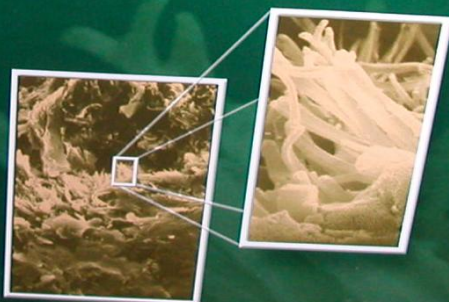


А. Я. Хавкин

**НАНОЯВЛЕНИЯ
И НАНОТЕХНОЛОГИИ
В ДОБЫЧЕ НЕФТИ И ГАЗА**



УДК 622.276

ББК 35.514

X 12

Хавкин А. Я.

Наноявления и нанотехнологии в добыче нефти и газа. — М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2010. — 692 с.

Обоснована определяющая значимость в добыче нефти и газа наноявлений в геологических телах, пластовых флюидах и промышленном оборудовании и технологий их регулирования (нанотехнологий). Описаны некоторые способы повышения нефтегазоизвлечения: регулирование ионного состава закачиваемых в нефтегазовый пласт агентов, воздействие на нефтегазовые пласты физическими полями и ряд других, основанных на регулировании равновесия в системе «нефть–газ–вода–порода». Приведены конкретные примеры промысловых испытаний нанотехнологий в добыче нефти и газа, повышающих энергоэффективность нефтегазовой отрасли.

Для студентов, магистрантов, аспирантов геологических, нефтяных и физико-химических специальностей ВУЗов и специалистов, занимающихся проблемами нефтегазодобычи.

Научный редактор

Г. К. Сафаралиев

Член-корреспондент РАН по Отделению нанотехнологий
и информационных технологий, д. ф.-м. н., профессор

Рецензенты:

А. А. Казаков

Генеральный директор

ООО «Центр компьютерных нефтяных технологий», д. т. н.

М. А. Плетнев

Директор Научно-образовательного центра «Нанотехнологии для ТЭК»

Ижевского государственного технического университета,

Директор АНО «Региональный центр nanoиндустрии

Удмуртской Республики», д. х. н., профессор

О. В. Чубанов

Заместитель начальника научно-производственного центра ОАО «РИТЭК»,

д. т. н., профессор, действительный член РАЕН

О. В. Япаскурт

Заведующий кафедрой Геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова,

Председатель Межведомственного литологического комитета

Отделения наук о Земле РАН, д. г.-м. н., профессор

На обложке фото Л. М. Ситдиковой (КГУ)
нанотрубчатых структур в порах нефтяного коллектора (рис. 3.1.12).

ISBN 978-5-93972-800-3

© А. Я. Хавкин, 2010

Оглавление

Посвящение.....	3
Summary.....	4
Эпиграф.....	5
Предисловие ПЦ «НТИС» ФС РФ.....	6
Предисловие Фонда Байбакова.....	8
Предисловие НОР.....	11
Предисловие автора.....	12
Нанотесты.....	32
Введение.....	36
Раздел 1. Наноявления и нанотехнологии.....	40
1.1. Развитие нанотехнологий.....	47
1.2. Формирование «нанонауки».....	48
1.3. Определения нанотехнологий.....	50
1.4. Наносистемы и нанотехнологии.....	53
Раздел 2. Проблемы рационального нефтеизвлечения.....	57
2.1. Эффективность работы нефтегазового комплекса.....	57
2.2. Геолого-промысловые проблемы добычи нефти.....	66
2.3. Влияние проницаемости на КИН.....	71
2.4. Классификация нанотехнологий в добыче нефти и газа.....	77
2.5. Нанотехнологические перспективы нефтедобычи.....	86
2.6. Нефтяные ориентиры Энергетической стратегии России.....	88
Раздел 3. Наноявления при геолого-геофизическом изучении пластовых систем.....	98
3.1. Наноминералогия.....	99
3.1.1. Особенности породообразующих минералов.....	99
3.1.2. Трансформация минералов как индикатор миграции углеводородов.....	101
3.1.3. Образование и миграция природных наночастиц.....	103
3.1.4. Наноразмерные особенности поверхности поровых каналов.....	105
3.1.5. Прикладная наноминералогия – основа высоких КИН.....	115
3.2. Генезис местоскоплений углеводородов.....	116

