

© Г.Г.Исмаилов, Н.М.Сафаров, 2011

РЕОТЕХНОЛОГИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ И ЕЕ ОТРАЖЕНИЕ В ЭФФЕКТАХ, ПРОЯВЛЯЕМЫХ ПРИ НЕФТЕГАЗОДОБЫЧЕ

Г.Г.Исмаилов, Н.М.Сафаров

*Научно-исследовательский и проектный институт «Нефтегаз», ГНКАР
AZ1012, Баку, просп. Зардаби, 88А*

В статье авторами приводятся некоторые научно-практические аспекты и возможность применения гетерогенных систем на основе реотехнологии для повышения эффективности технологических процессов нефтедобычи. Приведён краткий анализ сведений об основных причинах образования аномальных водонефтяных эмульсий в пласте и технологических трубопроводах. Показаны перспективы повышения эффективности технологических процессов нефтедобычи с позиции энерго- и ресурсосбережения на основе применения реотехнологических методов, базирующихся на использовании реофизических свойств данных гетерогенных систем. На основе существующих эффектов, наблюдаемых при нефтегазодобыче, приводятся возможности регулирования реотехнологических методов.

Известно, что процессы нефтегазодобычи, связанные с фильтрацией нефтегазоводяных смесей в пластах и движением в стволе скважины и технологических трубопроводах, сопровождаются капиллярными и молекулярно-поверхностными явлениями, протекающими на границах раздела фаз жидкость – жидкость (т.е. двухфазная среда) или жидкость – твердая фаза – жидкость (трехфазная среда), определяются параметрами коллектора и характеризуются физико-химическими свойствами и различными эффектами (Мирзаджанзаде, Велиев, 1986; Мирзаджанзаде и др., 1986; Исмаилов, Сафаров, 2011; Мирзаджанзаде и др., 1985; 1999; Сатаров и др., 2010).

Отметим, что образующиеся при движении в пласте нефтегазоводяные системы являются дисперсными средами с агрегативно устойчивыми структурами, одним из важных показателей которых является вязкость, которая зависит от многих факторов, таких как давление, температура, концентрация дисперсной фазы и т.д. Длительная эксплуатация нефтяных месторождений и заводнение нефтеносных пластов в итоге приводят к образованию стойких водонефтяных эмульсий, которые характеризуются повышенной плотностью и аномальной вязкостью в тысячи сПз (Гумбатов и др., 2002).

Практика показывает, что большинство технологических жидкостей нефтедобычи по своей природе являются сложными гетерогенными системами, характерными свойствами которых является неустойчивость.

Опираясь на существующие теоретические изыскания по реотехнологии, в статье рассмотрена возможность использования различных гетерогенных систем и новых технологических решений. Следует отметить, что учет реологических свойств неоднородных неньютоновских систем требует пересмотра сложившихся стереотипных представлений и изменения их основ и предпосылок.

Ретроракурс. Многолетняя мировая практика разработки и эксплуатации нефтяных месторождений постоянно показывает, что естественным спутником продукции скважины – нефти являются пластовые воды, так как большая часть нефтяных залежей разрабатывается при естественном водонапорном или разных модификаций искусственно создаваемом режимах.

Поэтому обводнение нефтяных пластов и скважин, а самое главное – обводнение самой продукции – весьма закономерное явление. В процессах добычи нефти и транспортировки ее по нефтепромысловым трубопроводам происходит интенсивное перемешивание взаимонерастворимых флюидов системы вода-нефть, вследствие чего через определенные периоды разработки залежей эти компоненты, соединяясь между собой, создают полидисперсную систему – водонефтяные эмульсии. Образование водонефтяных систем (т.е. эмульсий) является проблемой в области добычи и транспортировки нефти и требует скорого решения. Обводненность нефти вызывает серь-

езные осложнения (более интенсивное осадкообразование, повышение температуры застывания нефти, увеличение ее вязкости и т.д.) при добыче, сборе и подготовке нефти. Добываемые нефти по своим физико-химическим свойствам, как правило, относятся к реологически сложным жидкостям, в большинстве случаев обладают аномальными свойствами и являются неньютоновскими, что вызывает дополнительные затруднения при разработке нефтяных месторождений, а также при подготовке и транспортировке нефтей (Чекалюк, Филяс, 1977; Антипин и др., 1987).

