

Развитие нефтегазовых нанотехнологий

А.Я. Хавкин, д.т.н.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, Россия

Ключевые слова: наноразмерные явления, технологии, извлечение углеводородов.

e-mail: aykhavkin@yandex.ru

DOI.10.37474/0365-8554/2020-11-37-41

Neft-qaz nanotexnologiyalarının inkişafı

A.Y. Xavkin, t.e.d.

I.M. Qubkin adına Rusiya Dövlət Neft və Qaz Universiteti (MTU), Rusiya

Açar sözlər: nanoölçülü hallar, texnologiyalar, karbohidrogenlərin çıxarılması.

Neft və qaz yataqlarında nanoölçülü hallara təsir texnologiyalarının işlənməsi və tədqiqi yer laylarından karbohidrogenlərin çıxarılma faizini əhəmiyyətli dərəcədə artırmağa imkan yaradır.

Neft-qaz sahəsinin gələcəyi məhz nanotexnologiyalara bağlıdır. Bu səbəbdən də, neft-qaz laylarında nanohallların adekvat şəkildə nəzərə alınması və onların idarə edilməsi məsələsi neft-qaz sahəsi üçün prinsipial olaraq vacib məsələdir.

Neft elminin qarşısında dayanan məsələləri fiziklər, kimyaçılar, riyaziyyatçılar, metalsünaslar, biologlar, bir sözlə bütün elmi cəmiyyətin yaradıcı qarşılıqlı əlaqəsi olmadan həll etmək mümkün deyil. Bu cür birlik neft-qaz sahəsi rəhbərlərinin konservativ düşüncəsini dəyişməlidir və bu sahədə artıq məlum və yeni nanotexnologiyaların istifadəsi və tətbiqini genişləndirməlidir.

Development of oil-gas nanotechnologies

A.Ya. Khavkin, Dr. in Tech. Sc.

Russian State University of Oil and Gas named after I.M. Gubkin (National Research University)

Keywords: nanosize phenomenon, technologies, hydrocarbon extraction.

The development and implementation of technologies of impact on nanosize phenomenon in oil-gas fields enables to significantly increase the percentage of extraction of hydrocarbons from the resources.

The future of oil-gas sphere is associated namely with the nanotechnologies. Therefore, the task of adequate consideration of nanophenomenon in oil-gas reservoirs and their control is essential in the oil-gas sphere.

The tasks in petroleum science cannot be performed without creative interaction of the scientists from physics, chemistry and mathematics, metal physicists, biologists, i.e. the whole science community. It should change conservative world view of the managers in oil-gas sphere, old scientific schools and saturate the field with already wellknown and innovative nanotechnologies.

Исследования наноразмерных явлений и частиц в нефтегазовых процессах, начатые в XX веке, в настоящее время вышли на новый уровень. В 2006 г. автор впервые обратил внимание на необходимость акцентированного внимания к наноразмерным явлениям в нефтегазодобыче, хотя изучением наноразмерных явлений и созданием технологий на их основе занимался многие годы, не уделяя внимания их наноразмеру [1]. Впоследствии автор опубликовал десятки статей и выступил с докладами на международных конгрессах о значимости нефтегазовых нанотехнологий, которые есть не что иное, как технологии управления наноразмерными явлениями [2–8]. В 2010 г. автор и группа нефтяников Азербайджана были удостоены медали ЮНЕСКО “За вклад в развитие наноауки и нанотехнологий” [9].

Отметим, что работы автора по нанотехнологиям были в основном посвящены роли наноявлений, но были и работы по наночастицам, а работы азербайджанских коллег в основном посвящены наночастицам с рядом работ по наноявлениям [10].

Уже с конца XX века в РАН отмечали роль наноминералогии в геологическом изучении недр [11]. Были публикации о том, что нанороботы будут патрулировать поры и каналы нефтяных и газовых пластов, следить за потоками углеводородов, обмениваться информацией, управлять друг другом и решать, как улучшить нефтеотдачу пласта: в каких зонах нужно увеличить отбор нефти, а в каких – увеличить объем закачиваемой воды или другого рабочего агента [12, 13].