3.2.1. Электроактивные источники тектоносферы.....	118
3.2.2. Генерация углеводородов в фундаменте.....	118
3.2.3. Генерация углеводородов в карбонатах.....	120
3.2.4. Наномеханизм генерации углеводородов.....	121
3.3. Начальная нефтенасыщенность в газовых шапках.....	127
3.3.1. Наномеханизм генезиса начальной нефтенасыщенности в газовых шапках.....	127
3.3.2. Распределения начальной нефтенасыщенности в газовых шапках.....	130
3.4. Нанокolleктора.....	135
3.4.1. Нанокolleктор баженовской свиты.....	136
3.4.2. Уголь как нанокolleктор природного газа.....	139
3.4.3. Граниты – нанокolleкторы углеводородов.....	141
3.5. Изменения геофизических характеристик прискважинной зоны.....	143
3.6. Породообразующие минералы как твердые растворы.....	147
3.7. Влияние размера пор на свойства связанной воды.....	150

Раздел 4. Особенности ионного взаимодействия воды

с глинистыми минералами.....	154
4.1. Особенности заводнения глинодержащих коллекторов.....	154
4.2. Особенности вытеснения нефти водой из глинодержащих коллекторов.....	159
4.3. Особенности ионообмена в глинодержащих коллекторах.....	167
4.4. Коэффициент активной глинистости.....	170
4.5. Особенности применения физико-химических реагентов в глинодержащих коллекторах.....	172
4.6. Влияние минерализации на проницаемость пород.....	179
4.7. Влияние минерализации на пористость пород.....	181
4.8. Влияние активной глинистости на проницаемость пород-коллекторов.....	185
4.9. Влияние минерализации на производительность скважин.....	191

Раздел 5. Влияние капиллярного гистерезиса на

макродисперсность пластовых нефтяных систем.....	198
5.1. Закономерность вытеснения нефти в пористых средах.....	198
5.2. Капиллярный гистерезис в пористых средах.....	200
5.2.1. Основные формы гистерезиса смачивания.....	202
5.2.2. Методы исследования гистерезиса смачивания.....	204
5.2.3. Основные причины гистерезиса смачивания.....	205
5.2.4. Гистерезис смачивания в капиллярах.....	212

5.2.5. Влияние неоднородности порового пространства на гистерезис смачивания.....	218
5.2.6. Капиллярный гистерезис в нефтенасыщенных пористых средах.....	221
5.3. Физико-химические аспекты процессов вытеснения нефти в пористых средах.....	227
5.4. Модели многофазной фильтрации в пористой среде.....	235
5.5. Исследование макродисперсности пластовых систем на микромоделях пористых сред.....	253
5.6. Коэффициент гидродинамической дисперсности коллекторов.....	257
5.7. Влияние капиллярного гистерезиса на диспергирование вытесняемой фазы.....	258
Раздел 6. Значимость наноявлений в нефтегазовых пластах.....	260
6.1. Изменения упругоэластичности пласта.....	261
6.2. Особенности компонентообмена при вытеснении нефти.....	266
6.3. Влияние пористой среды на фазовые равновесия.....	268
6.4. Влияние углеводородных ассоциатов в нефти на характер закона фильтрации.....	270
6.5. Влияние зарядовых взаимодействий на фильтрацию в пористых средах.....	271
6.6. Влияние пластовых электрических зарядов на диспергирование нефти.....	279
6.7. Радиометрические исследования особенностей вытеснения нефти при набухании глин.....	284
6.8. Радиометрические исследования влияния макродисперсности пластовых систем.....	287
6.9. Особенности гидродинамических расчетов вытеснения нефти с учетом наноявлений в пористых средах.....	290
6.9.1. Математические модели процессов вытеснения нефти.....	290
6.9.2. Учет ионнообмена в глинодержащих коллекторах.....	295
6.9.3. Учет капиллярного гистерезиса в пористых средах.....	303
6.10. Критерии подобия фильтрационных процессов.....	313
6.11. Влияния геометрии области фильтрации на извлечение нефти.....	318
6.12. Влияние отношения вязкостей фаз на КИН.....	320
6.13. Наногидродинамика.....	323
6.14. Влияние капиллярного гистерезиса на выбор технологий увеличения КИН.....	327
6.15. Капиллярный гистерезис – гидродинамический параметр геологической нанонеоднородности пластов.....	330

