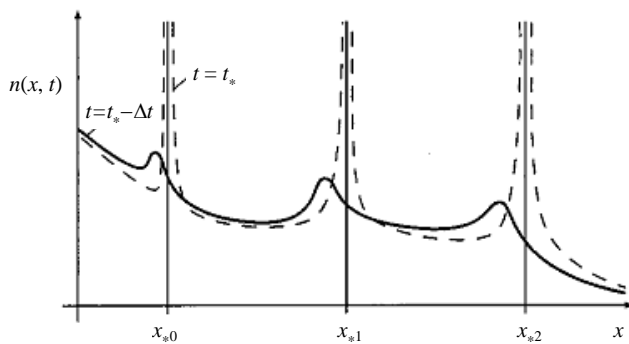


Рис. 7. Образование течения с множественными коллапсами [16].

Данная простая модель позволяет предположить, что в случае осесимметричного течения, в котором возбуждены акустические колебания, за счет формирования соответствующего поля скоростей, можно рассчитывать на образование множественных коллапсов плотности в схлопывающихся пузырьках [12, 17, 18]. Таким образом, возбуждение акустических колебаний в рассматриваемом потоке, который

заданным образом то ускоряется, то замедляется, может обеспечить локальное воздействие на структуру исследуемой среды.

Особенности образования тепловых полей в дисперсных системах и простых жидкостях

При этом следует иметь в виду фундаментальное отличие в развитии кавитационной динамики нефти, содержащей высокомолекулярные образования, от простых жидкостей. В простых жидкостях, например, в воде, рост газовых пузырьков может сопровождаться коагуляцией пузырьков, их всплыванием из среды под действием архимедовой силы [19]. Макромолекулы, находящиеся на границе раздела с газом, можно рассматривать как диполи, на концах которых сосредоточены заряды разного знака [19]. Считается, что взаимодействующие молекулы вытянуты в одинаковом направлении и знаки их зарядов с каждой стороны также одинаковы. В результате на границе раздела возникает мембранный эффект, который препятствует прохождению определенных молекул и ионов (в этом случае говорят, что граница имеет амфифильную структуру). При контакте двух пузырьков с такой границей амфифильная структура пленки на границе каждого пузырька препятствует их объединению. При контакте многих пузырьков образуется пена, где соседние пузырьки разделены пленкой. Данный механизм определяет структуру многих дисперсных систем, включая нефть, и приводит к совершенно разным физическим проявлениям, которые могут быть использованы в различных приложениях, в частности, для диагностики залежей нефти.

Рассмотрим проявление данных особенностей на примере процесса образования пузырьков газа в нефти (далее этот процесс называется разгазированием нефти), в котором происходит изменение

температуры за счет теплоты разгазирования нефти [4, 20] в условиях, когда изменение температуры зависит от нефтенасыщенности пласта. Тогда наличие воды в пласте за счет меньшей растворимости углеводородных газов должно приводить к уменьшению влияния теплоты разгазирования на формируемое температурное поле. В результате информация об особенностях формирования температурного поля может быть связана с нефтенасыщенностью пласта. Другими словами говоря, открывается возможность использования акустического воздействия на нефтенасыщенную пористую среду, как способ разгазирования нефти для оценки характера насыщенности пласта по натурным измерениям температуры.

Описать данные процессы можно с помощью модели формирования теплового поля в нефтенасыщенной пористой среде при акустическом воздействии, которое инициирует образование пузырьков. Для этого рассмотрим пористую среду, насыщенную нефтью, где происходит локальное понижение давления. Снижение давления приводит к фильтрации газированной нефти из пласта к скважине. Тогда под действием рассмотренных выше факторов в некоторой области среды ($r \leq r_b$, здесь r_b – характерный радиус области разгазирования) происходит образование газовых пузырьков, что приводит к изменению температуры в выделенной области за счет теплоты разгазирования, адиабатического и Джоуля–Томсона эффектов. Чтобы выявить влияние таких тепловых источников, в первом приближении пренебрежем тепловыми потерями в окружающие породы и будем считать, что конвективный перенос тепла преобладает над теплопроводностью по пути движения флюида, т. е. пренебрегается теплопроводностью среды. Также будем пренебрегать испарением нефти, считая процесс разгазирования равновесным, подчиняющимся закону Генри. Для простоты выделим в системе три фазы:

