

РОЛЬ МИНЕРАЛЬНЫХ НАНОФАЗ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ РАЗРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ПОЗДНЕЙ СТАДИИ

В работе проанализировано современное состояние и проблемы нефтегазовой отрасли страны, показана роль и эффективность применения нанотехнологий в методах увеличения нефтеотдачи на поздней стадии разработки месторождений. Приведены результаты исследований минеральных нанофаз перспективных коллекторских зон и продуктивных нефтеносных горизонтов Республики Татарстан.

Ключевые слова: месторождение, коллектор, пласт, минерал, наноминералы, нефтеотдача, коэффициент извлечения нефти (КИН), нанотехнологии, методы увеличения нефтеотдачи.

Быстрый рост добычи нефти в России во второй половине XX века был обеспечен открытиями уникальных месторождений с приемлемыми геологическими условиями. Современная деятельность нефтяных компаний на территории России осложнена большими технологическими проблемами, поскольку 65% оставшихся к XXI веку российских запасов нефти и газа относятся к категории трудноизвлекаемых запасов нефти (Лаверов, 2006). В настоящее время в балансе запасов нефти России категория трудноизвлекаемых составляют уже более 70%, из них около 40% находятся в низкопроницаемых типах коллекторов, 34% составляют остаточные запасы нефти в заводненных зонах, 14% – высоковязкие нефти. При этом из традиционных запасов добывается почти 60% годовой добычи нефти в России, а из категории трудноизвлекаемых – 40% (Лаверов, 2006; Байбаков, 1997).

По данным Энергетической стратегии России на период до 2030 года (ЭСР-2013), коэффициент извлечения нефти в России в 2009 г. составлял 0,3 (Энергетическая стратегия... 2009), а в других странах, в частности, в Норвегии – 0,45, в Саудовской Аравии и США – 0,5 (Гусейнов, 2012).

Вследствие низкого коэффициента извлечения нефти, потери извлекаемых запасов России за период с 1965 года по 2000 год составили около 15 млрд. т. Данная величина сопоставима с суммарной добычей нефти за всю историю нефтяной отрасли России (17,5 млрд. т) и, находясь на балансе извлекаемыми запасами нефти в количестве 16,5 млрд. т. (Концепция программы преодоления падения нефтеотдачи, 2006). Но по международным оценкам, доказанные запасы нефти России составляют 8,2 млрд. т. Очевидно, что при уровне добычи нефти как в 2011 году обеспеченность России доказанными запасами нефти составляет только 17-20 лет. Обеспеченность запасами нефти в мире составляет 50 лет, а с учетом 50%-го роста потребностей – 35 лет (Хавкин, 2010). Разведанность территории России составляет около 33%, а неразведанные извлекаемые ресурсы нефти (т.е. нефть в месторождениях, пока еще не имеющих рентабельной технологии разработки) оцениваются в несколько десятков миллиардов тонн (Лаверов, 2006), для их извлечения необходимы новые методы увеличения нефтеотдачи (МУН).

В мире к 2008 году реализовывалось более 350 проектов по МУН, из них более 45% по водогазовым и более 45% по тепловым технологиям. В то же время химические технологии составляли только 6%. В США было реализовано более половины мировых проектов, примерно с такой же пропорцией по технологиям (Дияшев, 2008). В Норвегии на ряде месторождений водо-газовые технологии для маловязких нефтей обеспечивали коэффициент извлечения нефти на уровне 0,6-0,7 (Хавкин, 2010).

Проведенный анализ показывает, что в ближайшие годы нефть в Российской Федерации будет добываться, в основном, из разрабатываемых и подготовленных ранее к освоению месторождений (Козловский, 2009). Поэтому, для масштабного увеличения извлекаемых запасов необходимо совершенствовать технологии для этих категорий запасов нефти, характеризующихся высокой обводненностью продукции, низкой проницаемостью, повышенной вязкостью. Фактически, большинство нефтегазовых технологий увеличения нефтеотдачи влияют на процессы вытеснения нефти на наноуровне и являются нефтегазовыми нанотехнологиями (НГНТ) (Хавкин, 2010).