Раздел 7. Влияние наноявлений на разработку нефтяных залежей...	333
7.1. Влияние плотности сетки скважин на КИН.....	333
7.1.1. Влияние ПСС на предельный КИН.....	335
7.1.2. Влияния ПСС и неньютоновских свойств нефти на КИН.....	338
7.1.3. Анализ Бавлинского эксперимента.....	339
7.1.4. Влияние ПСС на темп разработки.....	342
7.1.5. Влияние ПСС при разных параметрах пласта.....	344
7.1.6. Влияние разряжения сетки скважин на КИН.....	348
7.2. Эффективность доразработки нефтяных залежей.....	349
7.3. Влияние структуры порового пространства на КИН.....	350
7.4. Влияние наноразмерных частиц в закачиваемой воде на КИН.....	352
7.5. Особенности снижения дебитов по жидкости добывающих скважин.....	354
7.5.1. Геолого-промысловый анализ причин падения дебитов.....	357
7.5.2. Экспериментальный анализ причин падения дебитов.....	361
7.5.3. Расчетный анализ причин падения дебитов.....	364
7.6. Влияние глинистости коллектора на КИН.....	372
7.8. Влияние гидрофобизации призабойной зоны на КИН.....	376
7.9. Переформирование запасов остаточной нефти.....	379
Раздел 8. Нанотехнологии для добычи нефти и газа.....	384
8.1. Гидрофобная наножидкость для скважинных операций.....	387
8.2. Защита от микробиологического поражения цементного камня.....	391
8.3. Обработка цементных растворов магнитным полем.....	392
8.4. Нанобетоны.....	393
8.5. Разрушение бронирующих оболочек водонефтяной эмульсии.....	395
8.6. Регулирование образования АСПО в скважинах.....	397
8.7. Извлечение ценных элементов из продукции скважин.....	400
8.8. Утилизация низконапорного газа компримированием.....	403
8.9. Применение СВЧ для воздействия на призабойную зону.....	404
8.10. Получение синтетической нефти из горючих сланцев и битумов... ..	406
8.11. Приборы экстремальной электроники.....	408
Раздел 9. Нанотехнологии в добыче нефти.....	410
9.1. Регулирование ионообменной активности закачиваемой воды.....	410
9.1.1. Заводнение однородных и слоисто-неоднородных пластов..	410
9.1.2. Заводнение трещинно-поровых пластов.....	416
9.1.3. Влияние системы расстановки скважин.....	419
9.2. Учет ионнообмена при вытеснении нефти полимерными растворами.....	424
9.2.1. Особенности вытеснения нефти полимерными растворами..	425

9.2.2. Математическое моделирование влияния ионообмена на эффективность вытеснения нефти полимерными растворами.....	429
9.2.3. Лабораторное моделирование влияния ионообмена на эффективность вытеснения нефти полимерными растворами.....	437
9.2.4. Оптимизация технологии вытеснения нефти полимерными растворами с учетом ионообмена.....	440
9.3. Глиностабилизация.....	443
9.4. Глинодиспергация.....	447
9.5. Закачка низкоконцентрированных полимерных растворов.....	457
9.6. Магнитохимическое воздействие.....	460
9.7. Виброхимическое воздействие.....	470
9.8. Применение термостойчивых агентов.....	479
9.9. Применение краун-эфиров.....	481
9.10. Термополимерные технологии.....	483
9.11. Повышение теплоемкости пара.....	485
9.12. Применение пенных барьеров на нефтяных месторождениях.....	486
9.13. Применение наночастиц для теплового воздействия на пласт.....	493
9.14. Облучение полимеров для улучшения нефтевытесняющих свойств.....	495
9.15. Электровоздействие.....	501
9.16. Применение электромагнитных полей.....	501
9.17. «Умные наножидкости» в добыче нефти.....	507
Раздел 10. Нанотехнологии в добыче газа.....	510
10.1. Анализ уровней дисперсности пластовых систем «газ-вода-порода».....	510
10.2. Заводнение газоконденсатных залежей.....	524
10.3. Заводнение газовых залежей.....	534
10.4. Барьерное заводнение на нефтегазовых залежах.....	535
10.5. Применение пенных барьеров на газовых залежах.....	538
Раздел 11. Перспективы создания газогидратной отрасли ТЭК.....	542
11.1. Газогидраты – неисчерпаемые ресурсы углеводородов.....	542
11.2. Классификация месторождений газовых гидратов.....	546
11.3. Условия образования газогидратов.....	550
11.4. Газогидраты – наноструктурированные углеводороды.....	554
11.5. О роли метания в образовании газогидратов.....	558
11.6. Влагосодержание природных газов.....	561
11.7. Технологии предупреждения образования газогидратов.....	563

11.8. Регулирование гидратообразования на основе иона метония.....	565
11.9. Особенности разработки месторождений газогидратов.....	566
11.10. Транспорт газа в газогидратном состоянии.....	571
Раздел 12. Перспективы нефтегазовой наноиндустрии.....	575
12.1. Будущие нефтегазовые нанотехнологии.....	575
12.2. Применение наноструктурированных материалов в нефтегазовом комплексе.....	577
12.3. Нефтяная наука как наука о наноявлениях.....	582
12.4. Направления развития нефтегазовой наноиндустрии.....	585
Приложение. Влияние экономических критериев на применение нанотехнологий.....	591
Заключение.....	604
Основные результаты автора, полученные на основе учета наноявлений в добыче нефти и газа.....	609
Предложения по законодательным новациям для повышения КИН.....	613
Литература.....	615
Публикации автора.....	669
Из научных работ Д. Б. Хавкиной	685