скелет пористой среды (все характеристики, относящиеся к пористой среде, далее помечены индексом 0), нефтяную и газовую фазы, чьи характеристики помечены индексом 1 и 2 соответственно. Тогда, считая задачу осесимметричной и однородной в аксиальном направлении, в цилиндрической системе координат динамика теплового поля, насыщенностей фаз и давления описывается уравнениями сохранения масс фаз и притока тепла:

$$m \frac{\partial}{\partial t} (\rho_1 S_1 (1 - C_{12})) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \rho_1 (1 - C_{12}) \frac{K_r \times k_1(S_1)}{\mu_1} \frac{\partial P}{\partial r} \right], \quad (7)$$

$$m \frac{\partial}{\partial t} (\rho_1 S_1 + \rho_2 S_2) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \times \left[r \left(\rho_1 \frac{K_r \times k_1(S_1)}{\mu_1} \frac{\partial P}{\partial r} + \rho_2 \frac{K_r \times k_2(S_2)}{\mu_2} \frac{\partial P}{\partial r} \right) \right], \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (m[\rho_1 c_1 S_1 + \rho_2 c_2 S_2] T + [1 - m] \rho_0 c_0 T) + \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r[\rho_1 c_1 v_1 + \rho_2 c_2 v_2] T) = \\ & = J_{12} (c_2 - c_1) T + J_{12} \chi_{12} + \\ & + m(\rho_1 c_1 S_1 \eta_1 + \rho_2 c_2 S_2 \eta_2) \frac{\partial P}{\partial t} + \\ & + (\varepsilon_1 \rho_1 c_1 v_1 + \varepsilon_2 \rho_2 c_2 v_2) \frac{\partial P}{\partial r} \end{aligned} \quad (9)$$

здесь S_i – насыщенности фаз; T – температура; P – давление; c_i – теплоемкости фаз; c_0 – теплоемкость скелета горной породы; ρ_i – плотности фаз; m – пористость; χ_{12} – теплота разгазирования; ε_i – коэффициент эффекта Джоуля–Томсона i -фазы; η_i – коэффициент адиабатического эффекта для i -фазы; J_{12} – интенсивность фазовых переходов при разгазировании.

Система уравнений (7)–(9) дополнена следующими начальными и граничными условиями:

$$\begin{aligned}
 P(r)|_{0 \leq r \leq R_k}^{t=0} &= P_{pl}, \\
 S_1(r)|_{0 \leq r \leq R_k}^{t=0} &= 1, \\
 T(r)|_{0 \leq r \leq R_k}^{t=0} &= T_0 \\
 P(r_w, t)| &= P_w \\
 P(R_k, t)| &= P_{pl}, \\
 S_2(R_k, t)| &= 0, \\
 T(R_k)| &= T_0,
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

где T_0 – пластовая температура; r_w – радиус скважины; R_k – радиус контура питания.

Уравнения состояния фаз примем в виде:

Для жидкой фазы:

$$\rho_1 = \rho_1^0 (1 + \beta_1 [P - P_0]) \tag{5}$$

Для газовой фазы:

$$\rho_2 = \rho_2^0 \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} z(P, T).$$

Здесь ρ_1^0, ρ_2^0 – плотности нефти и газа при нормальных условиях; β_1 – коэффициенты сжимаемости нефти; $z(P, T)$ – коэффициент сверхсжимаемости газа (в част-

ном случае можно положить равным единице).

Теплофизические параметры фаз $c_i, \epsilon_i, \eta_i, \chi_{12}$ считались постоянными и определялись из таблиц [20] для среднепластового давления $P = P_{pl}$ и температуры $T = T_0$. Система уравнений (7)–(9) решается конечно-разностным методом, аналогично подходу, приведенному в работе [21]. Тестирование задачи проводилось путем сравнения известного аналитического решения для теплового поля баротермического эффекта (изменение температуры жидкости обусловленное эффектом Джоуля–Томсона и адиабатическим эффектом в нестационарном поле давления) при фильтрации однофазной однокомпонентной нефти с расчетными зависимостями температуры на выходе из пласта от времени [22, 23]. Расхождение не превышает 1 %.