В этой связи вопросы образования водонефтяных систем и их разрушение всегда были и остаются предметом исследования широкого круга ученых и специалистов нефтяной промышленности.

Проведенные многочисленные исследования ряда авторов дают основание считать, что водонефтяные эмульсии – механическая смесь нефти и пластовой воды, нерастворимых друг в друге и находящихся в мелкодисперсном состоянии. Указанные эмульсии, характеризующиеся высокой степенью дисперсности, являются устойчивыми термодинамическими равновесными системами. Образование и стойкость эмульсии в основном определяется скоростью движения водонефтяной смеси, соотношением и физико-химическими свойствами фаз (нефти и воды) и их температурным режимом. В результате смешивания воды с нефтью, находящейся в пласте, возможно образование стойких водонефтяных эмульсий, которые обладают повышенными реологическими свойствами, затрудняющими их дальнейшее извлечение из пласта, ввиду аномально большой вязкости и малоподвижности.

Согласно существующим традиционным стереотипным представлениям и мнению многих авторов, аксиоматически принято считать, что при увеличении содержания воды происходит инверсия фаз, так называемое изменение типа промышленных эмульсий: эмульсия типа «вода в нефти» (В/Н) переходит в тип «нефть в воде» (Н/В). В результате дисперсная фаза (т.е. вода) становится дисперсионной средой, а дисперсионная среда (т.е. нефть) – дисперсной фазой. Для расчетов технологических процессов транспорта и разрушения водонефтяных эмульсий, а также для

прогнозирования свойств скважинной продукции критическое значение имеет определение так называемой «точки инверсии» водонефтяной эмульсии или точки «обращения фаз». Принято считать, что при увеличении содержания воды происходит изменение (инверсия) типа промышленных эмульсий: от обратного типа («вода в нефти») – до прямого типа («нефть в воде»). Соответственно, определение точки инверсии водонефтяной эмульсии считают критически важным для прогнозирования свойств скважинной продукции. Но следует отметить, что основным обоснованием подобных представлений является интерпретация измерений вязкости (Alwadani, 2009; Шерман, 1972).

До сих пор сложилось такое стереотипное мнение, что водонефтяные системы не могут быть образованы в самом пласте. Но в последнее время группа исследователей в своих работах указывает, что при совместном движении воды и нефти по микроканалам пористой среды в результате диспергирования одной фазы (воды) в другой (нефти) может происходить процесс образования указанных систем в самом пласте. Вода, постепенно обводняя нефтяные залежи, может стать причиной образования аномальных эмульсий в пласте и тем самым привести к ухудшению условий разработки, вплоть до образования целиков нефти, застойных и слабодренированных зон (Орлов и др., 1991; Исмайылов и др., 2011; Сулейманов, 2006).

Отметим один немаловажный факт. Ныне существующие методы в основном направлены против образования водонефтяных эмульсий или ведут к ее разрушению. Неужели все так безнадежно, и естественное образование гетерогенных систем так не желаемо и не нужно? Ведь в каждом отрицательном явлении можно найти что-то положительное и нужное. И здесь на помощь может прийти реотехнология, которая представляет собой совокупность методов и способов организации технологических процессов на основе использования и применения реофизических свойств и особенностей многокомпонентных, мультифазных систем. Изучение этих реологических свойств неньютоновских гетерогенных систем позволяет не только количественно определить, но и качественно исследовать параметры и уточнить новые особен-

ности систем. В итоге это может привести к созданию новых технологий.

Ниже рассматривается возможность применения реотехнологических методов для повышения эффективности технологических процессов нефтедобычи на основе анализа изменения эффективной вязкости в зависимости от водосодержания (т.е. степени обводненности) водонефтяных систем (рис.1), обводненность авторами разделена на 4 условные зоны: I – начальная (или насыщающая) зона, II – зона насыщения (или регулируемая зона реотехнологии), III – насыщенная водой зона, IV – перенасыщенная зона (или зона действия «гидроподшипника»). Часть кривой, охватывающая зоны I-III, имеет S-образный характер. Начиная с точки α , с увеличением степени обводненности основной показатель характеристики исследуемой системы – эффективная вязкость – неуклонно растет. В точке β она становится пологой, т.е. система насыщается водой, и это длится до точки γ . Начиная с точки γ , т.е. дойдя до своего максимального значения, эффективная вязкость начинает уменьшаться. Позже в данной статье будет дано объяснение причины этого парадоксального явления.