I devote this book to two women:

*to mum,
oil geologist-geophysics
D. B. Khavkina,
in 1948 graduated the Moscow oil institute
(nowadays RSU of oil and gas) named after I. M. Gubkin, and
many tens years worked in «CSRIgeophysics»,
and
to my school teacher of the literature
T. L. Oshanina,
accustomed me carefully to give reason for the my statements.*

SUMMARY

Khavkin A. Ya. Nanophenomena and nanotechnologies in an oil-and-gas recovery // М., 2010, 692 p., aykhavkin@mtu-net.ru.

The leading factors of nanophenomena in geological formations, formation fluids and production equipment were established for oil and gas recovery, as well as technologies of their regulation (nanotechnologies). Some ways for increasing of oil-and-gas recovery are described: regulation of injected reagents ionic component in an oil-and-gas layer, influence on the oil-and-gas layers by physical fields resulting in change of balance in system «oil-gas-water-rock», and others nanotechnologies which use for increases efficiency of oil-and-gas reserves operation.

It is shown, that to oil-and-gas nanotechnologies concern Thermal-, Physical-, Biological-technologies. Gaseous-technologies and Chemical-technologies take an intermediate position between nanotechnologies and macrotechnologies depending on used reagents and the mechanism of their interaction with a system «oil-gas-water-rock».

It is shown, that efficiency of waterflooding is determined by chemical nanoprocesses of ion exchange, clay swelling, macrodispersion of oil due to the capillary hysteresis in «oil-gas-water-rock» system and movement of suspended nanoparticles.

The analysis of the nanomineral complexes geometry change in oil formation is carried out. Our studies reveal that the control of the above nanocomplexes can increase oil recovery of oil field due to change of the capillary hysteresis value.

Examples of some EOR-nanotechnologies efficiency estimation are given.

It is carried out the analysis of Russia oil branch prospects. It is shown, that application nanotechnological actions of enhance oil&gas recovery (NTEOGR) is necessary for effective perfection of Russia oil branch.

This book could be used by students, graduate students specialized in geological, oil and physical-and-chemical disciplines as well as by the experts engaged in problems of oil-and-gas recovery.

Предисловие НОР

Нанотехнологическое общество России (НОР) — Общероссийская общественная организация, была создана в октябре 2008 г. НОР объединяет более 1000 ученых и специалистов в области нанотехнологий в различных областях науки и техники. Главной целью НОР является развитие творческой активности ученых, эффективное использование кооперации интеллектуальных и производственных сил граждан и организаций для развития nanoиндустрии, содействие в реализации научных разработок в коммерчески эффективных промышленных проектах, а также активизации международных контактов и сотрудничества для комплексного развития нанотехнологий. В рамках Нанотехнологического общества России с ноября 2008 г. действует секция «Нанотехнологии для нефтегазового комплекса», организованная по инициативе автора настоящей монографии.

Нанотехнологии имеют уже достаточно широкий спектр приложений, хотя «нанотехнологический бум» отчасти возник благодаря многочисленным успехам физико-химии в создании технических средств и способов управления наноразмерными объектами.

Заслуга автора в том, что он своими работами доказал необходимость включения нефтегазовой сферы в круг значимых тенденций развития нанотехнологий. Представленная работа может быть рассмотрена как некий справочник (далеко не полный) по возможным направлениям приложения усилий представителей многих традиционных фундаментальных наук: физики, химии, математики, геологии.

Создание методической базы управления наноявлениями в нефтегазовой сфере (нанотехнологий) является одной из важных тем, поддерживаемых НОР, и основой промышленных технологий.

Президент НОР, академик РАН

Е. Н. Каблов

Введение

Нефть вошла в нашу жизнь настолько, что стоимость барреля нефти нам ежедневно сообщают вместе с прогнозом погоды. И это понятно — энергетика и нефтехимия давно стали основой благополучия многих государств и их граждан. Прогноз обеспеченности нефтью как энергоносителем и сырьем для нефтехимии predetermined политику и военную стратегию в ряде регионов мира. Поэтому обществу важны перспективы нефтедобычи.

К сожалению, не все понимают, что эти перспективы как раз зависят от того, насколько будут вкладываться средства в развитие фундаментальных исследований свойств нефтяных пластов и пластовых флюидов, в создание новых эффективных технологий и элементов нефтяного оборудования. И для того чтобы не тратить средства попусту, надо использовать то, что уже известно о вытеснении нефти из нефтяных пластов.