Однако в основных работах по нанонауке не было ни указания на роль наноявлений в нефтегазодобыче [14, 15], ни тем более на реальные возможности использования нанотехнологий для повышения нефтеизвлечения. С другой стороны, имеются публикации, где к нанотехнологиям считают возможным отнести все технологии нефтегазового производства и любые технологии воздействия на нефтегазовые пласты, в связи с тем, что нефть по своей природе является наножидкостью, в которой определяющую роль играют асфальтены [16]. По мнению автора, так расширенно понимать термин "нефтегазовые нанотехнологии" нельзя, и к нефтегазовым нанотехнологиям следует отнести только технологии управления теми наноявлениями, которые определяют извлечение углеводородов из недр. Сегодня можно определить объект исследований нефтяной науки как физико-химические наноявления в геологических телах, пластовых флюидах и промысловом оборудовании, включая способы их учета при геолого-гидродинамических и технико-экономических расчетах разработки и эксплуатации нефтегазовых залежей.

Эффективность нефтеизвлечения характеризуется коэффициентом извлечения нефти (КИН) от находящегося в пласте её количества (запасов). В начале XX века нефть из пробуренных скважин добывали, в основном, самоизливом. КИН при таком способе составлял 0.1–0.2. В 1940-х гг. в России группа ученых во главе с академиком А.П. Крыловым обосновала метод закачки воды в пласт для вытеснения нефти. При такой технологии КИН достигает по отдельным месторождениям величин 0.4–0.5. К настоящему времени этим методом добывается 90 % нефти в России [17].

За последние десятилетия XX века структура запасов нефти России значительно ухудшилась, и к XXI веку 65 % оставшихся здесь запасов нефти относится к категории трудноизвлекаемых. В таких месторождениях значение КИН при заводнении составляет 0.1–0.3, а для достижения КИН=0.4–0.5 требуются сложные и дорогостоящие технологии, что ведет к увеличению себестоимости добычи и снижению доходности для недропользователя по сравнению с добычей западных компаний, выбирающих наиболее рентабельные участки.

Нежелание вкладывать средства в создание (а часто и в применение уже созданных) эффективных технологий привело к снижению

ожидаемого нефтеизвлечения из уже разведанных российских месторождений (рис. 1) [8, 18]. Как видно, к началу XXI века в России планировалось извлекать только 30 % разведанных запасов, на что, безусловно, повлияло ухудшение структуры запасов нефти.

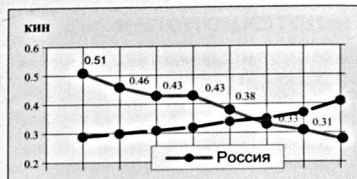


Рис. 1. Динамика проектного КИН в России и США

Развитые страны мира тратят огромные средства на фундаментальные исследования нефтегазодобычи, что дало возможность разработать высокорентабельные технологии (по сути нанотехнологии) для трудноизвлекаемых запасов нефти. Рост КИН в США до 0.4 связан именно с развитием современных технологий. Международное сообщество поставило на лондонском форуме в 2004 г. цель достижения в ближайшие годы значения КИН=0.5 [19]. За счет внедрения суперсовременных тепловых методов добычи высоковязких нефтей Канада вышла в 2003 г. на второе место в мире по доказанным извлекаемым запасам нефти, опередив Иран, Ирак, Кувейт, Венесуэлу, ОАЭ и Россию.

Россия не может сделать такой же рывок в доказанных извлекаемых запасах, воспользовавшись мировым опытом в области современных технологий для высоковязких нефтей, поскольку здесь другая структура запасов нефти (высоковязких нефтей и битумов – около 7%). России необходимо развивать технологии для уже обводненных месторождений и месторождений с низкопроницаемыми коллекторами (проницаемость меньше 0.05 мкм^2), доля запасов в которых превышает 50 %, а остаточные запасы нефти по каждой из этих категорий превышают десятки миллиардов тонн.

Серьезной научно-технической проблемой разрабатываемых нефтяных месторождений является высокая обводненность добывающих скважин. В последние годы в России простаивают десятки тысяч обводненных скважин. На многих крупнейших нефтяных месторождениях

доля воды в продукции составляет 90 %, а в целом по России превышает 83.5 %, т.е. в продукции добывающих скважин в 5 раз больше воды, чем нефти [8]. Получается, что при уровне добычи нефти в России более 500 млн. т, из скважин вместе с нефтью поднимается более 2.5 млрд. т воды. Снижение доли воды в продукции только на 10 % приведет к уменьшению отбора воды на 1.5 млрд. т.