Нанотехнологии – это технологии управления макропараметрами объекта через воздействие на его наноконпоненты (0,1-100 нм), используя наноразмерные явления (наноявления).

Как показал анализ (Хавкин, 2010), нефтяная наука, являясь частью наук о Земле, и аккумулируя геологию, гидродинамику, технику, химию, математику, имеет свой специфический объект исследований – физико-химические наноявления в геологических телах, пластовых флюидах и на промысловом оборудовании, охватывающий как сами наноявления, так и способы их учета при геолого-гидродинамических и технико-экономических расчетах разработки и эксплуатации нефтегазовых залежей. Коэффициент извлечения нефти (КИН) должен быть национальным приоритетом России (Муслимов, 2009). Для обеспечения высоких КИН, особенно на поздних стадиях разработки месторождений, следует углубленно изучать особенности вытеснения нефти из продуктивных пород на микро- и наноуровне.

Такие страны, как США и Канада вырвались вперед по КИН, добывая высоковязкую нефть за счет внедрения су-

персовременных технических средств и технологий (по сути дела, нефтегазовых нанотехнологий). В Канаде за счет внедрения таких технологий в 2003 году удалось увеличить свои доказанные извлекаемые запасы нефти за один год на 24 млрд. т (Концепция программы преодоления падения нефтеотдачи, 2006).

Применение нанотехнологий методов увеличения нефти в освоенных районах может быть значительно дешевле (диапазон себестоимости 6-11 долл./баррель), чем применение традиционных технологий в новых районах. Но новые месторождения необходимо еще открыть и обустроить (а это 8-10 лет (Козловский, 2009)), а применить нанотехнологии методов увеличения нефти в освоенных районах можно за 2-3 года, не требуя капитальных вложений уровня геологоразведочных работ и бурения значительного количества новых эксплуатационных скважин.

В Энергетической стратегии России в качестве приоритетных направлений научно-технического прогресса в энергетическом секторе выделены (Энергетическая стратегия..., 2009):

– увеличение коэффициента извлечения нефти на разрабатываемых и вводимых в разработку месторождениях, в том числе нетрадиционных видов углеводородного сырья: тяжелой (высоковязкой) нефти и природных битумов за счет внедрения современных методов увеличения нефтеотдачи;

– создание и широкое применение отечественных программно-аппаратных комплексов, оборудования и приборов для моделирования и управления геолого-техническими мероприятиями в процессе разработки месторождений.

На поздней стадии разработки месторождений возрастает роль нанотехнологий, которые могут быть применены на ряде месторождений нефти, при этом необходимо проводить детальное изучение, как литологических особенностей пород-коллекторов, так и тонкодисперсных минералов, в том числе и наноминеральных комплексов, влияющих на коэффициент извлечения нефти.

Одним из таких регионов, где проводятся детальные исследования, связанные с наноминеральными комплексами, является Республика Татарстан, в пределах которого потенциальные коллекторские зоны и продуктивные горизонты локализованы в широком стратиграфическом диапазоне образований от архейско-протерозойского до

верхних горизонтов палеозоя.

В глубоких горизонтах РТ широким развитием пользуются погребенные коры выветривания, которые локализованы на границе кристаллического фундамента и осадочного чехла. В коровых формациях комплекс наноминералов представлен новообразованными в процессе выветривания глинистыми минералами: каолинит, иллит, хлорит. В нижних горизонтах коры выветривания они характерны для зоны дезинтеграции. В верхних горизонтах образуют агрегаты, сложенные более окристаллизованными кристаллитами каолинита и выделениями иллита. Эти агрегаты в ассоциации с тонкодисперсными минералами формируют специфическую структуру пустотно-порового пространства (Рис. 1а, б) потенциальных коллекторских зон больших глубин, и которые могут быть отнесены к нетрадиционным типам коллекторов, изучению которых в последние годы отводится большая роль (Ситдикова, Сидорова, 2011; Sidorova, Sitdikova, 2013).

