

УДК 620.5

Э.К. ШАХБАЗОВ

ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Впервые в Азербайджане были проведены на основе эффекта «малой концентрации и возмущений» научные исследования, лабораторные и промышленно-испытательные работы по улучшению технико-технологических и экономических показателей нефтегазодобычи. Разработаны научные основы свертекучести флюидов в призабойной зоне. В результате разработки и внедрения нанотехнологий в малодебитных и обводненных скважинах НГДУ «Сиязьянефть», «Гумадасы», «Абиероннефть», «Бибиэйбатнефть» «Сураханынефть» ПО «Азнефть» удалось добиться увеличения добычи нефти до 2 раз, снижения энергозатрат на нефтедобычу на 15%, снижения количества воды в извлекаемой жидкости до 50%.

Ключевые слова: нефтяная промышленность, нанотехнологические процессы, наночастицы, наноявления в нефтегазовых пластах, наножидкости

1. Введение. Под наносистемами обычно понимают множество тел, окруженных газовой или жидкой средой, размер которых находится в пределах 0,1–100 нм. Это промежуточные формы между атомами и макроскопическими телами. Особенность нанотел состоит в том, что их размер соизмерим с радиусом сил межфазного взаимодействия, т.е. с расстоянием на котором сказываются взаимодействия между телами на атомарном уровне [1].

Поэтому к объектам исследований нанотехнологий относятся ультрадисперсные системы (УДС), в том числе глины, аэрозоли, мицеллярные, коллоидные растворы, полимерные золи и гели и пленки жидкости на поверхностях.

Нефтяной пласт представляет собой высокодисперсную систему, т.е. наносистему с большой поверхностью границ раздела фаз и огромным количеством капиллярных каналов, в которых движутся жидкости, образующие мениски на границах раздела фаз [1, 2].

Механизм перемещения нефти в пласте и ее извлечение, во многом определяется молекулярно-поверхностными процессами (нанопроцессами), протекающими на границах раздела фаз (породы – пластовые жидкости и газы – вытесняющие агенты).

Известно, что основным методом разработки нефтяных месторождений является заводнение, а возникающие при этом явления смачивания на контакте водный раствор-нефть имеют наноразмерный масштаб.

Обширный опыт разработки нефтяных и газовых месторождений, а также анализ традиционных методов воздействия, в частности, вторичных и третичных методов показал, что некоторые из них можно с уверенностью отнести к нанотехнологии (мицеллярные растворы, микроэмульсия, микрозародыши).

Это объясняется механизмом воздействия этих методов на систему «скважина-пласт» и получаемому эффекту на выработанных и техногенно-измененных залежах с низким коэффициентом нефтеотдачи.

Именно в таких залежах с трудноизвлекаемыми остаточными запасами, где применение «силового» метода, к каковым относится заводнение, не оказывает требуемого эффекта, необходимо применение нанотехнологий.

Поведение природных коллекторов, имеющих довольно большой запас углеводородов, активно на любое даже малое воздействие, как на призабойную зону, так и на весь пласт. Это предположение подтвердили первые же эксперименты с наноразмерными частицами, включенными в состав жидкостей с использованием определенной доли традиционных

деэмульгаторов и ПАВ, показали существенное снижение поверхностного натяжения и вязкости, улучшение смачиваемости.

Причем, эти эффекты были получены при очень небольших концентрациях наночастиц (порядка 0,001-0,01 %) [1].

Промысловые испытания нанотехнологических жидкостей с низкой концентрацией металлических наночастиц размером 100-120 нм на скважинах, эксплуатируемых глубинонасосным способом, путем заливки в затрубное пространство и в пласт через забойную зону нагнетательных скважин, показали существенные изменения в повышении дебита, снижении обводненности, увеличении МРП, уменьшении себестоимости добываемой продукции.

Вышеуказанные факты доказывают о положительном влиянии «эффекта малых величин» в сложных динамических системах. При этом получены ярко выраженные синергетические свойства наносистем, закачиваемых в пласт, поскольку наибольшая эффективность получена при обработке пласта через призабойную зону.