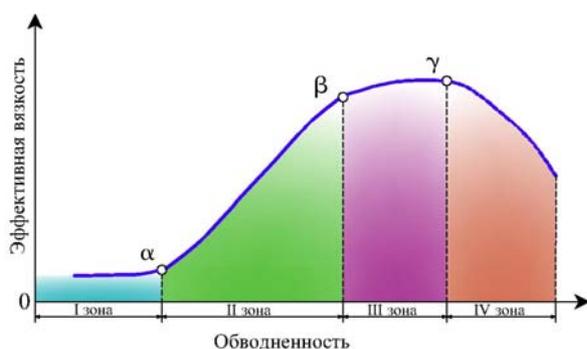


Рис. 1. Характерные условные зоны кривой зависимости обводненности от эффективной вязкости

Таким образом, существует некоторая возможная область, в которой эти гетерогенные системы обладают пониженной вязкостью и сильно выраженными неравновесными свойствами, что в свою очередь позволяет регулировать реологические свойства системы изменением давления. Установлено, что, применяя методы реотехнологии и регулируя реологические свойства систем, можно «заставить» гете-

рогенные системы «служить» нужному делу.

В основе нетрадиционных технологий нефтеизвлечения с использованием физико-химических методов лежат, как правило, яркие физические эффекты, грамотное использование которых приводит к желаемым результатам. К примеру, в случае применения таких систем, как пены и нефтегазоводяные эмульсии, работает эффект превышения на несколько порядков псевдовязкости систем по сравнению с вязкостью составляющих компонентов. Так, при течении пен в пористых структурах этот эффект может в одних случаях многократно усилиться, а в других не проявиться. В случае дисперсных систем жидкость-жидкость ситуации могут быть еще более разнообразными. Чтобы выявить их, наряду с традиционными экспериментами на вискозиметре и линейной модели пласта были использованы методы визуализации процессов в вискозиметре и в элементах модели пласта – капиллярах, трещине и пористой структуре. Проявление характерных эффектов при движении исследуемых систем можно использовать для диагностирования их релаксационных свойств.

Рассмотрим некоторые из эффектов, имеющих место в процессах нефтегазодобычи, по отдельности.

1. Эффект «гидравлического подшипника». Известно, что многие особенности поведения гетерогенных сред объясняются процессами разрушения и восстановления структурных связей под действием сдвиговых деформаций. Анализ лабораторных данных показывает, что увеличение содержания воды в водонефтяных системах оказывает сильное влияние на их реологические характеристики (вязкость, характер изменения параметров τ и γ). Эффективная вязкость водонефтяных систем зависит от соотношения исходных фаз воды и нефти. Увеличение дисперсной фазы – воды до определенного порогового предела (согласно результатам испытаний, для различных нефтяных месторождений Азербайджана величина этого предела колеблется в интервале 50-75%) приводит к значительному повышению вязкости эмульсии. Дальнейшее же увеличение процентного содержания воды до критического значения полной насыщенности приводит к срабатыванию вышеотме-

ченного «гидро-подшипникового эффекта», т.е. к резкому снижению гидравлических потерь. С увеличением степени водонасыщенности эффективная вязкость пропорционально увеличивается. Но дойдя до максимума, она резко начинает снижаться.

Следует отметить, что в данном случае величина μ не отражает действительного значения вязкости эмульсии, но в конечном счете практический интерес представляет не истинная величина вязкости именно эмульсии, а приведенная к условиям опыта величина вязкости, благодаря эффекту «гидравлического подшипника» вызывающая в системе определенные и заметные снижения гидравлических потерь на трение. В реальности вязкость водонефтяной эмульсии, замеренная без учета указанного эффекта, может быть в десятки раз повышенной (Исмайылов и др., 2011).

В качестве примера на рис.2 приведены результаты реовискозиметрических испытаний водонефтяной эмульсии, изготовленной на основе высоковязкой Мурадханлинской нефти с начальной обводненностью $\beta=38\%$ и при температуре $t=20^{\circ}\text{C}$.