В отложениях рифейско-вендского комплекса потенциальные коллекторские горизонты связаны с толщами песчано-гравелитовых пород, прошедших стадию позднего диагенеза-катагенеза. Эти процессы привели к существенному преобразованию пород-коллекторов с появлением «пятнистого диагенеза», то есть комплекса диагенетических преобразований различной интенсивности в пределах одного определенного горизонта. Было установлено, что вследствие диагенетических и катагенетических преобразований тонкодисперсных фаз возникают специфические наноминеральные комплексы, представленные каолинитом, диккитом и иллитовыми комплексами со смешанослойными фазами типа иллит-сметтит (Рис. 2а,б).

В зонах интенсивных катагенетических преобразований происходят не только изменения наноминеральных фаз, но и развиваются интенсивные процессы регенерации обломочных зерен (Рис. 2б). При этом идут процессы, ведущие к существенному изменению пустотного пространства коллектора вплоть до его полного запечатывания за счет перераспределения минерального вещества, что приводит к возникновению сложных типов коллекторов – диагенетический тип коллектора (Перродон, 1991).

В более молодом комплексе продуктивных горизонтов РТ (девонский комплекс) развиты иные типы наноминеральных фаз. В коллекторах девонского комплекса наноминеральные фазы в большей степени представлены иллитом, каолинитом, а в отдельных участках пород смешанослойными фазами иллит-сметтит с аллотигенным каолинитом, развитие хлорита редуцировано. В структурном отношении наноминеральные фазы локализуются в

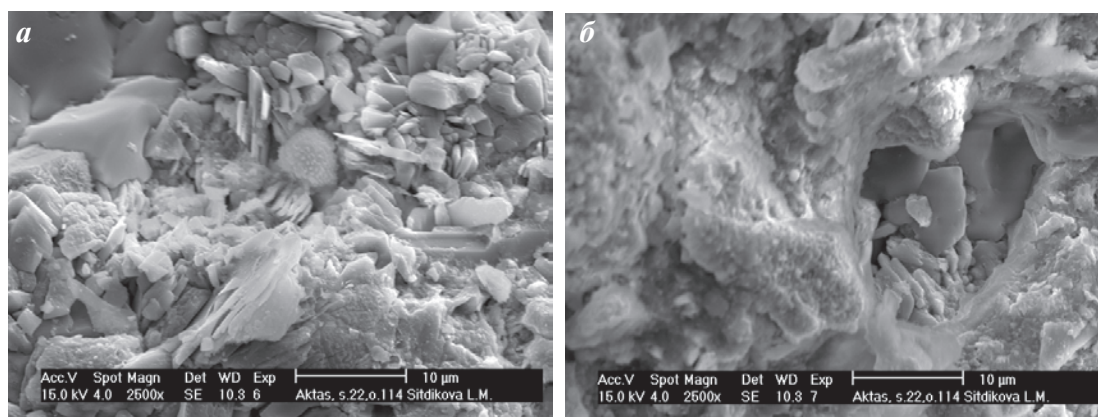


Рис. 1. Акташская площадь, скв. 22, обр. 114, гл. 1732,4-1738,34 м. а) Агрегаты пакетов каолинита и участками выделения иллита, ув. 2500х. б) Структура порового пространства, инкрустированного вторичным тонкодисперсным кварцем и каолинитом, ув. 2500х.

участках пережимов поровых каналов и в зависимости от минералогических типов наноминеральных фаз представлены пакетами каолинита, игольчатыми формами иллита (Рис. 3а, б).

Наноминеральные комплексы таких структурных форм обладают повышенными динамическими свойствами и могут переформировываться при изменении физико-химических условий пласта в процессе разработки. Такие формы локализации наноминеральных фаз в структуре коллектора делают их важным фактором регулирования фильтрационных параметров пласта.

В терригенном комплексе каменноугольных отложений – бобриковско-радаевские и тульские отложения, в отличие от девонского нефтеносного комплекса, происходит дифференциация наноминеральных комплексов с более четким обособлением каолинитовой, иллитовой и смешанослойной иллит-сметкитовой компонент, что связано с изменением фациальных условий при накоплении терригенных толщ. Это обуславливает большее влияние процессов привноса наноразмерных аллотигенных фаз при формировании пород коллекторов по отношению к аутигенным процессам.