Так как доказано, что нефтяные пласты представляют собой наносистему, то влияя на пластовую систему посредством другой наносистемы мы получаем новый эффект типа «нано+нано», что дает нам основание для проведения широких исследований не только в области нефтегазодобычи, но и в областях бурения, сбора, подготовки и транспорта нефти и газа, борьбе с осложнениями и коррозией.

Анализ реальных явлений с применением математики обычно связывают с получением численного результата. Задача качественных исследований состоит в получении характерных черт явления и путем прогнозирования найти простейшую модель, описывающую данное явление, получить математическими средствами анализа сведения о нанотехнологическом процессе и дать рекомендации для практики.

Авторами впервые предлагаются математические методы для исследования разработок и внедрения нанотехнологий для установления закономерностей изменения параметров образцов нефтенесущих пород, пластовых жидкостей и наноконпозиций для их последующего внедрения результатов в промышленное производство [1].

2. Постановка задачи. На основе эффекта малых концентраций и возмущений» исследованы основные реологические характеристики системы «пласт–скважина».

Установлено, что у пластовой воды и у других реагентов есть память на наноуровне. Определена сверхтекучесть флюидного потока нефтяных скважин [5].

Полученные статистические данные по результатам экспериментальных и промысловых испытаний нанотехнологических процессов, требуют применения специальных математических методов и моделей с целью более точного описания физической природы явлений, происходящих в процессе внедрения нанотехнологий в различных отраслях нефтяной промышленности.

Как было отмечено выше, при обработке пластовой системы наножидкостями были выявлены синергетические свойства в виде комплекса улучшенных параметров. Анализируя графики зависимостей изменения этих параметров, были отмечены признаки свойств самоподобия кривых до и после проведения нанопроцессов.

Следовательно, согласно эволюционной теории, в пластовой системе происходит переход от хаоса к порядку в процессе образования новых, более стабильных наноструктур, что приводит к выводу о свойстве самоорганизации данной системы. Исходя из этого факта для математического описания данного процесса возможно использование теории фрактальной размерности Хаусдорфа, согласно которой можно установить степень устойчивости системы при переходе от хаоса к порядку [1].

В данной статье приводятся результаты эффекта сверхтекучести флюида призабойной

зоне.

В SOCAR разработана «Программа «НАНОНЕФТЬ» на 2010-2015 г.г. с планом перспективных разработок по нанотехнологиям в области бурения, нефтедобычи, нефтехимии и экологии.

Анализ проведенных работ показывает, что проблема применения нанотехнологий в нефтегазодобыче является многоаспектной проблемой. Сюда входит, наряду с разными физическими, химическими процессами, происходящими в нефтяных пластах, исследование закономерностей нефтяных потоков в наноразмерных системах [2-6].

Исследовательские работы указывают на то, что использование в нефтедобывающих системах наночастиц разных металлов в виде катализаторов позволяет повысить активность эксплуатируемых длительное время нефтяных скважин. Металлические наночастицы (МНЧ), покрытые поверхностно-активными веществами (ПАВ), смешиваясь с нефтепродуктами в водонефтяной и глинистых средах, за счет броуновского движения приводят к образованию углекислого газа, который выводит систему из равновесного состояния, что, в конечном счете, увеличивает нефтеотдачу [5-7].

В результате проделанной серии экспериментов было выявлено, что созданная на основе «НАНОПАВ» наносреда оказывает каталитическое воздействие на химические реакции в пластовой среде, в результате чего образуются различные газы, в том числе углекислый газ, и тем самым достигается повышение давления в системе. В наноцементном каркасе скважины при этом возникает множество микро- и наноканалов, по которым нефть из пласта поступает в скважину, причем в капиллярах нанокаркаса, имеющих наномасштабный размер, фильтрация потоков флюидов приобретает характер медленного (ползущего) течения, свойственного потокам с малым числом Рейнольдса [8], имеющего длительную временную протяженность (метастабильное состояние) и скорость, меньшую критической скорости, т.е. возникает сверхтекучесть, исследованная для классической жидкости в фундаментальных работах [5].