Малый размер поровых каналов в низкопроницаемых пластах делает капиллярные силы настолько большими, что при традиционных технологиях достигается КИН не более 0.2.

Причиной возникновения перечисленных выше проблем являются зарядовые и ионообменные взаимодействия, создающие капиллярный гистерезис и изменяющие структуру глинистых минералов. Несмотря на опубликованные работы по влиянию капиллярного гистерезиса на долю воды в продукции и КИН, в государственных программах работ по нанотехнологиям уделяется мало внимания нефтегазодобыче [1–8].

Так, по традиционным представлениям закачка воды должна обязательно приводить к вытеснению нефти, хотя бы в малых количествах. Но капиллярный гистерезис может удерживать кластер нефти как угодно долго, и поэтому требуется закачивать воду по определенной системе. Без учета наноявлений был запланирован высокий КИН на Ромашкинском месторождении. Чтобы его достичь пришлось добурить кратное число скважин. В 2001 г. специалисты ОАО "Татнефть" опубликовали промышленные результаты по влиянию глинистости коллектора Кпл на КИН на примере гидродинамически изолированных практически идентичных участков Ромашкинского место-

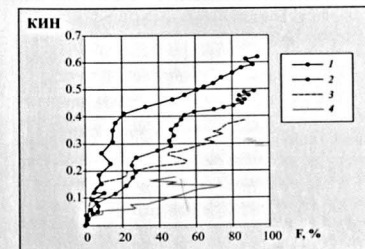


Рис. 2. Зависимость КИН от обводненности F по участкам Ромашкинского месторождения с разным Кпл: 1 – 2.4 %, 2 – 3.6 %, 3 – 4.2 %, 4 – 5.6 %

рождения [20]. Из рис. 2 видно, что увеличение количества глин в коллекторе всего на несколько процентов снижает КИН с 0.6 до 0.2.

Знание особенностей наноминералогии и поведения ультрадисперсных систем при многофазной фильтрации дает возможность определить механизмы воздействия на наноразмерные явления в нефтяных пластах и создать нанотехнологии повышения КИН. Был обоснован тип реагентов, позволяющих уменьшить негативное влияние глин, и проведены пробные промышленные испытания. Развитие этих работ позволит на участках с низким КИН увеличить его до 0.6, что в 2 раза выше проектного КИН (см. рис. 1).

В низкопроницаемых коллекторах КИН в значительной степени зависит от чистоты закачиваемой воды. Из рис. 3 видно, что дисперсные агрегаты размером более 100 нм в закачиваемой воде при проницаемости 0.1 мкм^2 позволяют обеспечить КИН на уровне 0.4, уменьшив КИН только на 10 % относительно потенциально возможного его значения (без частиц в закачиваемой воде). Однако при проницаемости 0.05 мкм^2 и размере дисперсных агрегатов более 100 нм значение КИН очень мало, и в этом случае извлечение нефти заводнением из низкопроницаемого коллектора невозможно (см. рис. 3). Достичь приемлемых КИН из низкопроницаемого коллектора можно только при очистке закачиваемой воды от содержащихся в ней частиц вплоть до 100 нм. Наночастицы сейчас используются в медицине и биологии, но их пропускная способность невелика. Для нефтегазовой промышленности требуются наночастицы большой пропускной способности. Создание таких фильтров обеспечит извлечение десятков миллиардов тонн нефти.

Регулирование наноявлений в нефтегазовых пластах обеспечило дополнительную добычу нефти и газа на конкретных объектах. Примере-

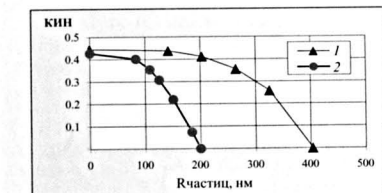


Рис. 3. Зависимость КИН от размеров дисперсных частиц в закачиваемой воде R частиц при проницаемости нефтяного коллектора 0.1 мкм^2 (1) и 0.05 мкм^2 (2)

нение термолитических технологий на одном из месторождений с высоковязкой нефтью в Удмуртии было начато в 1976 г., и дало в среднем за период до 2004 г. ежегодную дополнительную добычу нефти на небольшом месторождении 5 тыс. т. Обоснование тепловых методов широко развилось, благодаря многим российским ученым [8].