В настоящих расчетах использовались параметры, собранные в табл. 1.

Система уравнений (7)–(9) в зависимости от условий (10) описывает динамику температуры в области разгазирования. Эта модель была применена для описания эволюции теплового поля пласта, состоящего из следующих компонент: 1) нефти и газа, 2) воды и газа, 3) воды. Используемые в расчетах параметры собраны в табл. 2. При этом предполагается, что в случаях 1) и 2) свойства газа одинаковы.

Таблица 1

Параметры флюидов [4]

Флюид	Плотность при н.у., кг/м ³	Коэфф. сжимаем., 1/МПа	Вязкость, сПз	Уд. теплоемкость, Дж/(кг К)	Коэфф. теплопр., Вт/(м К)	Коэфф. Дж.–Том., К/МПа	Коэфф. адиаб., К/МПа
Нефть	800	1E-4	10	1880	0,14	0,4	0,05
Газ	0,78	–	2E-2	2800	0,04	-4	2
Вода	1000	5E-4	1	4150	0,64	0,2	0,02

Таблица 2

Классификация пластов [4, 20]

Тип насыщения пласта	Коэффициент Генри, м ³ /(м ³ МПа)	Теплота разгазирования, кДж/кг
1) Нефть + газ	15	-168
2) Вода + газ	1	-50
3) Вода	1E-9	0

На рис. 8 приведены зависимости температуры притекающей смеси на стенке скважины от времени для трех указанных вариантов насыщения пласта. Как видно из графиков, наибольшее снижение температуры наблюдается для нефтенасыщенного пласта с растворенным газом, а для водонасыщенного пласта после незначительного снижения температуры наблюдается положительная аномалия температуры (относительно геотермической на данной глубине). Незначительное повышение температуры во времени (красная кривая) для воды с растворенным газом по сравнению с чистой водой объясняется влиянием фазовых проницаемостей на распределение давления по радиусу, т. е. для воды с газом наблюдается повышенный градиент давления в зоне выделения газа и следовательно повышенный дроссельный разогрев.

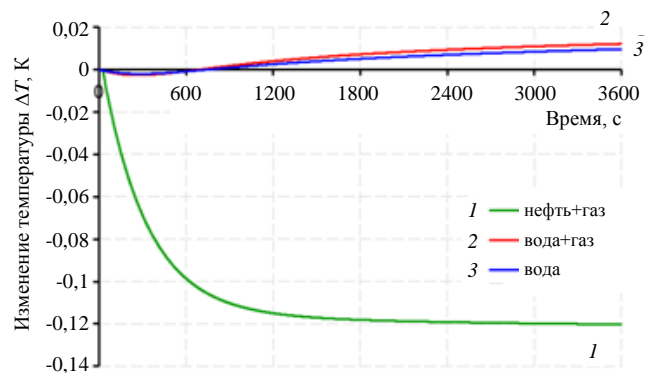


Рис. 8. Зависимость температуры от времени на выходе из пласта.

В качестве иллюстрации такого поведения, приведем промысловые данные термометрических исследований скважины с разгазированием нефти в пласте [4, 22]. На рис. 9 представлены результаты исследований скважины 3082 (Республика Башкортостан). В скважине перфорированы два проницаемых пласта в интервалах 2411,2–2413,2 м; 2415–2422 м. Кратковременный приток жидкости из пластов осуществлялся с помощью компрессорной установки. Средний газовый фактор по месторождениям равен 81,3 м³/т. При ис-

следованиях зарегистрированы следующие термограммы, представленные на рис. 9.

