

НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ
ПОСОБИЕ

И.Н.ЕВДОКИМОВ

Нанотехнологии
управления
свойствами
природных
нефтегазовых
флюидов



РГУ нефти и газа
им. И.М.Губкина

*К 80-летию РГУ нефти и газа
имени И.М.Губкина*

И.Н. Евдокимов

**НАНОТЕХНОЛОГИИ
УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ
ПРИРОДНЫХ
НЕФТЕГАЗОВЫХ ФЛЮИДОВ**

Учебное пособие

Допущено Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по нефтегазовому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки магистров 130500 «Нефтегазовое дело», по представлению Ученого совета ГОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина»



МОСКВА - 2010

I.N. Evdokimov

**NANOTECHNOLOGIES
FOR CONTROLLING THE PROPERTIES
OF NATIVE PETROLEUM FLUIDS**

A Textbook



MOSCOW - 2010

УДК 622.276(075/8)
ББК 26.343.1:33.361я73
Е15

Рецензенты:

Директор Института нефтехимического синтеза РАН им. А.В. Топчиева,
академик РАН, профессор, д.х.н. *С.Н. Хаджиев*;
Зам. директора Института проблем нефти и газа РАН,
заслуженный деятель науки РФ, профессор, д.т.н. *В.М. Максимов*;
Заведующий кафедрой физики ГОУ ВПО «Ухтинский государственный
технический университет», профессор, д.ф.-м.н. *В.О. Некучаев*;
Директор НИПИ нефти и газа ГОУ ВПО «Ухтинский государственный
технический университет», профессор, д.т.н. *Н.В. Долгушин*

Евдокимов И.Н.

Нанотехнологии управления свойствами природных нефтегазовых флюидов: Учебное пособие. — М: МАКС Пресс, 2010. — 364 с.
ISBN 978-5317-03462-7

С современных позиций отечественной и зарубежной нефтепромысловой науки и практики изложены основные принципы «нанотехнологий природных нефтегазовых флюидов» как методов управления свойствами нативных наноразмерных структур, прежде всего, ассоциативных нанокolloидов асфальтенов. Показано, что возникновение «нефтегазовых нанотехнологий» становится возможным благодаря выявлению закономерного характера структурных фазовых превращений нанокolloидов асфальтенов в природных средах и обнаружению значительного влияния этих превращений на эксплуатационно важные макроскопические свойства сырых нефтей. Приведен обзор некоторых проблем, наблюдаемых в практике нефтегазового производства, а именно, осложнений при осуществлении технологических операций, предусматривающих термообработку нефтей, и смешение природных нефтей различного происхождения. Рассмотрены конкретные примеры «нефтегазовых нанотехнологий» термообработки и смешивания, которые могут быть использованы для предотвращения осложнений в процессах добычи, транспорта и хранения нефтей.