В условиях высокой минерализации пластовых вод эффективность закачки полимерных растворов для вытеснения нефти снижалась. Учет нановыведения ионов позволил в 1982 г. обосновать специальную технологию, что обеспечило 0.5 млн. т дополнительной добычи нефти в Татарстане. Технологический эффект составил на разных участках 400–1100 т (в среднем 590 т) на одну тонну закачанного в пласт полимера, что по мнению руководства ОАО “Татнефть” определило ее как одну из наиболее эффективных физико-химических технологий увеличения КИН. Применение этой технологии на других объектах осуществляли в наши дни, а расчеты по ее созданию заняли всего два месяца, что подтверждает высокую рентабельность инновационной деятельности в нефтегазовой сфере [3–8].

Внедрение на высокообводненных нефтяных месторождениях Пермской области (1990–1996), Татарстане (1996–1997), Удмуртии (2006–2007), на Уренгойском нефтегазоконденсатном месторождении (2004–2005), пенных барьеров для воды с регулированием наноразмерных поверхностных явлений дало дополнительную добычу более 80 млн. м³ газа и 0.5 млн. т нефти. За счет созданной технологии использования пен получено по 2 тыс. т нефти на каждую обработанную скважину. На газовых скважинах эффект по дополнительной добыче на скважину составил 16 млн. м³ газа (что примерно соответствует 16 тыс. т нефти) [3–8].

Массовое применение созданных нанотехнологий даст значительный прирост в добыче нефти и газа. Лабораторные эксперименты и теоретические расчеты с учетом нановыведения показывают, что дальнейшее развитие исследований и создание на их основе новых технологий приведет к увеличению КИН до фантастических на сегодня величин 0.60–0.65, а также значительно продлит срок обеспечения России запасами нефти, что необходимо учитывать в энергетической стратегии. Кроме

того, важнейшим направлением развития нанотехнологий становится необходимость освоения нанорезервуаров – нефтяных пластов баженовской свиты Сибири и газовых пластов с наноразмерными поровыми каналами. Так, в баженовской свите (главнейшей российской кладовой углеводородов) средний радиус пор 8–10 нм всего в несколько раз больше размеров углеводородных молекул.

Как видно, будущее нефтегазовой отрасли связано именно с нанотехнологиями. Поэтому задача адекватного учета нановыведения в нефтегазовых пластах и управления ими принципиально важна для нефтегазовой отрасли.

Только в России от прошедших опытно-промышленную апробацию нефтегазовых нанотехнологий А.Я. Хавкина суммарная возможная экономия электроэнергии может составить [6–8]:

- 1500 ТДж – при предупреждении образования отложений смол и парафинов в добывающей скважине (считая, что это будет при добыче жидкости всего 1 млрд. м³);

- 7500 ТДж – при закачке воды в пласт для вытеснения нефти (считая, что это будет при закачке жидкости всего 3 млрд. м³);

- 6500 ТДж – при снижении обводненности добываемой продукции (считая на весь объем поднимаемой жидкости 3.5 млрд. м³);

- 3000 ТДж – при снижении температуры нефтеподготовки при отделении от нее воды (считая, что на подготовку нефти будет направлено водонефтяной смеси 1 млрд. м³).

В итоге около 120 тыс. ТДж (более 25 трлн. кВт·ч), как отмечено в протоколе обсуждения в Общественной палате РФ, подписанном академиком РАН Е.П.Велиховым [8].

В нефтяной отрасли мира, от прошедших опытно-промышленную апробацию нефтегазовых нанотехнологий А.Я. Хавкина показатели экономии электроэнергии (вследствие структуры запасов и уже применяемых технологий) будут в 3–4 раза больше [6].