Об особенностях вытеснения нефти написано много книг, но общепринятого понимания роли фундаментальных исследований в этих процессах пока еще нет. Достаточно сказать, что основные уравнения процесса вытеснения нефти из нефтяных пластов традиционно основаны на представлениях механики сплошной среды, в которой так называемыми «пограничными явлениями» (которые и есть наноразмерные явления) пренебрегают [41, 187–189, 400, 760, 916]. Эти уравнения хорошо работают в трубной гидравлике, в большеразмерных фильтрах и ректификационных колоннах, в высокопроницаемых пластах. Что же касается низкопроницаемых нефтенасыщенных пористых сред, то в последние годы стало все более ясно, что высокого нефтewытеснения можно достичь, только уменьшив капиллярные силы, удерживающие нефть в порах нефтяного пласта. И тут нужны фундаментальные знания в области физико-химии и наноминералогии и умение использовать эти знания в расчетах нефтewытеснения.

Почему «нано» минералогии? Да потому что таковы характерные размеры структурных элементов поверхности пор. И здесь нет никакого безосновательного использования модного слова «нано». Учебники по физике нефтегазовых пластов были именно на уровне физики, хотя в них и говорилось о физико-химических проблемах вытеснения нефти, например о капиллярных силах [24, 120, 121, 322, 400]. Но расчетные схемы нефтewытеснения в них были на уровне механики сплошной среды [737], а не физико-химии.

В общем, о проблемах низкого нефтewытеснения говорилось (а вместе с этим и о недостаточной обеспеченности запасами нефти), но взаимосвязью наноразмерных эффектов с макроразмерными объемами добычи нефти пренебрегалось. А ведь ситуация аналогична классической математике, когда

учет малого параметра существеннейшим образом меняет не просто решение уравнения, а и принципиальные особенности этого решения.

В своих предыдущих работах автор показал взаимосвязь физико-химических наноразмерных эффектов смачивая (капиллярный гистерезис) и ионообмена с глинистыми минералами нефтяных пластов (изменение их объемной наноструктуры) с добычей нефти. В настоящей монографии эта взаимосвязь стала еще глубже — стало понятно, что в ее основе находится наноминералогия и наноструктура поверхности порового пространства.

На основе учета наноявлений автор разработал и применил (вместе со своими коллегами) ряд технологий регулирования наноявлений в нефтегазовых пластах, пластовых жидкостях и промышленном оборудовании, которые в современном понимании можно называть нанотехнологиями.

Кроме этого, в настоящей монографии приведены и работы ряда других авторов, активно работающих в области изучения роли наноявлений в нефтегазовых пластах, пластовых жидкостях и промышленном оборудовании и создающих новые наноматериалы и нанотехнологии.

Так чем же обоснован всеобщий современный интерес к нефти? Ответ на этот вопрос кроется в исследованиях макроэкономистов по технологическим основам экономических кризисов [386]. Оказывается, выдающийся российский экономист Н. Д. Кондратьев (1892–1938) предсказал экономические кризисы в связи с развитием технологий. Сначала возникает наука, связанная с новыми возможностями, — это период в 10–15 лет. Потом наступает стадия создания опытных образцов техники — еще 10–15 лет. Наконец, столько же длится и третий этап, — проникновение нового техноуклада в экономику. На рис. 1.0.4 показана динамика инноваций в различных технологических направлениях вдоль «циклов экономической активности Кондратьева» [386, 387].

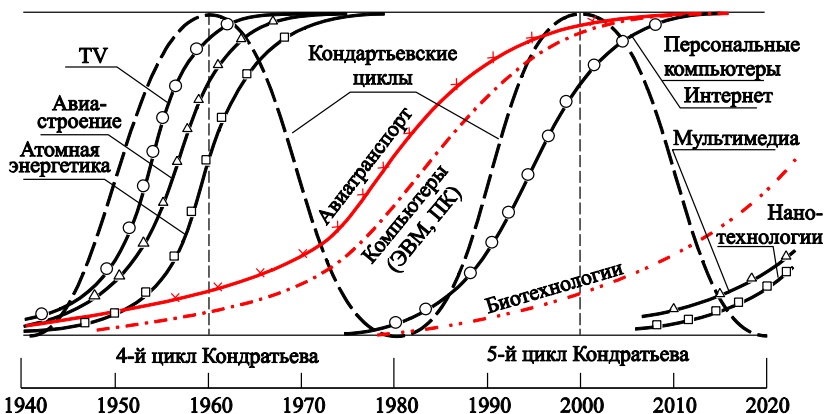


Рис. 1.0.4. Динамика инноваций в различных технологических направлениях вдоль циклов экономической активности Кондратьева

Как видно из рис. 1.0.4, 4-й цикл Кондратьева (IV-й технологический уклад) относится к 1940–1980 гг., когда технологический подъем экономики обеспечивался развитием тяжелого машиностроения и большой химии, массового производства автомобилей и самолетов. Во время 4-го цикла Кондратьева появились атомная промышленность и вычислительная техника.