Учитывая тот факт, что в составе технологических жидкостей, иными словами – гетерогенных систем, уже содержится исходная водная фаза, то уместно было бы говорить о применении рационального способа донасыщения недонасыщенных водой высоковязких нефтей и нефтепродуктов до порогового значения полного насыщения с целью улучшения их транспортабельных способностей и уменьшения гидравлических потерь при движении по трубопроводу.

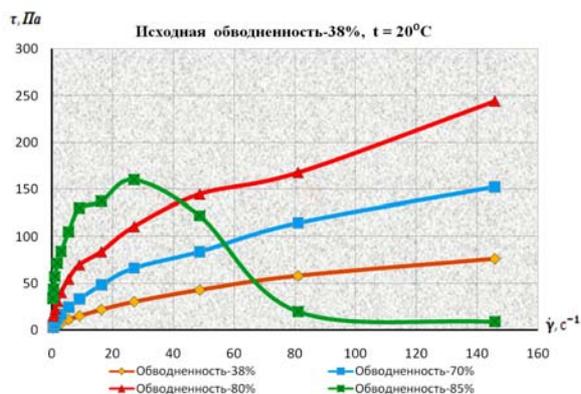


Рис. 2. Эффект «гидравлического подшипника»

Технологическая сочетаемость и совмещаемость указанного эффекта с процессами нефтедобычи, возможность полной их автоматизации и независимость от рельефа местности, а также полученные результаты проведенных испытаний еще раз подтверждают высокоэффективность и возможность его применения при гидротранспорте водонефтяных смесей по внутрипромысловым коммуникациям.

2. Эффект «зонтика». Известен факт, что при добавке к технологическим жидкостям (высоковязким нефтям, глинистым растворам, водонефтяным эмульсиям, полимерам и т.д.) некоторых наполнителей (например, песка) эти вещества приобретают вязко-сыпучие свойства, которые и оказывают влияние на парадоксальное поведение указанных систем. Согласно модели Сен-Венана, которая хорошо описывает кинетику вязко-сыпучих сред, данные многокомпонентные системы характеризуются двумя основными параметрами: углом внутреннего трения φ и коэффициентом трения k . Многочисленными исследованиями было доказано, что для указанных гетерогенных систем присущ эффект «зонтика», т.е. эти системы могут «запираться» и, раскрываясь как зонтик, «опираются» на стенки пор или труб. Для сдвига системы в вертикальной наклонной трубе вверх требуется меньшее усилие, чем вниз. Данный эффект был обоснован теоретическими высказываниями академика А.Х.Мирзаджанзаде и др. (1999). На основании полученных результатов реотехнологии показана возможность использования этих многокомпонентных систем в качестве разделителя потоков технологических жидкостей с целью очистки ствола скважины и полостей рельефных трубопроводов от различных скоплений (Мирзаджанзаде и др., 1999). Кроме того, основываясь на результатах исследований, можно утверждать, что водонефтяные эмульсии благодаря своим приобретенным реопектическим свойствам могут выполнять роль селективного водоизолирующего материала в нефтяных скважинах. Если проводить аналогию с нелинейно-вязкими средами, то реопектические жидкости более всего напоминают дилатантные жидкости, когда при их применении временным параметром, необходимым для структу-

рообразования, нельзя пренебречь. Реология таких сред определяется процессами разрушения и восстановления структуры, которые можно схематично представить как прямую и обратную химические реакции, суммарное действие которых описывается некоторым кинетическим уравнением относительно концентрации разрушенных (или восстановленных) связей. Перспективность и высокая эффективность использования водонефтяных систем для селективного ограничения водопритоков в добывающих скважинах уже доказана целым рядом лабораторных экспериментов и промысловых материалов.

Добавим, что локализованные зоны реопектически «загустевшей» жидкости также могут быть использованы для создания кольматационных барьеров, предотвращающих загрязнение пласта буровыми растворами.

На рис.3 в качестве примера приведены реовискозиметрические гистерезисные кривые течения образовавшейся реопектической жидкости в случае смешения твердой фазы (песка) с водонефтяными эмульсиями, приготовленными на основе высоковязкой нефти Калмасского месторождения. Интересен тот факт, что обратная кривая петли (верхняя стрелка) лежит выше прямой (нижняя стрелка), что однозначно указывает на реопектический характер исследуемых мультифазных систем жидкость – твердая фаза – жидкость.