Наличие таких дифференцированных фаз существенно повышает неоднородность фильтрационных характеристик коллектора и делает его более изменчивым, а, следовательно, и более сложным при процессах разработки, что приводит к необходимости переходить к дифферен-

цированным методикам воздействия на пласт в пределах одной залежи. В процессе использования различных методов увеличения нефтеотдачи пластов необходимо учитывать тип коллекторов, особенности литологического, минералогического состава пород, структуры пустотного пространства, а также процессы и наноявления, которые происходят в структуре нефтяного пласта и которые связаны с наноминеральным комплексом пород (Изотов, Ситдикова, 1993).

Наиболее важные наноявления в нефтегазовых пластах месторождений – это ионнообменные процессы между закачиваемыми водами, пластовыми водами и глинистыми минералами, а также явления смачивания. В результате ионнообменных процессов тонкодисперсные и глинистые минералы снижают проницаемость пластов, что приводит к падению производительности нагнетательных и добывающих скважин, при этом резко возрастает обводненность продукции. Смачивание приводит к тому, что итоговый капиллярный гистерезис направлен против движения нефти, и его необходимо учитывать для адекватного прогноза КИН. Так, использование нефтегазовых нанотехнологий, регулирующих свойства глинистого вещества цемента коллекторов, повышают производительность скважин в 1,3-1,8 раз (Хавкин и др., 1993; Хавкин, 2010).

Проведенные исследования показали, что нефтеносные пласты активно реагируют на методы увеличения нефтеотдачи (Муслимов, 2005). При этом реакция отдельных минеральных фаз нефтяного пласта на применяемые методы воздействия может быть очень различной. Изучение наноминеральных фаз и их динамики позволяет утверждать, что нефтяной пласт в естественных условиях представляет литолого-геохимическую систему, находящуюся в условиях термодинамического равновесия.

Разработка нефтяного пласта приводит к нарушению этого равновесия и переводу пласта в неравновесное состояние, что, в свою очередь, приводит как к изменениям химического состава, так и к изменениям кристаллохимических характеристик литолого-мине-

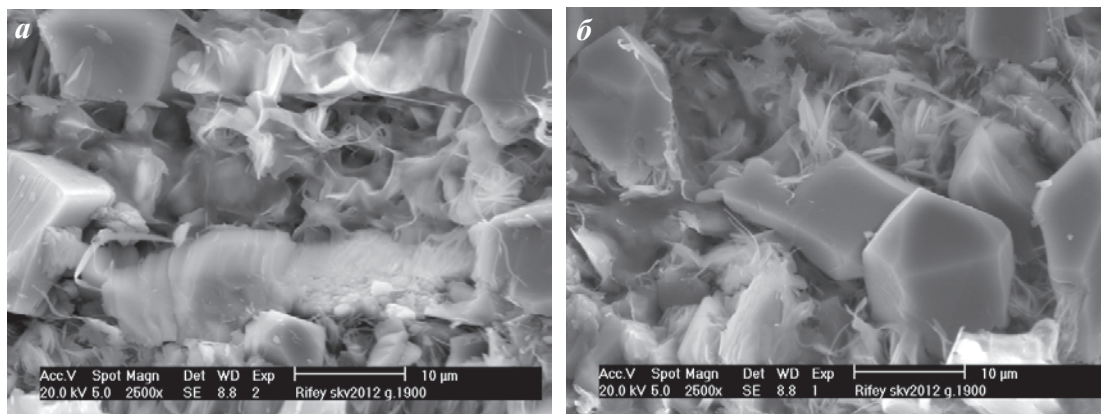


Рис. 2. Бавлинская площадь, скв. 2012, гл. 1900 м. а) Структура пустотно-порового пространства, выполненного хлоритом и войлочными образованиями иллита, ув. 2500х. б) Процесс регенерации кварца, хлорит, иллит, каолинит, ув. 2500х.