5-й цикл Кондратьева (V-й технологический уклад) относится к 1980–2020 гг., когда технологический подъем экономики обеспечивается развитием персональных компьютеров и Интернета, массового гражданского авиатранспорта, биотехнологий, малотоннажной химии.

6-й цикл Кондратьева (VI-й технологический уклад) ожидается с 2020 г., и технологический подъем экономики будет обеспечиваться развитием роботехники, биотехнологий, нанотехнологий, управлением здоровьем человека за счет новой медицины, новым природопользованием [387].

Во всех этих циклах нефть (точнее, результаты ее переработки — топлива и новые материалы) имеет определяющее значение.

По данным Президента НОР, академика РАН Е. Н. Каблова, в США доля V-го технологического уклада составляет 60 %, IV-го — 20 % и около 5 % уже приходится на VI-й технологический уклад. В России же VI-й технологический уклад пока не формируется, а доля технологий V-го уклада составляет примерно 10 % (в военно-промышленном комплексе и в авиакосмической отрасли), IV-го — свыше 50 %, III-го — около 30 %.

Получается, что Россия практически пропустила начало V-го технологического уклада, и чтобы не стать технологически отсталой страной, России надо успеть войти в VI-й технологический уклад со своими технологиями, адекватными этому укладу, перешагнув через V-й технологический уклад. Альтернативы инновационному пути развития страны нет: две трети территории РФ — вечная мерзлота и суровые холода зимой. Из-за природно-климатических условий — весьма дорогая рабочая сила, каковую надо хорошо кормить, обогревать и тепло одевать, неизбежно дорогое жилье. Время «беспечной нефтяной цивилизации» заканчивается, добыча углеводородов без дополнительных усилий начнет падать. Однако это падение может не привести к росту цен на нефть вследствие развития альтернативной энергетики. В условиях глобализации (свободного потока идей, людей, капиталов, товаров и информации) Россия без адекватного вхождения в VI-й технологический уклад потеряет экономическую самодостаточность [386, 387].

Именно поэтому Президент РФ Д. А. Медведев предложил сосредоточиться на 5 главных направлениях инновационного развития экономики России: энергоэффективность и энергосбережение; ядерные, космические, медицинские и информационные технологии. Д. А. Медведевым отмечена необходимость увеличения извлекаемости природных ресурсов, в частности нефти, и необходимость административного и экономического стимулирования применения технологий повышения нефтеотдачи [317, 407, 408].

Наступление эры нанотехнологий в XXI веке так же неизбежно, как наступление эпохи двигателей внутреннего сгорания после века паровых машин [11, 291, 387]. Президент НОР, академик РАН Е. Н. Каблов считает, что в 2020–2025 гг. произойдет новая научно-техническая и технологическая революция, основой которой станут разработки, аккумулирующие базовые технологии VI-го технологического уклада. И, по мнению НОР (что закреплено в девизе НОР), создание основ VI-го технологического уклада является стратегической задачей страны.

Автор уверен, что нанотехнологии для нового природопользования — в первую очередь инновационные нанотехнологии в добыче нефти и газа, — позволят, в значительной степени, выполнить стоящие перед экономикой России задачи.

Настоящая монография основана на работах автора [974–1181], обобщении работ коллег [1–973] и содержит ряд новых научных результатов.

Основные результаты автора, полученные на основе учета наноявлений в добыче нефти и газа

Указанные ниже научно-технические результаты докладывались на международных конгрессах в Австралии, Бразилии, Венгрии, Дании, Испании, Китае, Норвегии, России, Франции, Японии, и многие из них были получены в те годы, когда нанотермины не были широко используемы, что не меняет характерные размеры (нанометры) учтенных физико-химических явлений.

Открытие «Закономерность вытеснения нефти в пористых средах», раскрывающее роль наноявлений смачивания в процессах вытеснения нефти (приоритет от 1989 г., диплом на открытие № 80, РАЕН).

Впервые сформулировано, что нефтяная наука, являющаяся частью наук о Земле и аккумулирующая такие научные дисциплины, как геология, математика, физика, химия, имеет свой специфический объект исследований — физико-химические наноявления в геологических телах, пластовых флюидах и промышленном оборудовании, охватывающий как сами наноявления, так и способы их учета при геолого-гидродинамических и технико-экономических расчетах разрабатки и эксплуатации нефтегазовых залежей (2008 г.).