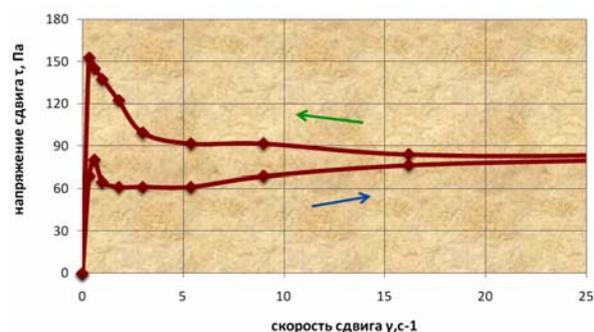


Рис. 3. Гистерезисные явления для водонефтяных эмульсий с содержанием 50% дисперсной (воды) и 45% твердой (кварцевого песка) фазы

3. Эффект «динамического запира-ния». В процессе заводнения пластов с высокой степенью неоднородности коллекторских свойств прорыв закачиваемых вод по наиболее проницаемым пластам и зонам терриген-

ного коллектора ведет к обводнению скважин до 95-98 %, при котором эффективность как самих гидродинамических методов, так и прочих методов повышения нефтеотдачи, резко снижается. Однако остаточные запасы нефти одного и того же пласта состоят не только из остаточной нефти микроуровня в промытых частях, но и из остаточной нефти макроуровня с практически начальными или слабоизмененными свойствами в низкопроницаемых прослоях и застойных зонах. В дополнение к традиционным гидродинамическим свойствам дисперсий жидкость-жидкость, при их течении в микроканалах добавляется эффект «динамического запира-ния», проявляющийся в широком диапазоне значений градиента давления (1МПа/м–3GPa/м) (Ахметов и др., 2004). При этом формирующаяся структура из микрокапель воды в углеводороде сдерживает огромные градиенты давления. Следует отметить, что при разработке нетрадиционных технологий обычный лабораторный инструментарий (вискозиметр плюс линейная модель пласта) нуждается в дополнении. К примеру, использование методов визуализации в вискозиметре и в экспериментах с элементами нефтяного пласта (трещиной, пористой структурой и капилляром) позволило выявить как механизм преобразования в них инвертных систем, так и новый эффект – динамическое запира-ние, лежащие в основе блокирующей пачки в потокоотклоняющих технологиях. Их применение позволяет перераспределять энергию закачиваемой в пласт воды и способствует извлечению нефти из невыработанных зон. Наличие данного эффекта, по всей видимости, обуславливает успех применения водонефтяных эмульсий в потокоотклоняющих технологиях и в качестве жидкостей для глушения скважин. Некоторые авторы в качестве основной причины возникновения «фактора сопротивления» – снижения подвижности мультифазных систем в пористой среде по сравнению с данными стандартных вискозиметрических измерений указывают на эффект «затвердевания» кинетических элементов жидкости. В случае, если период деформации частиц, движущихся в пористой среде через сужения и расширения пор, меньше времени релаксации возникающих напряжений, то частицы «затвердевают»

и могут закупоривать поры соответствующего размера. Макроскопически вязкоупругие эффекты проявляются в усилении неньютоновских аномалий, уменьшении расхода жидкости и затухании фильтрации. На рис. 4 в качестве примера эффекта «динамического запираания» водонефтяных эмульсий в модели пористой среды приведена зависимость $V=f(T)$, адаптированная с работы авторов (Ахметов и др., 2003). Как видно из рис.4, несмотря на рост давления, нелинейаризованная кривая 2 (верхняя кривая) не растет, т.е. происходит так называемое «динамическое запираание».

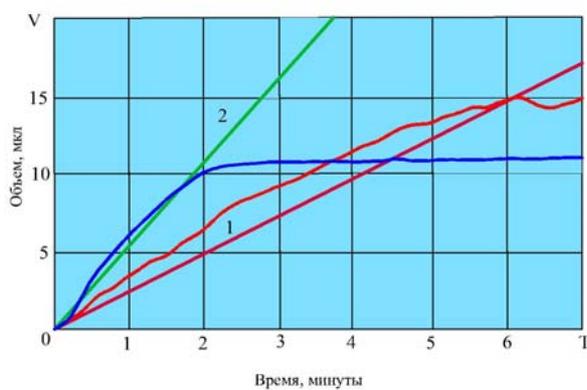


Рис. 4. Эффект «динамического запираания» в модели пласта

В науке таких эффектов – множество. Вышеприведенные примеры показывают широкие возможности реотехнологии, а именно: реотехнологических методов повышения эффективности процессов нефтегазодобычи на основе применения многофазных гетерогенных систем. Область применения реотехнологии в настоящее время расширяется, и особое значение это направление приобретает для осложненных условий эксплуатации. Учет реологических свойств неньютоновских систем требует пересмотра до сих пор сложившихся представлений, изменения их основ и предпосылок.