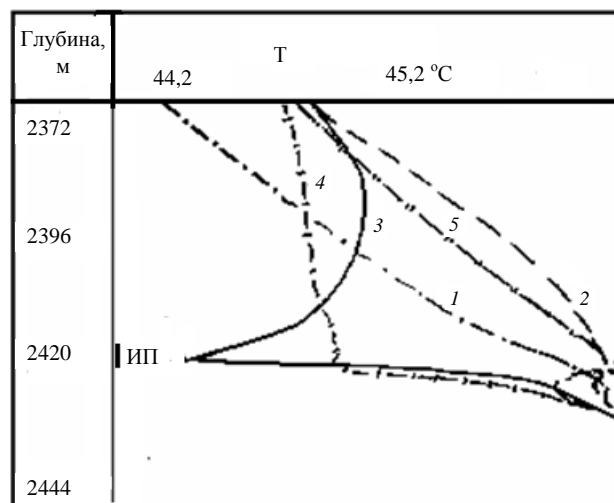


Рис. 9. Результаты скважинных исследований. Термограммы кривых: 1 – фоновая, до включения компрессора в работу; 2 – при работе компрессора; 3 – непосредственно после отключения компрессора и снижения давления в скважине; 4 и 5 через 1 и 2 часа после отключения компрессора, ИП – интервал перфорации.

Анализ термограмм показывает, что наблюдается дроссельный разогрев, то есть, приток жидкости из нижнего перфорированного пласта (кривая 2). После отключения компрессора отмечается снижение давления в скважине ниже давления насыщения нефти газом. При этом на термограмме (кривая 3) отмечается снижение температуры против нижнего пласта. Форма кривой распределения температуры выше зоны притока свидетельствует о преимущественном притоке в ствол скважины газовой фазы. Термограмма (кривая 4) соответствует некоторому повышению давления в скважине, но все еще оно меньше давления насыщения, и в этом случае отмечается приток газонефтяной смеси. Кривая (5) соответствует условиям, когда давление в скважине выше давления насыщения, и из пласта отмечается приток жидкости (аномалия разогрева), т. е. нижний пласт является нефтенасыщенным.

Следующий пример, воспроизведенный на рис. 10, иллюстрирует изменение температурной аномалии после обводне-

ния пласта по отношению к аномалии при притоке чистой нефти. В данной скважине перфорированы три пласта. Первые исследования распределения температуры (кривые T1 и T3 в работающей, T2 и T4 в остановленной скважине) проведены до обводнения пластов, когда из скважины добывается чистая нефть. Как видно (кривая T1) все три работающих пласта отмечаются снижением температуры в работающей скважине, т. е. когда давление в скважине ниже давления насыщения. При повышении давления (кривая T2), происходящем при остановке скважины, наблюдается повышение температуры за счет дроссельного разогрева. Такое поведение термограмм, как было показано результатами расчета, свидетельствует о том, что пласты являются нефтенасыщенными. Повторные

исследования выполнены через три года эксплуатации скважины показывают изменения в характере распределения температуры по глубине (кривые T3 и T4). Отмечается, что напротив нижнего пласта при работе скважины и после ее остановки, температурные аномалии положительные – наблюдается дроссельный разогрев жидкости. Тогда как верхние пласты характеризуются отрицательными температурными аномалиями (снижением температуры), как и в предыдущем случае, это означает, что нижний пласт обводнился – из него притекает вода.

Таким образом, анализ приведенных промысловых данных свидетельствует о приемлемости развиваемого подхода и целесообразности дальнейшего развития модели, описываемой уравнениями (7)–(9).