Новые направления в науках о Земле:

— научные основы разработки залежей нефти с низкопроницаемыми и глиносодержащими коллекторами с учетом ионообмена в системе «нефть-вода-порода» и изменения структуры пористых сред (кандидатская диссертация — 1982 г., докторская диссертация — 1996 г., монографии — 2000 г. и 2005 г.).

— научные основы учета наноявлений смачивания, приводящие к макродисперсности нефти при ее вытеснении в пористых средах (публикации — с 1991 г., открытие № 80 «Закономерность вытеснения нефти в пористых средах», РАЕН — 1998 г., монографии — 2000 г., 2005 г., 2008 г.).

Впервые показано, что регулирование наноминеральных свойств поверхности пор позволяет увеличить КИН, что создает основы прикладной нефтегазовой наноминералогии (публикация 2009 г.).

Обоснованы:

- геологические и физико-химические (наноразмерные) особенности коллектора как основа технологий заводнения и всех технологических решений;

- принципиальная возможность поднять коэффициент извлечения нефти (КИН) до уровня 0,6–0,65 за счет широкомасштабного применения нанотехнологий в нефтегазовом секторе промышленности, что должно учитываться в Энергетической стратегии России;

- необходимость создания газогидратной отрасли ТЭК, что позволит хранить газ и торговать им в газогидратной форме, утилизировать попутный, низконапорный и выделившийся в угольные штреки газы, и тем самым обеспечить тысячи рабочих мест, диверсифицировать потоки товарного газа, защитить шахтеров, реализовать безтрубную газификацию России;

- определяющая роль нанопор в углях, как для извлечения метана, так и для предупреждения его выхода при шахтной выработке углей;
- наличие начального градиента для вытесняемой фазы (вследствие ее макродисперсности) при несмешивающемся вытеснении в пористых средах.
- гидродинамические модели с учетом влияния капиллярного гистерезиса и макродиспергирования нефти для расчетов процесса вытеснения нефти различными агентами, в том числе в системе скважин по принципу жестких трубок тока;
- гидродинамические модели расчетов процесса вытеснения нефти различными агентами с учетом ионообмена в системе «нефть–вода–порода» и изменения структуры глиносодержащих пористых сред;
- учет в гидродинамических моделях гидродинамически и физико-химически связанной воды;
- зависимость дисбаланса закачиваемой и поднимаемой из пласта воды от различия плотности воды в свободном и связанном состояниях;
- использование капиллярного гистерезиса как гидродинамического параметра геологической нанонеоднородности нефтегазовых пластов;
- влияние проницаемости коллекторов на фазовые проницаемости при вытеснении нефти водными растворами;
- влияние плотности сетки скважин на нефтеотдачу как следствие роли капиллярного гистерезиса в пористых средах;
- количественный гидродинамический критерий понятий ранняя и поздняя стадии разработки;
- критерии гидродинамического подобия фильтрационных процессов с учетом капиллярного гистерезиса;
- коэффициент активной глинистости;
- коэффициент гидродинамической дисперсности пористой среды;
- коэффициент вытеснения нефти при изменении пористости коллектора;
- зависимость нефтеотдачи от глинистости коллектора и минерализации закачиваемой воды;
- классификация технологий воздействия на нефтегазовые пласты;
- классификация нефтенасыщения в газовых шапках;
- классификация дисперсных систем в месторождениях природных газов;
- влияние структуры порового пространства и размеров дисперсных агрегатов на эффективность добычи нефти;
- критерии адекватного математического моделирования структуры реальных пористых сред;
- влияние типа пористой среды на ее фильтрационные характеристики;
- механизм языковых прорывов воды как следствие внутренней неоднородности нефтяных коллекторов;
- генезис нефтенасыщения газовой шапки нефтегазовых месторождений с позиций макродисперсности пластовых систем;