В настоящей работе исследована физико-химическая сущность образования пористой структуры в виде каналов микро-и наномасштабного размера в наноцементном каркасе скважины. Проведен сравнительный анализ энергетических спектров Боголюбова и Маслова для жидкости. Показано применение теории Маслова о сверхтекучести классической жидкости в нанокapиллярах к описанию течения флюида в нанокapкacе скважины. На примере действующей скважины с нанокapкacом проведены расчеты критической скорости сверхтекучести для пористых каналов различных размеров и установлена сверхтекучесть флюида в каналах с радиусами, соответствующими феномену сверхтекучести жидкости по критерию В.П. Маслова [8-9].

Проведенные экспериментальные исследования на каркасах скважины, сформированных с помощью нанонизированных образцов цемента, показали, что в результате химической реакции металлических наночастиц с цементом происходит выделение газов (CO_2 и H_2), которые в свою очередь образуют целую систему связанных каналов микромасштабного размера, пронизывающих весь каркас в направлении от пласта к скважине. Газохроматография, проведенная на данных образцах, выявила состав газовой смеси: H_2 – 0,002% от объема каркаса. К тому же, пористость каркаса увеличилась до 37%.

3. Сверхтекучесть флюидного потока через нанокapкac скважины. Рассмотрим особенности движения в ограниченных наноканалах «простейших флюидов», в которых взаимодействие между частицами описывается потенциалом Леннарда-Джонса (LJ), а динамика подчиняется закону Ньютона. Во-первых, для таких флюидов расчет потенциала взаимодействия связан с гораздо меньшими вычислительными затратами, чем для сложных систем флюидов. Во-вторых, несмотря на их простоту, удается выяснить физическую суть

процесса транспортировки флюидов в наноканалах. В-третьих, большинство результатов исследования транспортировки нанофлюидов получено в предельном случае рассмотрения простейших флюидов [5].

Потенциал Леннарда-Джонса, описывающий взаимодействие атомов жидкости, имеет вид $V_{LJ} = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r}\right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r}\right)^6 \right]$, где ϵ – энергия взаимодействия между атомами; σ – расстояние, на котором потенциал взаимодействия двух атомов обращается в нуль, что приблизительно равно расстоянию между атомами жидкости. Для жидкости с потенциалом взаимодействия (V_{LJ}) используются следующие единицы размерности: длина – σ , масса – m , энергия – ϵ , время – $(m\sigma^2/\epsilon)^{1/2}$, число плотности – σ^{-3} , температура – ϵ/k_B (k_B – постоянная Больцмана), скорость – $(\epsilon/m)^{1/2}$, сдвиг – $(\epsilon/m\sigma^2)^{1/2}$, напряжение – ϵ/σ^3 , вязкость – $(m/\epsilon)^{1/2}/\sigma^2$, диффузия – $(\epsilon/m)^{1/2}$.

Из периодической системы элементов Д.И.Менделеева следует, что углерод С и кислород О имеют относительные атомные массы, равные 12 и 16, а соответствующие им числа нейтронов – 6 и 8. Водород Н с относительной атомной массой 1 вообще не имеет нейтронов. Поэтому частицы флюидов, представляющих собой соединения углерода с кислородом и или водородом, являются бозе-частицами (бозонами). Напомним, что относительная масса атома химического элемента показывает, во сколько раз масса атома химического элемента больше 1/12 массы атома углерода. Абсолютная масса, равная 1/12 массы атома углерода, является эталонной единицей, значение которой вычислено с высокой точностью и составляет $1.66 \cdot 10^{-24}$ г. Эта эталонная масса называется атомной единицей массы.

Таким образом, вышеуказанную углеводородную жидкость (флюид) можно рассматривать как бозонную массу с соответствующим условием сверхтекучести.