Используемые в настоящее время гидродинамические (циклическое заводнение, изменение направлений фильтрационных потоков, форсированный отбор жидкости и т.д.) и физико-химические (заводнение с применением ПАВ, полимеров, щелочи, серной кислоты, мицеллярных растворов и т.д.) методы повышения нефтеотдачи пластов, применение

которых обходится в несколько раз дороже и характеризуется различной эффективностью в определенных условиях, также может стать причиной образования вышеназванных эмульсий в пластовых условиях (Пудиков, 1984; Евдокимов, Лосев, 2010; Сулейманов и др., 1996; Сафиева и др., 2001).

Анализ таких решений может оказаться полезным при разработке стратегии управления технологическими процессами, требующими ограничения проникновения жидкостей в пористую среду. Ряд оптимизационных и технологических задач, связанных с особенностями разработки обширных водонефтяных зон площадного развития и малой нефтенасыщенной толщины, технологии вторичного вскрытия продуктивных пластов, подстилаемых водой, установление режимов отбора нефти и технологии их осуществления, разработки и испытания новых технологий отбора в добывающих скважинах требуют дальнейшего совершенствования и развития.

Таким образом, по результатам проведенных авторами экспериментов и, опираясь на существующие исследования ряда авторов, можно сделать вывод о том, что, умело используя и регулируя реотехнологические свойства гетерогенных систем, можно добиться повышения эффективности технологических процессов нефтедобычи и направить указанные системы в нужное русло. Методы реотехнологии могут быть использованы для изучения структуры и устойчивых водонефтяных эмульсий, консистенция которых колеблется в широких пределах системы жидкость – твердое тело (Огр, 2009; Сафиева, Сюняев, 2007).

В перспективе области и география применения гетерогенных (а именно, аномальных водонефтяных) систем, несомненно, будут расширяться. Переход большинства нефтяных месторождений Азербайджана в заключительную стадию разработки, ввод в эксплуатацию залежей с трудноизвлекаемыми, высоковязкими и сероводородсодержащими нефтями потребуют нового, отличающегося от существующих подходов к вопросам сохранения, восстановления и улучшения коллекторских свойств пласта. В этом плане гетерогенные системы благодаря своим уникальным свойствам могут позволить успешно и эффективно

решать часть технологических проблем, имеющих место в современном периоде нефтедобыче. Исследования в данном направлении продолжаются, и авторы надеются на плодотворное сотрудничество своих коллег в области удивительной науки – реотехнологии.