- критерий отнесения к низкопроницаемым пластам пластов со средней проницаемостью менее $0,05 \text{ мкм}^2$ на основе влияния взвешенных частиц;
- научные основы технологии повышения нефтеотдачи глиносодержащих пластов на основе регулирования минерализации закачиваемой воды в зависимости от особенностей геологического строения пласта-коллектора;
- научные основы технологии повышения нефтеотдачи с применением полимерных систем в условиях высокой минерализации пластовых вод;
- научные основы технологии повышения нефтеотдачи с применением низкоконтрированных полимерных систем в низкопроницаемых коллекторах;
- научные основы технологии применения наночастиц для теплового воздействия на пласт;
- колебания дебитов добывающих скважин вследствие перестройки макродисперсной системы «нефть–газ–вода–порода» в нефтяных пластах;
- особенности создания современных программных комплексов для мониторинга разработки нефтегазовых месторождений;
- создание газогидратной корки на стенках угольных шахт для предотвращения выделения метана в штреки при шахтной добыче угля;
- численный аналог критерия Куранта при расчетах обобщенного решения системы гиперболических дифференциальных уравнений в задачах вытеснения нефти раствором активной примеси (Госфонд алгоритмов и программ СССР, 1978 г.);
- алгоритм и программа для расчета процесса сегрегации нефти в нефтяных коллекторах с учетом капиллярного гистерезиса (Госфонд алгоритмов и программ СССР, 1978 г.);
- алгоритм и программа для расчета процесса вытеснения нефти в нефтесодержащих глинах (Госфонд алгоритмов и программ СССР, 1979 г.);
- необходимость углубленного изучения наноявлений в системе «нефть–газ–вода–порода» с целью повышения эффективности добычи нефти и газа;
- критерий рациональности варианта разработки месторождений по уровню реальной рентабельности;
- проблемность без существенного повышения КИН обеспечения плана по добыче нефти 530–535 млн т в 2030 г. в соответствии с Энергетической стратегией России на период до 2030 года.

Обоснованы (в соавторстве):

- модификации уравнений нефтегазовой многокомпонентной гидродинамики в пористых средах с учетом активной примеси;
- наличие обобщенного решения системы гиперболических дифференциальных уравнений, сочетающего волну разряжения и скачок;
- зависимости проницаемости глиносодержащих пористых сред от относительного изменения минерализации фильтрующейся воды и коэффициента активной глинистости;
- влияние минерализации пластовых вод на фазовые проницаемости и выбор оптимальной технологии полимерного воздействия на нефтяной пласт;

- наличие невplyвающих целикoв нефти вследствие проявления капиллярного гистерезиса при переформировании запасов остаточной нефти;
- научные основы разработки месторождения Тенгиз;
- научные основы технологии термoполимерного воздействия в нефтяных скважинах с трещинно-поровым коллектором;
- научные основы радиометрических исследований процессов вытеснения нефти в моделях нефтеводонасыщенных пористых сред;
- влияние иoнообмена между закачиваемой водой и глинистыми минералами на геофизические характеристики прискважинной зоны;
- особенности физико-химического механизма образования и разложения газогидратов и на этой основе предложенные технологии разработки газогидратных залежей и перевода газа в газогидратную форму;
- влияние пластовых электрических зарядов на динамику добычи нефти;
- возможность разделения водонефтяных эмульсий в пласте при разработке нефтяных месторождений и особенности образования «языков» воды при заводнении пластов со сложной микроструктурой коллектора;
- особенности гидрофобизации призабойной зоны скважин;
- гидрофобная наножиidкость для скважинных операций;
- технологии глиностабилизации; разглинизации призабойных зон с учетом размеров поровых каналов; применения стабилизированных наночастичками пенных систем в качестве барьеров в нефтяных и газовых месторождениях; энергосбережения при водонефтеподготовке; повышения энергоемкости паротеплового воздействия на пласт; нефтеизвлечения из ультранизкопроницаемых пород за счет их термического расширения (термоупругая фильтрация); применения СВЧ для воздействия на призабойную зону; очистки сточных вод путем изменения наноструктуры потока;
- усовершенствованные технологии заводнения, применения полимерных растворов, ПАВ, кислот, щелочей, термонеустойчивых агентов, краун-эфиров, реагентного снижения вязкости нефти, закачки теплоносителей; предупреждения и ликвидации отложений парафинов; предупреждения пескопроявления, применения магнитного поля для повышения приемистости скважин; обработки цементных растворов; разделения водонефтяных эмульсий; разработки нефтегазовых залежей; обработки скважинного оборудования и призабойной зоны с применением экзотермических жидких смесей; применения вибровоздействия, гидроразрыва пластов; утилизации низконапорного газа.

Даны рекомендации по разработке месторождений (в соавторстве): нефтяных Ромашкинское, Салымское (залежь баженoвской свиты), Самoтлoрское, Тенгиз, Бавлинское, Вoсточно-Еловое, Лиственское, Мишкинское, Москудинское, Новомолодежное, Оленье, Северо-Ижевское, Средне-Харьгаинское, Талинское, Хохряковское, Южное, Южно-Юрьяхинское, Белый Тигр (Вьетнам), Западный Аяд (Йемен), нефтегазового Вoсточно-Сусловское, газоконденсатного Уренгойское.