Как указано в [5], медленное вязкое течение, так называемое ползущее (creeping) течение, обычно имеет место для жидкости в ситуациях, когда число Рейнольдса Re мало, потому что силы вязкости, возникающие при сдвиговом движении жидкости, значительно больше сил инерции, связанных с ускорением или торможением частиц жидкости. Во многих практических ситуациях, связанных с седиментацией и псевдооживлением, число Рейнольдса (подсчитанное по диаметру частицы) не превышает пяти. Стало быть, эти процессы можно рассматривать как ползущее течение, описываемое уравнением Стокса [8].

Рассмотрим явления сверхтекучести флюидов нанокаркас скважины, полученный с помощью наноцемента (цемент+НАНО).

На основе экспериментальных исследований по эксплуатации скважины с нанокаркасом на месторождении «Нефт Дашлары» получены следующие данные:

- суточный дебит нефти – 2 т;
- число Рейнольдса – 2;
- пластовое давление – 10 МПа;
- давление гидравлического сопротивления – 8 МПа;
- плотность жидкости – 0.86 г/см^3 ;
- наименьшее расстояние между стенками нанокаркаса по направлению нормали к контуру скважины – 2.75 м.

Для расчета скорости вытекания жидкости V из нанокаркаса воспользуемся известной формулой Дарси-Вейсбаха $\Delta p = \lambda V \frac{\ell}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho$, где $\Delta p = p_{пл} - p_{г.с}$, $p_{пл}$ и $p_{г.с}$ – соответственно давление в пласте и давление гидравлического сопротивления; ℓ и D – длина и диаметр трубки; ρ – плотность жидкости; v – течение жидкости вдоль трубки; λ – коэффициент потерь на трение по длине $\lambda = \frac{64}{Re}$ Re – число Рейнольдса.

Полагая $rl \geq 2.75$ м, находим для диаметров капилляров 0.161; 50 и 500 μm соответствующие наименьшие верхние границы (супремумы) скорости течения жидкости вдоль капилляра $0.75 \cdot 10^{-3}$; $0.5138 \cdot 10^{-4}$ и $0.22 \cdot 10^{-3}$ м/сек.

Сравнивая эти значения с соответствующими значениями критических скоростей 0.1666; $0.5345 \cdot 10^{-4}$ и $0.5345 \cdot 10^{-5}$ м/сек, приходим к следующему выводу. Для капилляров с диаметром D не более 50 μm выполняется условие сверхтекучести $[v] < v_{кр}$, а при диаметрах, больших 50 μm , условие сверхтекучести нарушается. Это означает, что при $D > 50 \mu\text{m}$ может наступить резонанс метастабильных состояний с неметастабильными, что приводит к появлению вихревых нитей (турбулентности) в капилляре и различным осложнениям (гидратным осадкам, пескопроявлению и т.д.), в результате чего происходит закупорка данного капилляра. В капиллярах же с диаметром $D \geq 50 \mu\text{m}$ имеет место сверхтекучесть – метастабильное состояние, характеризующее ползущее течение с пролонгированной продолжительностью, что подтверждается на исследуемой нами скважине с нанокаркасом, которая больше полутора лет непрерывно работает (без каких либо остановок для проведения очистительных работ) и имеет среднесуточный дебит нефти в 2 т. Обычные же каркасы с искусственной перфорацией через каждые полгода приходилось подвергать очистке от песка и других осадков, что приводило к быстрому их износу.

Покажем на примере скважины №1155, эксплуатируемой в НГДУ «Нефт дашлары», реализацию вышеприведенных теоретических результатов. На этой скважине наиболее проявляется наличие песка в добываемой нефти. Данная скважина находится под наблюдением с 10.05.15 по настоящее время. В состав добываемой жидкости входят 4 компонента: нефть, вода, глина, песок. Между этими компонентами происходит своеобразная конкуренция, результаты которой приводят к последовательному улучшению состава флюида. Условно этот процесс можно разбить на 4 этапа. На первом этапе добываемая жидкость состоит только из воды и глины. На последующем втором этапе на воде образуется тонкая пленка нефти и увеличивается процентное содержание глины. На третьем этапе в состав добываемой жидкости включается нефть и песок с преобладающим процентным содержанием относительно воды. На заключительном IV этапе в состав жидкости входит только нефть и вода в отношении 2:1. За 15 месяцев эксплуатации скважины добыто 960 т нефти, в среднем 2,1 т нефти в сутки [5].