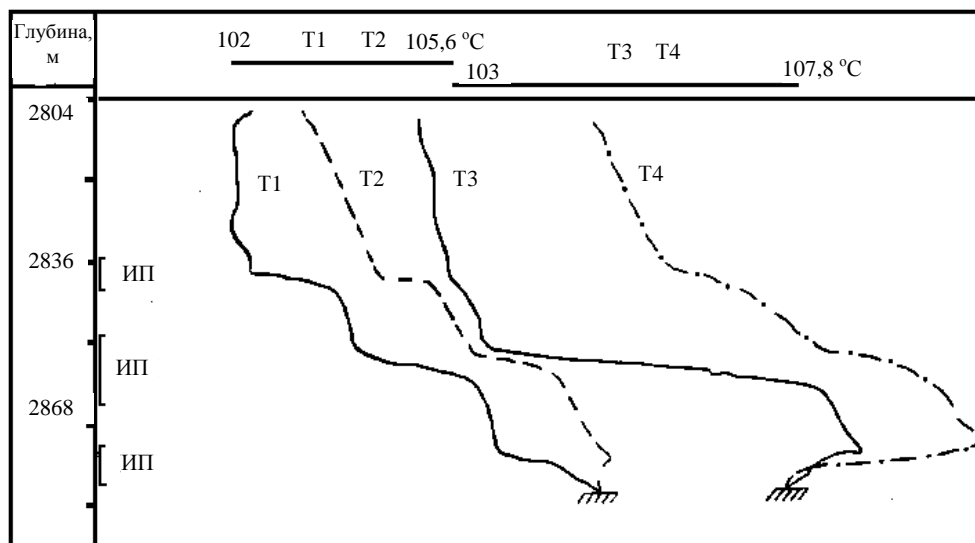


Рис. 10. Результаты скважинных исследований. Кривые: T1 и T3 в работающей скважине, T2 и T4 в остановленной скважине; ИП – интервал перфорации.

Заключение

В настоящей работе рассмотрены некоторые физико-химические особенности формирования структуры нефтяных дисперсных системах, при акустическом воздействии на поток нефти, содержащий огромное количество газовых пузырьков. В данном случае появление кавитационных зародышей обусловлено существова-

нием пустот между коллоидными частицами и растворенным газом, который при понижении давления выделяется в пустотах. В условиях, когда длина акустической волны существенно меньше радиуса пузырька (2), в области, где происходит резкое увеличение давления, будет проходить схлопывание пузырьков с локальным выделением запасенной энергии, что может привести к разрыву существующих меж-

молекулярных связей и образованию новых. Более того, в таких течениях при определенных начальных условиях (5) и (6) возможно развитие коллапсов плотности. В таких сингулярных точках возможно значительное ускорение различных кинетических процессов в потоке, а значит за счет изменения начальных или граничных условий можно управлять скоростью кинетических реакций (по этому поводу см. также [13–17]), селективным образом можно менять структуру среды, ее физико-химические свойства. В частности, такой динамики можно добиться за счет генерации звуковых волн определенного вида в потоке [7, 12].

В естественных условиях появление большого количества пузырьков в нефти при уменьшении давления в среде ниже давления насыщения нефти газом приводит к значительному охлаждению пласта за счет теплоты разгазирования. Тогда как в случае водонасыщенного пласта изменение температуры будет в основном обусловлено небольшим дроссельным разогревом при снижении давления в скважине. Данные особенности изменения температуры можно использовать для оценки характера насыщенности пласта по анализу изменения температуры на выходе из него, что будет предметом дальнейших исследований.

Экспериментальная проверка идеи совмещения гидродинамического и акустического воздействия на нефтяную дисперсию предлагается на установке, изображенной на рис. 3–6. Здесь кавитационная область представляет собой своеобразный трансформатор мощности, в котором сравнительно медленно накапливаемая энергия освобождается в течение очень короткого времени, в результате чего мгновенная мощность во много раз превосходит среднюю, вводимую излучателем в кавитационную область.

В заключение следует отметить, что обсуждаемая концепция управления кинетическими превращениями в дисперсных