Книга предназначена для студентов старших курсов, магистрантов и аспирантов вузов нефтегазового профиля, а также может оказаться полезной для научных сотрудников и специалистов нефтегазовой отрасли.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	9
ЧАСТЬ 1. РАЗЛИЧНЫЕ ВИДЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ – ПРИНУДИТЕЛЬНАЯ СБОРКА АТОМНЫХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ СТРУКТУР И САМОСБОРКА НАНООБЪЕКТОВ	16
Глава 1.1 Что такое «нанотехнологии» и «нанообъекты»?	17
<i>1.1.1</i> Возникновение и распространение механистических представлений о нанотехнологиях	19
<i>1.1.2</i> Существующие классификации нанообъектов и наноматериалов	25
Глава 1.2 Современное «производственное оборудование» нанотехнологий механосинтеза	28
Глава 1.3 «Две субкультуры» в разработке и внедрении нанотехнологий	44
<i>1.3.1</i> Субкультура «принудительной сборки» (механосинтеза)	44
<i>1.3.2</i> Субкультура «самосборки» (супрамолекулярного химического синтеза)	46
Глава 1.4 Некоторые сведения о супрамолекулярной химии	52
<i>1.4.1</i> Столетняя история супрамолекулярных нанотехнологий	53
<i>1.4.2</i> О самосборке, самоассоциации и самоорганизации	58
<i>1.4.3</i> О нековалентных взаимодействиях	62
<i>1.4.4</i> Нековалентные взаимодействия в ассоциативных нанокolloидах природных нефтей	67
Глава 1.5 Закономерные фазовые преобразования структуры в модельных ассоциативных нанокolloидах	70
<i>1.5.1</i> Модель «сферических мицелл». Уникальная «критическая концентрация мицеллообразования»	71
<i>1.5.2</i> Многообразие структурно различающихся нанофаз в макромолекулярных ассоциативных коллоидах блок-сополимеров	75
ЧАСТЬ 2. ПРИРОДНЫЕ НАНООБЪЕКТЫ В НЕФТЕГАЗОВЫХ СРЕДАХ	79
Глава 2.1 Нанюуглерод	80
<i>2.1.1</i> Фуллерены	80
<i>2.1.2</i> Нанотрубки	85
<i>2.1.3</i> Графены	88
<i>2.1.4</i> Дiamoндоиды	90
<i>2.1.5</i> Наноалмазы	93
Глава 2.2 Ассоциативные нанокolloиды	95
<i>2.2.1</i> Самоассоциация фуллеренов, нанотрубок, графенов.	95
<i>2.2.2</i> Нафтенoвые кислоты и нафтенаты	98
<i>2.2.3</i> Асфальтены и смолы	106
<i>2.2.4</i> Гуминовые вещества	112

Глава 2.3 Кристаллизующиеся нанокolloиды	117
2.3.1 Парафины	119
2.3.2 Гидраты	124
2.3.3 Неорганические вещества	131
Глава 2.4 Нанокolloиды механических примесей	136
Глава 2.5 Природная нанодисперсность жидких сред	146
ЧАСТЬ 3. ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА НАНОКОЛЛОИДОВ АСФАЛЬТЕНОВ КАК ОСНОВА НАНОТЕХНОЛОГИЙ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ПРИРОДНЫХ НЕФТЕГАЗОВЫХ СРЕД	150
Глава 3.1 Дополнительные сведения об асфальтенах природных нефтей	153
3.1.1 Что такое асфальтены?	153
3.1.2 Твердые или жидкие?	155
3.1.3 Как асфальтены отличают от смол?	156
3.1.4 Элементный состав асфальтенов	157
3.1.5 Какими могут быть молекулы асфальтенов и какими они определено НЕ являются	158
3.1.6 Две идеологии исследования асфальтенов	164
3.1.7 Когда асфальтены вызывают осложнения?	165
3.1.8 Как исследуют стабильность асфальтенов ?	167
Глава 3.2 О важности фазовых диаграмм состояния углеводородных флюидов для нефтегазового производства	168
Глава 3.3 Лабораторные данные об осуществлении множественных фазовых превращений в асфальтенах нефти	182
3.3.1 Первичное агрегирование мономеров асфальтенов (олигомеризация)	182
3.3.2 Фазовое выделение нанокolloидов асфальтенов (осаждение)	185
3.3.3 Другие концентрационно - определяемые фазовые превращения в нанокolloидах асфальтенов	187
3.3.4 Фазовые превращения в нанокolloидах асфальтенов, определяемые особыми температурами	189
3.3.5 Фазовые превращения в нанокolloидах асфальтенов, определяемые давлением	191
3.3.6 Т-С фазовая диаграмма нефтяных асфальтенов (первичная версия)	193
Глава 3.4 Связь свойств природных нефтей со структурными фазовыми преобразованиями коллоидов асфальтенов.	202
3.4.1 Чаще других встречаются нефти с содержанием асфальтенов вблизи концентрационных фазовых границ	202
3.4.2 Плотность добываемых нефтей мира не является монотонной и однозначной функцией содержания асфальтенов. При достижении фазовых границ происходит аномальное возрастание плотности	203