Стоящие перед нефтяной наукой задачи не решить без творческого взаимодействия физиков, химиков, математиков, металлургов, биологов, т.е. всего научного сообщества. Оно должно изменить консервативное мировоззрение руководителей нефтегазовой отрасли, старых научных школ и насытить отрасль уже известными и новыми нанотехнологиями.

Список литературы

1. Хавкин А.Я. Нанотехнологии нефтегазовых пластов. – М.: Спутник+, 2006, 16 с.
2. Хавкин А.Я. Регулирование нановыведения в нефтегазовых пластах – нанотехнологии повышения нефтегазоотдачи // Нановыведения при разработке месторождений углеводородного сырья: от наноминералогии и нанохимии к нанотехнологиям, материалы конференции, Москва, 18–19 ноября 2008 г., с. 45–55.
3. Хавкин А.Я. Нановыведения в нефтегазовых пластах // Вестник РАН, 2009, № 6, с. 519–522 (Khavkin A. Ya. Nanoscale Phenomena in Oil and Gas Extraction // Herald of the Russian Academy of Sciences, 2009, v. 79, No. 3, pp. 265–267).
4. Khavkin A. Ya. Nanotechnologies of Oil & Gas Recovery // IEA, EOR-2007. Offshore EOR, Technology and Economy, 04–07 September 2007, Vedbaek, Denmark, F2, 9 p.
5. Khavkin A. Ya. Prospects of Oil & Gas Nanoindustry // Nanomaterials Yearbook – 2009, From Nanostructures, Nanomaterials and Nanotechnologies to Nanoindustry, Nova Science Publishers, Inc., N.Y., 2010, pp. 125–143.
6. Хавкин А.Я. Нановыведения и нанотехнологии в добыче нефти и газа / под ред. член-корр. РАН Г.К. Сафаралиева. – М.: Издательство ИКИ, 2010, 692 с.
7. Хавкин А.Я. Нанотехнологии в добыче нефти и газа: уч. пособие. МГУ имени М.В. Ломоносова, УдГУ, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – М.: Нефть и газ, 2016, 358 с.
8. Хавкин А.Я. Основы нефтегазовых уч. пособие. МГУ имени М.В. Ломоносова, УдГУ, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – М.: Нефть и газ, 2017, 394 с.
9. Медаль ЮНЕСКО “За вклад в развитие нанонауки и нанотехнологий” // Наука и технологии в промышленности, 2011, № 4, с. 62–63.
10. Кусибаев К.Ш., Шахбазов Е. Разработки и внедрение нанотехнологий в нефтегазовую отрасль. – Баку, 2011, 109 с.
11. Rundkvist D.V. Доклад на годичном собрании OPTT RAN 23 марта 1998 г. // Интернет, http://geo.web.ru/db
12. Sakharov S. Sulfactants-Nanorobots in Enhanced Oil Recovery // Proceedings of Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2004), Bangkok, Thailand, 2004.
13. Brat S., Singh P. Use of Nanorobots in Oil Industry // SPE Mumbai Section, Maharashtra Institute of Technology, 2006.
14. Нанотехнологии в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований / под ред. М.К. Рокко, Р.С. Улиамсы, П. Аливатоса. – М.: Мир, 2002.
15. Сообщение в Госдуме РФ по нанотехнологиям // Наука и технологии в промышленности, 2004, № 3–4, с. 42–47.
16. Евдокимов И.Н., Лосев А.П. Нефтегазовые нанотехнологии для разработки и эксплуатации месторождений: уч. пособие РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2007.
17. 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, с. 184.
18. Лавров Н.П. Топливно-энергетические ресурсы // Вестник РАН, 2006, № 5, с. 26–30.
19. Fawcett J.-P. The Economics of EOR // Conference of Enhanced Oil Recovery (EOR), 6 December 2004, London, UK, http://www.thecwcgroup.com/.
20. Ахметов Н.З., Хусанов В.М., Салихов И.М. и др. Исследования влияния глинистости коллектора на нефтеотдачу // Нефтяное хозяйство, 2001, № 8, с. 12–17.