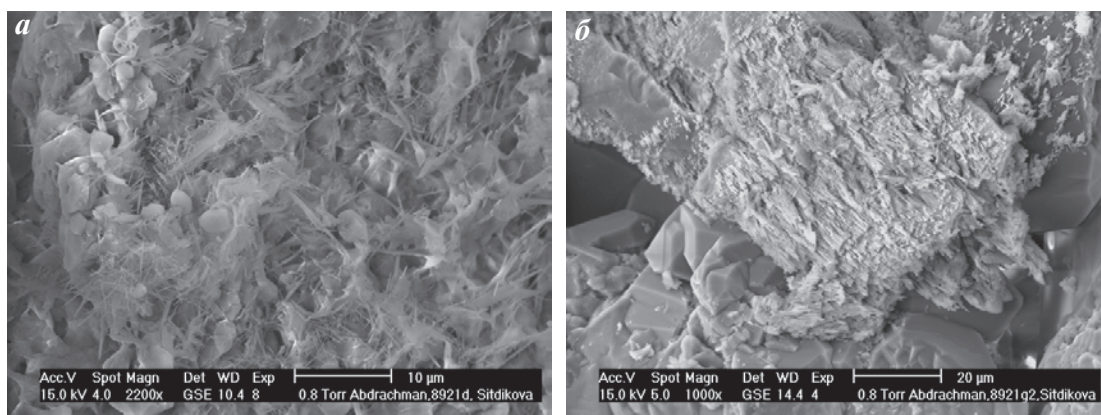


Рис. 3. Абдрахмановская площадь, скв. 8921. а) Войлочные выделения иллита с единичными пластинками каолинита, ув. 2200х. б) Скопления иллита в поровом пространстве, инкрустированного друзовидным кварцем, ув. 1000х.

ральных фаз продуктивного пласта. Это дает возможность ввести понятие «литолого-геохимическое равновесие» в системе «нефтяной флюид-коллектор» (Изотов, Ситдикова, 2007; Изотов, 2008).

С целью повышения КИН изучение наноминеральной составляющей продуктивных пластов необходимо дополнить исследованиями технологических приемов воздействия на эту составляющую в промысловых условиях для снижения итогового значения капиллярного гистерезиса (Хавкин, 2010). Учет особенностей движения наноразмерных объектов и проявления наноразмерных явлений в нефтегазовых пластах, качественно меняя технологические решения, привел к уверенности, что регулирование наноразмерных свойств нефтегазовых пластов позволит добиться высокоэффективного нефтегазоизвлечения и снижения ее себестоимости.

Современные программные комплексы должны позволить сравнить значения технологического КИН при применении нанотехнологий (технологий управления наноразмерными явлениями и минеральными нанофазами) на разных стадиях разработки месторождений: как для новых объектов, так и для поиска эффективных нанотехнологий разработки остаточных запасов нефти в обводненных зонах (разработка на поздней стадии).

Таким образом, изучение минеральных нанофаз существенно повышает эффективность разработки нефтяных месторождений особенно на поздней стадии и позволит адекватно оценить направления и эффективность вложения средств в создание новых методов увеличения нефтеотдачи.