средах и их диагностики также представляет интерес для других коллоидных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сафиева Р. З. Химия нефти и газа. Нефтяные дисперсные системы: состав и свойства. – М.: РГУНГ, 2004.
2. Келбалиев Г. И., Расулов С. Р., Тагиев Д. Б., Мустафаева Г. Р. Механика и реология нефтяных дисперсных систем. – М.: Маска, 2017.
3. Сыркин А. М., Мовсумзаде Э. М. Основы химии нефти и газа. – Уфа: УГНТУ, 2002.
4. Valiullin R. A., Sharafutdinov R. F., Ramazanov A. Sh. // Powder Technology. 2004. Vol. 148. No. 1. P. 72.
5. Akartuna I., Studart A. R., Tervoort E. et al. // Langmuir. 2008. Vol. 24. P. 7161.
6. Berger K. J., Hrenya C. M. // Powder Technology. 2014. Vol. 264. P. 627.
7. Акоюн В. Б., Ершов Ю. А. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами. – М.: Из-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005.
8. Физика простых жидкостей / Под ред. Г. Темперли, Дж. Роулинсона, Дж. Рашбрука. – М.: Мир, 1971.
9. Conway J. H., Sloane N. J. A sphere packings, lattices, and groups. – New York: Springer-Verlag, 1999.
10. Рождественский В. В. Кавитация. – Ленинград: Судостроение, 1977.
11. Наугольных К. А., Островский Л. А., Сутин А. М. «Нелинейная акустика». Нелинейные волны. – М.: Наука, 1981. P. 166–185.
12. Маргулис М. А. Сонолюминесценция // УФН. 2000. Т. 170. С. 263.
13. Гуляев Д. Н., Лазуткина Н. Е., Жуйков Ю. Ф., Ильинский А. В., Рухман А. А., Шуканов А. Е. // Нефтяное Хозяйство. 2018. № 8. С. 60.
14. Karimov A. R., Korshunov A. M., Beklemishev V. V. // Physica Scripta. 2015. Vol. 90. P. 185.
15. Karimov A. R., Taleisnik M. A., Savenkova T. V., Aksenova L. M. // Physica Scripta. 2019. Vol. 94. P. 045002.
16. Karimov A. R., Schamel H. // Phys. Plasmas. 2001. Vol. 8. P. 1180.
17. Suslick K. S., Price G. J. // Annu. Rev. Mater. Sci. 1999. Vol. 29. P. 295.
18. Caruso M. M., Davis D. A., Shen Q. et al. // Chem. Rev. 2009. Vol. 109. P. 5755.
19. Бабаева Н. Ю., Berry R. S., Найдис Г. В. и др. // ТВТ. 2016. Т. 54. С. 792.

20. Гиматуллин Ш. К., Ширковский А. И. Физика нефтяного и газового пласта. – М.: Недра, 1982.

21. Valiullin R. A., Sharafutdinov R. F., Sadretdinov A. A., Bochkov A. S. // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2008. Vol. 49. No. 6. P. 992.

22. Валиуллин Р. А., Рамазанов А. Ш. Термические исследования при компрессорном освоении скважин. – Уфа: Изд-во Башкир. ун-та, 1992.

23. Валиуллин Р. А., Рамазанов А. Ш., Шарфутдинов Р. Ф. // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1994. № 6. С. 113.

PACS: 43.35+d, 43.38+n, 43.90+v

Induced by acoustic fields processes of structure formation in high-molecular media

A. R. Karimov^{1,2,5}, V. K. Bogdanov¹, R. A. Valiullin⁴, R. F. Sharafutdinov⁴, A. Sh. Ramazanov⁴, A. A. Rukhman³, T. R. Khabirov⁴, and A. E. Shikanov¹

¹ National Research Nuclear University MPhI
31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia
E-mail: ARKarimov@mephi.ru

² Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences
Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 127412, Russia

³ LLC Ultra-resonance
7 Vostochny proezd, Moscow, 108811, Russia

⁴ Bashkir State University
32 Zaki Validi, st., Ufa, 450076, Rep. Bashkortostan, Russia

⁵ Plekhanov Russian University of Economics
36 Stremyanny lane, Moscow, 117997, Russia

Received December 04, 2020

The paper considers the mechanisms of destruction and synthesis of macromolecules, which can be stimulated by external acoustic fields in a two-phase, oil dispersed medium containing a large number of gas bubbles. It is assumed that the dynamics of these bubbles depends on changes in the geometry of the flow and the excitation of sound vibrations in the flow. Particular attention is paid to the process of changing the density of a liquid due to the effect of an internal airlift in a liquid dispersed medium. Mechanically induced kinetic changes in macromolecules (destruction and synthesis of colloidal chains) can occur when bubbles collapse. These features can be used in oil processing and well logging to assess oil saturation of reservoirs.