References

1. Khavkin A. Ya. Nanotechnologies of oil & gas reservoirs. – M.: Sputnik+, 2006, 16 p.
2. Khavkin A. Ya. Regulation of nanoleakage in oil & gas reservoirs – nanotechnologies for increasing oil & gas recovery // Nanoleakage in oil & gas reservoirs: from nanomineralogy and nanotechnology to nanotechnology, materials conference, Moscow, 18–19 November 2008, pp. 45–55.
3. Khavkin A. Ya. Nanoleakage in oil & gas reservoirs // Vestnik RAN, 2009, No. 6, p. 519–522 (Khavkin A. Ya. Nanoscale Phenomena in Oil and Gas Extraction // Herald of the Russian Academy of Sciences, 2009, v. 79, No. 3, pp. 265–267).
4. Khavkin A. Ya. Nanotechnologies of Oil & Gas Recovery // IEA, EOR-2007. Offshore EOR, Technology and Economy, 04–07 September 2007, Vedbaek, Denmark, F2, 9 p.
5. Khavkin A. Ya. Prospects of Oil & Gas Nanoindustry // Nanomaterials Yearbook – 2009, From Nanostructures, Nanomaterials and Nanotechnologies to Nanoindustry, Nova Science Publishers, Inc., N.Y., 2010, pp. 125–143.
6. Khavkin A. Ya. Nanoleakage and nanotechnologies in oil & gas recovery // Under the editorship of G. K. Safaraliev. – M.: Izdatel'stvo IIKI, 2010, 692 p.
7. Khavkin A. Ya. Nanotechnologies in oil & gas recovery: a textbook. MGU imeni M.V. Lomonosova, UduGU, RGU нефти и газа (NIU) imeni I.M. Gubkina. – M.: Neft' i gaz, 2016, 358 s.
8. Khavkin A. Ya. Osnovy neftegazovoy nauki: ucheb. posobie MGU imeni M.V. Lomonosova, UduGU, RGU нефти и газа (NIU) imeni I.M. Gubkina. – M.: Neft' i gaz, 2017, 394 s.
9. Medal' YUNESKO “Za vklad v razvitiye nanonauki i nanotekhnologii” // Nauka i tekhnologii v promyshlennosti, 2011, № 4, s. 62–63.
10. Yusifzade K. Sh., Shakhbuzov E. Razrabotka i vnedreniye nanotekhnologii v neftegazovuyu otzrasly. – Baku, 2011, 109 s.
11. Rundkvist D. V. Doklad na godichnom sobranii OGGN RAN 23 marta 1998 g. // Internet, http://geo.web.ru/db
12. Sakharov S. Sulfactants-Nanorobots in Enhanced Oil Recovery // Proceedings of Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2004), Bangkok, Thailand, 2004.
13. Brat S., Singh P. Use of Nanorobots in Oil Industry // SPE Mumbai Section, Maharashtra Institute of Technology, 2006.
14. Nanotekhnologii v blizhaysheye desyatiletiye. Prognoz napravleniya issledovaniy / pod red. M.K. Roko, R.S. Ulyamys, P. Alivatos. – M.: Mir, 2002.
15. Sovechaniye v Gosdume RF po nanotekhnologiyam // Nauka i tekhnologii v promyshlennosti, 2004, № 3–4, s. 42–47.
16. Yevdokimov I. N., Losev A. P. Neftegazovyye nanotekhnologii dlya razrabotki i ekspluatatsii mestorozhdeniy: ucheb. posobie RGU нефти и газа im. I. M. Gubkina, 2007.
17. Baybakov N. K. Effektivnyye metody povysheniya nefte- i kondensatootdachi plavstv // RGU нефти и газа im. I. M. Gubkina, ser. Akademicheskiye chteniya, vyp. 12. – M.: Neft' i gaz, 1997, s. 184.
18. Lavrov N. P. Toplivno-energeticheskiye resursy // Vestnik RAN, 2006, № 5, s. 26–30.
19. Fawcett J.-P. The Economics of EOR // Conference of Enhanced Oil Recovery (EOR), 6 December 2004, London, UK, http://www.thecwcgroup.com/.
20. Akhmetov N. Z., Khusanov V. M., Salikhov I. M. i dr. Issledovaniya vliyaniya glinistosti kolektora na nefteotdachu // Neftyanoe khozaystvo, 2001, № 8, s. 12–17.