Литература

- Байбаков Н.К. Эффективные методы повышения нефте- и конденсатоотдачи пластов. РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, *сер. Академические чтения*. Вып.12. М.: Нефть и газ. 1997. 35 с.
- Гусейнов Б.М. Роль инновационных процессов в повышении стоимости российских ВИНК. *Тез. докл. «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России»*. Часть II, секции 5-10. РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина. 2012. 135 с.
- Дияшев Р.Н. Тенденции применения МУН в мире. *Георесурсы*. № 4. 2008. С.42-46.
- Изотов В.Г., Ситдикова Л.М. Наноминеральные системы нефтяного пласта и их роль в процессе разработки. *Георесурсы*. №3. 2007. С.21-23.
- Изотов В.Г. Наноминеральные системы нефтяных пластов. *Мат. конф. «Наноявления при разработке месторождений углеводородного сырья: от наноминералогии и нанохимии к нанотехнологиям»*. М.: Нефть и газ. 2008. С.59-65.
- Изотов В.Г., Ситдикова Л.М. Влияние динамики структуры терригенных коллекторов на процессы нефтеотдачи. *Мат. конф. «Геология и разработка нефтяных месторождений»*. Альметьевск. 1993. С.104-106.
- Козловский Е.А. Экономический кризис, его истоки и минерально-сырьевой потенциал. *Мат. научно-практ. конф. «Минерально-сырьевая политика и национальная безопасность»*. М., ФГУП ГНЦ РФ ВНИИгеосистем. 2009. С.193-258.
- Концепция программы преодоления падения нефтеотдачи. Ю.А.Спиридонов, Р.А.Храмов, А.А.Боксерман, В.И.Грайфер, Н.К.Байбаков, А.Я. Хавкин и др. Госдума РФ. 2006. 144 с.
- Лаверов Н.П. Топливо-энергетические ресурсы. *Вестник РАН*. 2006. Т. 76. №5. С.398-408.
- Муслимов Р.Х. Современные методы повышения нефтеизвлечения: проектирование, оптимизация и оценка эффективности. Казань. АН РТ. 2005. 688 с.
- Муслимов Р.Х. Особенности разведки и разработки нефтяных месторождений в условиях рыночной экономики. Казань. АН РТ. 2009. 727 с.

Перродон А. Формирование и размещение месторождений нефти и газа. М.: Недра. 1991. 359 с.

Ситдикова Л.М., Сидорова Е.Ю. Минералого-петрографические особенности коровой формации фундамента Южно-Татарского свода. *Георесурсы*. №1 (37). 2011. С.13-15.

Хавкин А.Я., Ильинский В.М., Ратов А.Н., Куренков О.В. Комплексация методов исследования с целью выявления особенностей разработки низкопроницаемых коллекторов Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. *Тез. Всерос. геологической конф. «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Европейского северо-востока России»*. Сыктывкар. 1993. С.164-165.

Хавкин А.Я. Наноявления и нанотехнологии в добыче нефти и газа. М.: ИИКИ. 2010. 692 с.

Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. 2009. Электронный ресурс: <http://www.inreen.org>.

Sidorova Elena J., Sitdikova Lyalya M.. Transformation of clay minerals in collector zones of buried weathering crust. *Сб. мат. II между. конф. «Глины, глинистые минералы и слоистые материалы – Clays, clay minerals and layered materials – CMLM 2013»*. СПб.: Издатель «Фалкон Принт». 2013. 131 с.

A.Y. Havkin, V.G. Izotov, L.M. Sitdikova, E.U.Sidorova. **The role of mineral nanophases for efficient development of oil fields at the late stage.**

This paper analyzes the current state and problems of the oil and gas industry in the country, shows the role and effectiveness of nanotechnology methods application to increase oil recovery at the late stage of field development. The results of investigations of mineral nanophases of prospective reservoir zones and productive oil-bearing horizons of the Republic of Tatarstan are given.

Keywords: field, reservoir, formation, mineral, nanominerals, oil recovery, oil recovery factor, nanotechnologies, methods of enhanced oil recovery.

Александр Яковлевич Хавкин

Д.тех.н., заместитель генерального директора ОАО «ИГиРГИ», профессор РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, МГУ имени М.В.Ломоносова, УдГУ и КНИТУ, Почетный нефтяник РФ, академик РАЕН, лауреат медали ЮНЕСКО «За вклад в развитие нанонауки и нанотехнологий».

117312, РФ, г. Москва, ул. Вавилова, д. 25, корп. 1.
Тел: 8 (499) 124-61-55

Виктор Геннадьевич Изотов

К.геол.-мин.н., доцент кафедры региональной геологии и полезных ископаемых Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета. Научные интересы: оптическая и электронная микроскопия пород-коллекторов, минералогия, литология и фациальный анализ нефтеносных формаций.

Ляля Мирсалиховна Ситдикова

К.геол.-мин.н., доцент каф. региональной геологии и полезных ископаемых Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета.

Елена Юрьевна Сидорова

Аспирант Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета.

420008, Казань, ул. Кремлевская, д.18.
Тел.: (843)238-84-71.