Изменение консистенции добываемой жидкости можно объяснить следующим образом. На первых трех этапах жидкость поступает из пласта в скважину в основном через каналы с большими диаметрами со скоростью, превышающей критическую скорость сверхтекучести. Однако такие каналы через небольшой промежуток времени (примерно 2–3 месяца) забиваются песком и перестают действовать. В IV этапе в процессе фильтрации участвуют только те каналы, в которых скорость течения жидкости не превосходит критической скорости сверхтекучести, т.е. течение становится исключительно сверхтекучим. Такое течение обладает малой линейной скоростью (так называемое ползущее течение), но является метастабильным (с большой длительностью). Такой характер течения жидкости в нанокаркасе подтверждается промысловыми данными: скважина №1155 со стволом, заключенным в нанокаркас, работает непрерывно больше двух лет.

Обычные же каркасы скважин с искусственной перфорацией через каждые, в среднем, 1,5-2 месяцев приходилось подвергать очистке от песка и других осадков, что приводило к быстрому их износу.

На основе «эффекта малых концентраций и возмущений» разработаны наносистемы и внедрены в различных нефтегазодобывающих объектах, что приводится ниже.

4. Примеры реализации нанотехнологий в нефтегазодобыче.

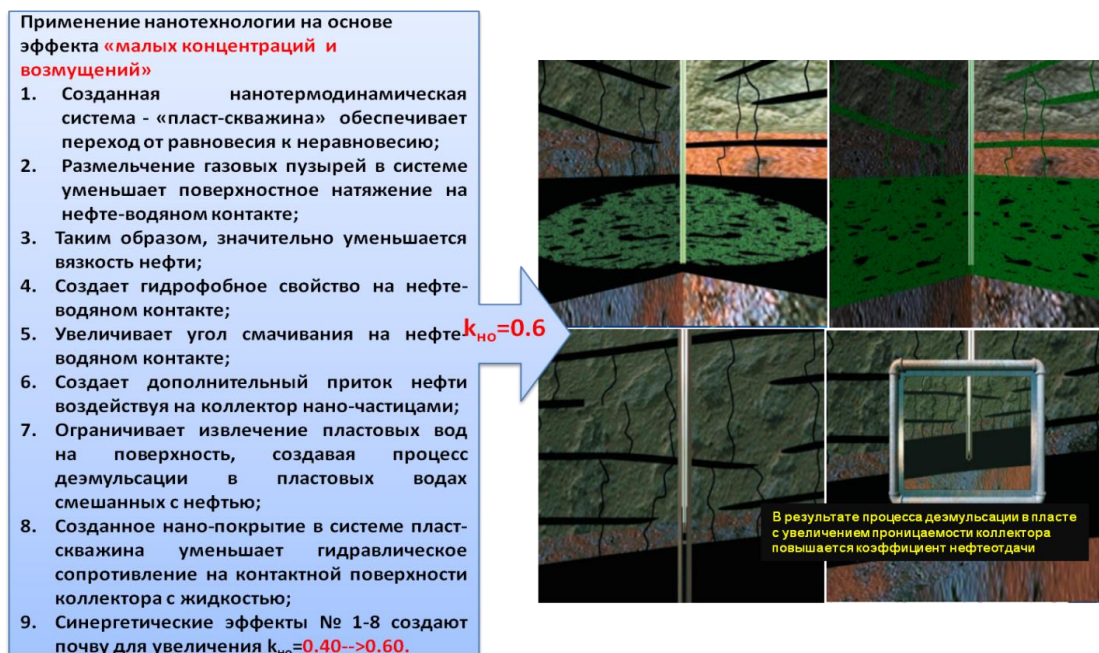


Рис.1 Схема закачки наноразнора в нефтяной пласт

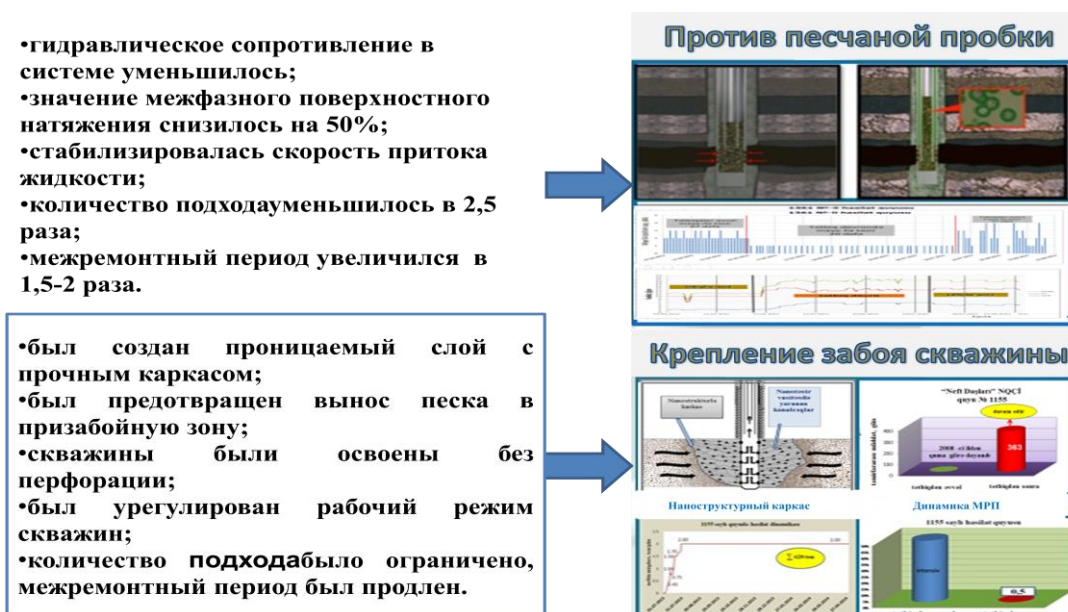


Рис. 2 Эффект против песчаной пробки



Рис.3 Эффект при добыче остаточной нефти

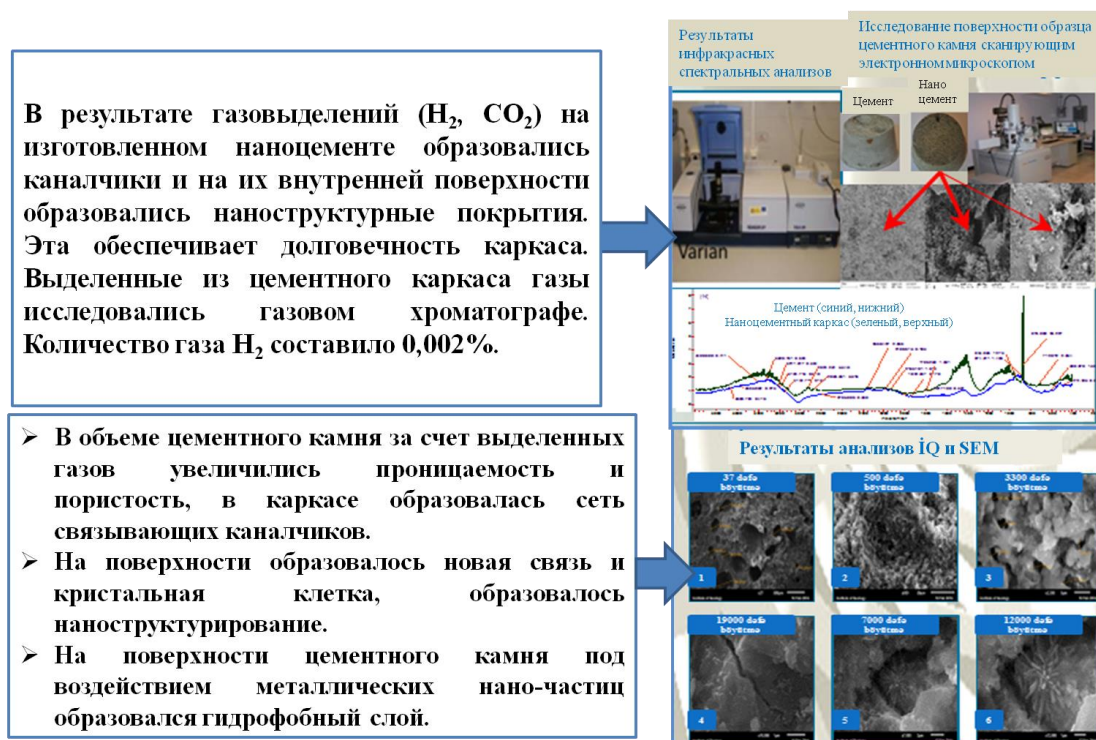
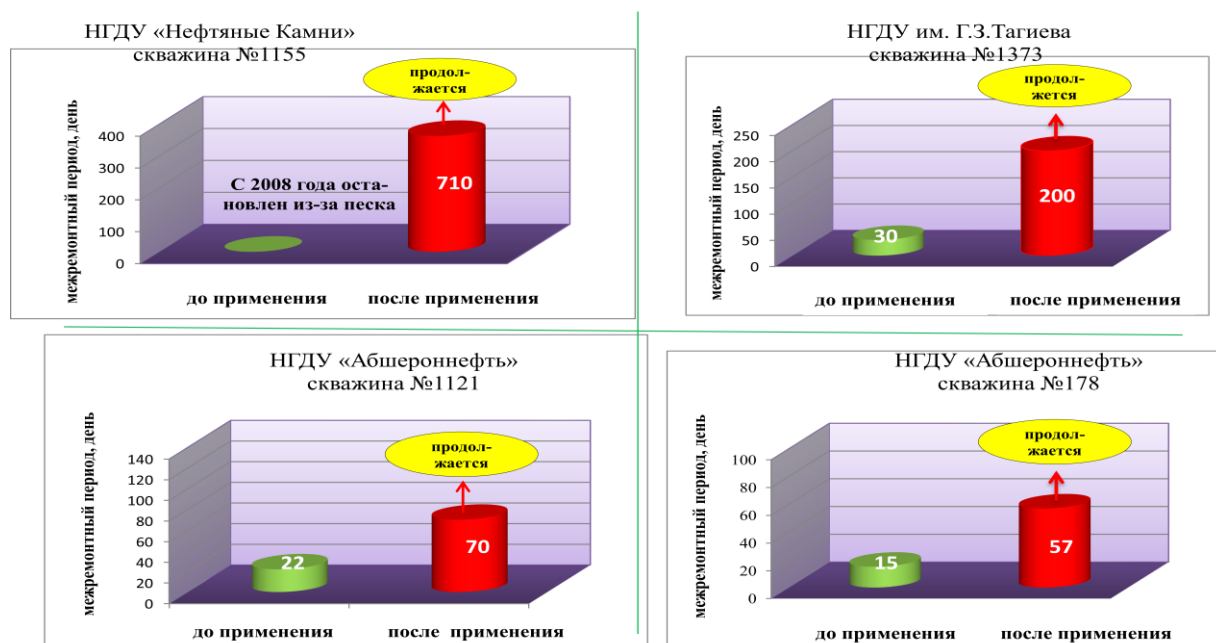


Рис.4 Исследования по получению нанонизированной структуры каркаса



Примечание: Была применена в скважинах 1324 НГДУ «Нефтяные Камни», 1322, 1285, 1307, 1361 НГДУ им. З.Тагиева, 1364 НГДУ им. А.Д.Амирова. В данный момент скважины осваиваются.