Keywords: acoustic cylindrical emitter, magnetostrictor, piezoceramic element, cavitation, polymer liquid, hydrocarbons, oil, heat of oil degassing, salt.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-2-128-143

REFERENCES

1. R. Z. Safieva. *Chemistry of oil and gas. Oil dispersed systems: composition and properties* (RGUNG, Moscow, 2004).
2. G. I. Kelbaliev, S. R. Rasulov, D. B. Tagiev, and G. R. Mustafaeva, *Mechanics and rheology of oil dispersed systems* (Mask, Moscow, 2017).
3. A. M. Syrkin and E. M. Movsumzade, *Fundamentals of oil and gas chemistry* (UGNTU, Ufa, 2002).
4. R. A. Valiullin, R. F. Sharafutdinov, and A. Sh. Ramazanov, A Research into thermal field in Fluid-saturated Porous Media, *Powder Technology* **148** (1), 72 (2004).
5. I. Akartuna, A. R. Studart, E. Tervoort et al., Stabilization of oil-in-water emulsions by colloidal particles modified with short amphiphiles, *Langmuir* **24**, 7161 (2008).
6. K. J. Berger and C. M. Hrenya. Challenges of DEM: II. Wide particle size distributions, *Powder Technology* **264**, 627 (2014).
7. V. B. Akopyan and Yu. A. Ershov, *Fundamentals of the interaction of ultrasound with biological objects* (Iz-in MSTU named after N. E. Bauman, Moscow, 2005).
8. *Physics of simple liquids*, ed. G. Temperley, J. Rawlinson, J. Rushbrook (Mir, Moscow, 1971).
9. J. H. Conway and N. J. Sloane, *A sphere packings, lattices, and groups* (Springer-Verlag, New York, 1999).
10. V. V. Rozhdestvensky, *Cavitation* (Shipbuilding, Leningrad, 1977).
11. K. A. Naugolnykh, L. A. Ostrovsky, and A. M. Soutine, “Nonlinear Acoustics” *Nonlinear Waves* (Nauka, Moscow, 1981) pp. 166–185.
12. M. A. Margulis, Sonoluminescence, *UFN* **170**, 263 (2000).
13. D. N. Gulyaev, N. E. Lazutkina, Yu. F. Zhui-kov, A. V. Ilyinsky, A. A. Rukhman, and A. E. Shikanov, *Oil Industry*, No. 8, 60 (2018).
14. A. R. Karimov, A. M. Korshunov, and V. V. Beklemishev, *Physica Scripta* **90**, 185 (2015).
15. A. R. Karimov, M. A. Taleisnik, T. V. Savenkova, and L. M. Aksenova, *Physica Scripta* **94**, 045002 (2019).
16. A. R. Karimov and H. Schamel, *Phys. Plasmas* **8**, 1180 (2001).
17. K. S. Suslick and G. J. Price, *Annu. Rev. Mater. Sci.* **29**, 295 (1999).
18. M. M. Caruso, D. A. Davis, Q. Shen et al., *Chem. Rev.* **109**, 5755 (2009).
19. N. Yu. Babaeva, R. S. Berry, G. V. Naidis et al., *TVT* **54**, 792 (2016).
20. Sh. K. Gimatudinov and A. I. Shirkovsky, *Physics of oil and gas reservoir* (Nedra, Moscow, 1982).
21. R. A. Valiullin, R. F. Sharafutdinov, A. A. Sadretdinov, and A. S. Bochkov, *J. Applied Mechanics and Technical Physics* **49** (6), 992 (2008).
22. R. A. Valiullin and A. Sh. Ramazanov, *Thermal studies during compressor development of wells* (Publishing house Bashkir. un-ta, Ufa, 1992).
23. R. A. Valiullin, A. Sh. Ramazanov, and R. F. Sharafutdinov, *Izv. RAS. Mechanics of liquid and gas*, No. 6, 113 (1994).