ЛИТЕРАТУРА

- АНТИПИН, Ю.В., ВАЛЕЕВ, М.Д., СЫРТЛАНОВ, А.Ш. 1987. Предотвращение осложнений при добыче обводненной нефти. Уфа. 168.
- АХМЕТОВ, А.Т., ТЕЛИН, А.Г., ГЛУХОВ, В.В., МАВЛЕТОВ, М.В. 2003. Движение эмульсий в щелевых и пористых структурах. В трудах 12-го Европейского симпозиума: *Повышение нефтеотдачи пластов*, Казань, 212-217.
- АХМЕТОВ, А.Т., ТЕЛИН, А.Г., КОРНИЛОВ, А.А. 2004. Дисперсионные и реологические характеристики обратных водонефтяных эмульсий на основе нефтей. *Научно-технический вестник ЮКОС*, 9, 43-50.
- ГУМБАТОВ, Г.Г., БАГИРОВ, О.Т., САРЫЕВ, С.К. и др. 2002. Регулирование техногенных процессов для повышения добывных возможностей скважин. Маариф. Баку. 397.
- ЕВДОКИМОВ, И.Н., ЛОСЕВ, А.П. 2010. Проблема инверсии в промысловых водонефтяных эмульсиях (Традиционные представления и их экспериментальное обоснование). *Бурение и нефть*, 3, 16-17.
- ИСМАЙЫЛОВ, Г.Г., САФАРОВ, Н.М. 2011. Реотехнология вязкосыпучих систем, Баку, 156.
- ИСМАЙЫЛОВ, Г.Г., САФАРОВ, Н.М., КЕЛОВА, И.Н. 2011. О новом подходе к структурно-реологическим свойствам водонефтяных эмульсий. *Вестник Азербайджанской инженерной академии*, 3, 2, 81-94.
- ИСМАЙЫЛОВ, Г.Г., САФАРОВ, Н.М., ГУЛИЕВ, В.К., ГАСАНОВ, Х.И. 2011. О возможности и причинах образования аномальных водонефтяных эмульсий в пласте. В материалах международной научно-исследовательской конференции: *Современные проблемы нефтегазового комплекса Казахстана*. Актау. 153-158.
- МИРЗАДЖАНЗАДЕ, А.Х., ХАСАНОВ, М.М., БАХТИЗИН, Р.Н. 1999. Этюды о моделировании сложных систем в нефтедобыче. Гилем. Уфа. 464.
- МИРЗАДЖАНЗАДЕ, А.Х., АМЕТОВ, И.М., ЕНТОВ, В.М., РЫЖИК, В.М. 1986. Реологические проблемы нефтегазодобычи. ВНИИЭОНГ, 53.
- МИРЗАДЖАНЗАДЕ, А.Х., АМЕТОВ, И.М., ХАСАЕВ, А.М., ГУСЕВ, В.И. 1985. Теория и практика применения неравновесных систем в нефтедобыче. Элм. Баку. 220.
- МИРЗАДЖАНЗАДЕ, А.Х., ВЕЛИЕВ, Ф.Г. 1986. Реофизические проблемы нефтегазодобычи. В: *Тематический сборник АЗИНЕФТЕХИМ*, 3-20.
- ОРЛОВ, Г.А., КЕНДИС, М.Ш., ГЛУЩЕНКО, В.Н. 1991. Применение обратных эмульсий в нефтедобыче. Недра. Москва. 224.
- ПУДИКОВ, Б.В. 1984. Экспериментальные исследования реологических свойств эмульсий вязких нефтей. В сборнике: *Сбор, подготовка тяжелых и высоковязких нефтей*, ВНИИСПТнефть, Уфа, 51-59.
- САТАРОВ, Р.М., САТТАРЗАДЕ, И.Р., ГУСМАНОВА, А.Г. 2010. Наномоделирование технологических процессов разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений. *Азербайджанское нефтяное хозяйство*, 1, 42-51.
- САФИЕВА, Р.З., МАГАДОВА, Л.А., КЛИМОВА, Л.З., БОРИСОВА, О.А. 2001. Физико-химические свойства нефтяных дисперсных систем. Изд-во РГУ нефти и газа им.И.М.Губкина. Москва. 60.
- САФИЕВА, Р.З., СЮНЯЕВ, Р.З. 2007. Физико-химические свойства нефтяных дисперсных систем и нефтегазовые технологии. Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Москва, Ижевск. 580..
- СУЛЕЙМАНОВ, Б.А. 2006. Особенности фильтрации гетерогенных систем. Институт компьютерных исследований. Москва, Ижевск. 356..
- СУЛЕЙМАНОВ, Б.А., ПАНАХОВ, Г.М., АББАСОВ, Э.М. 1996. О влиянии образования эмульсии в пластовых условиях на работу нефтедобывающих скважин. *Азербайджанское нефтяное хозяйство*, 5, 26-29.
- ЧЕКАЛЮК, Э.Б., ФИЛЯС, Ю.А. 1977. Водонефтяные растворы. Киев. 240.
- ШЕРМАН, Ф. 1972. Эмульсии. Химия. Ленинград. 448.
- ALWADANI, M.S. 2009. Characterization and rheology of water- in - oil emulsion from deep water fields. Master Thesis. Rice University. Houston TX. 121.
- ORR, R. 2009. Phase inversion in heavy crude oil production. *Proceedings of Teknas conference on heavy oil technology for offshore applications*, 14-15 May, Stavanger, Norway, 21-25.

Рецензент: член-корр. НАН Азербайджана Г.И.Джалалов