Рис.5 Динамика увеличения межремонтного периода скважин с применением наносистем

5. Заключение. В заключение отметим, что создание перспективных нанотехнологий для разработки нефтегазовых месторождений требует получения необходимых знаний о природе извлекаемой жидкости, среды на атомном, молекулярном, нано-микро-уровнях, которые позволят решить многие проблемы при проектировании нанотехнологий для нефтедобычи, переработки и транспортировки нефти. В настоящее время все эти работы, упомянутые выше выполняются согласно программы «НАНОНЕФТЬ» на 2010-2015 гг. Эта программа предусматривает 4 основных направления в нефтяной промышленности. Это добыча нефти и газа, бурение, нефтехимия и экология.

Литература

1. Шахбазов Э.К. Нанотехнологии в нефтяной промышленности. Баку, 2012, стр.42-49
2. Хавкин А.Я. Нанотехнологии в добыче нефти и газа. П.Ц. «Наукоёмкие технологии» М., 2008, 171 стр.
3. Сургучев М.Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов // М., Недра, 1985, 309 стр.
4. Kh.B.Yusifzadeh, E.G. Shahbazov. Development and application of nanotechnologies in oil and gaz production. Baku, 2011.
5. Э.К. Шахбазов, О.А. Дышин. Феномен сверхтекучести флюидов в нанокорпусе нефтяных скважин. АНХ, стр 31-39
6. Мирзаджанзаде А.Х., Магеррамов А.М., Абдуллаев Р., Юсифзаде А.Х., Шахбазов Э.К., Курбанов Р. и др. Научные основы разработки и внедрения нанотехнологий в нефтяной промышленности – В кн: Нанонаука и нанотехнологии. Энциклопедия систем жизнеобеспечения – Изд-во ЮНЕСКО, 2011, с. 554-570.
7. Шахбазов Э.К., Дышин О.А. «Научные основы системы «НАНОПАВ» для бурения и добычи нефти и газа» // Баку, SOCAR, -2011- С.59.
8. Хаппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса /Пер.с. англ., - М...Мир, 1976-С.630.
9. Маслов В.П. О сверхтекучести классической жидкости в нанотрубке для четного и нечетного числа нейтронов в молекуле// Теоретическая и математическая физика, 2007, Т.153, N3, с.388-408.

UOT 620.5

E.Q. Şahbazov

Neft sənayesində nanotexnoloji proseslərin əsaslarının işlənməsi və inkişaf perspektivi

Azərbaycanda ilk dəfə olaraq "kicik təsir və həyəcan" effekti əsasında neftqaz hasilatı sahəsində texniki-texnoloji və iqtisadi göstəricilər üzrə elmi tədqiqat, laborator və sınaq istehsalat işləri aparılmışdır. Nanotexnologiyanın işlənməsi və tətbiqi nəticəsində "Azneft" İB-nin "Siyəzəneft", "Abşeronneft", "Bibiheybətneft" və əvvəlki "Suraxanıneft" NQÇİ-nin azdebitli və sulaşmış quyularında neftin istehsalı 2 dəfəyədək artmış, neftçıxarmada enerji məsrəfi 15% azalmış, çıxarılan mayenin tərkibindəki su 50% qədər azaldılmışdır.

Açar sözlər: neft sənayesi, nanotexnoloji proseslər, nanohissəciklər, neftqazlı laylarda nanohadisə, nanomayələr

E.G. Shabazov

Elaboration and development prospective of principles of nanotechnological processes in oil industry

For the first time in Azerbaijan, on the basis of "small concentration and perturbations" effect, the scientific research laboratory and field test jobs on the improvement of technical–technological and economic indicators of oil and gas production were carried out. As a result of development and introduction of nanotechnologies in marginal and flooded wells of OGPD "Siyazanneft", "Gum adasi", "Absheronneft" , "Bibiheybatneft" and in previous "Surakhanyneft" PU "Azneft", the oil production was increased up to 2 times, energy consumption for oil production was reduced by 15 % , and the amount of water in the recovered fluid was reduced by 50%.

Keywords: oil industry, nanotechnological processes, nanoparticles, nanophenomenon in oil gas formations, nanofluids

Институт Систем Управления НАН Азербайджана

Представлено 30.03.2016