3.4.3	<i>Вязкость добываемых нефтей мира не является монотонной и однозначной функцией содержания асфальтенов. При достижении фазовых границ происходит аномальное возрастание вязкости</i>	209
ЧАСТЬ 4.	ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ АСФАЛЬТЕНОВ ПРИ СМЕШЕНИИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ НЕФТЕЙ И «НАНОТЕХНОЛОГИИ» ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЭТИХ ПРОБЛЕМ	212
Глава 4.1	Осознание наличия специфических проблем «несовместимости» при смешении нефтей, битумов, нефтепродуктов и наличия нежелательных последствий термообработки этих флюидов	213
4.1.1	<i>Проблемы технологий смешения</i>	213
4.1.2	<i>Проблемы технологий термообработки</i>	219
Глава 4.2	Существующие тесты на «несовместимость» нефтей при смешении. Эмпирические критерии потенциальной «несовместимости», обусловленной выпадением в осадок коллоидов асфальтенов	221
4.2.1.	<i>Наиболее распространенные критерии «несовместимости»</i>	221
4.2.2.	<i>Очевидная несостоятельность многих традиционных критериев «несовместимости». Необходимость выработки новых «нанокритериев»</i>	232
Глава 4.3	Практически наблюдаемые проблемы в технологиях смешения природных нефтей	235
4.3.1.	<i>Влияние состава смеси</i>	235
4.3.2	<i>Влияние температуры смеси</i>	248
Глава 4.4	Практически наблюдаемые преобразования коллоидов асфальтенов в смесях природная нефть – «хороший» растворитель	251
4.4.1	<i>Эффекты состава смеси</i>	252
4.4.2	<i>Эффекты температуры</i>	255
4.4.3	<i>Эффекты времени растворения</i>	256
Глава 4.5	Практически наблюдаемые проявления «несовместимости» в смесях природная нефть – парафиновый растворитель	258
4.5.1	<i>Катастрофические проявления «несовместимости» в гетерогенных смесях</i>	258
4.5.2	<i>Исследования гомогенных смесей при атмосферном давлении</i>	262
4.5.3	<i>Исследования фазовых преобразований в смесях при реальных пластовых условиях</i>	269
4.5.4	<i>Практический опыт применения растворителей для разработки месторождений битумов Канады</i>	272

Глава 4.6 Нежелательные последствия термической обработки природных нефтей и нефтепродуктов	278
4.6.1 Ухудшение реологических параметров нефти после термообработки	278
4.6.2 Увеличение температуры застывания природных нефтей после термообработки	282
4.6.3 Увеличение органических отложений (АСПО) из нефтяных флюидов после термообработки	285
4.6.4 Аномалии режима разогрева при термообработке нефтебитумного пласта	287
4.6.5 Ухудшение реологических параметров водонефтяных эмульсий после термообработки	288
4.6.6 Влияние давления на термически-индуцированные эффекты	290
Глава 4.7 В чем могут состоять нанотехнологии смешивания (компаундирования) и нанотехнологии термического воздействия в процессах добычи, транспорта и хранения нефтей.	293
4.7.1 Преобразования нанофаз при термическом воздействии на нефть. Нанотехнологии термического воздействия в процессах разработки, транспорта и хранения нефтей.	294
4.7.2 Преобразования нанофаз при смешивании (компаундировании) нефтей. Нанотехнологии смешивания.	301
4.7.3 Термодинамический и кинетический контроль преобразования нанофаз нефти.	308
ЛИТЕРАТУРА	319

ПРЕДИСЛОВИЕ

Практическое внедрение разнообразных «нанотехнологий» с самого начала вызывало скептическое отношение многих инженеров – практиков, высказывавших пессимистические мнения о возможности использования «нанотехнологий» в сферах массового промышленного производства. В зарубежных публикациях этот скептицизм часто проявляли путем использования такого лингвистического приема, как оксюморон (англ. – oxymoron, от греческого – οξύμωρον, «острая глупость»), состоящего в намеренном сочетании принципиально противоречивых, взаимоисключающих понятий (Шор, 1934; Яценко, 1999). Оксюморонами (проще говоря, чепухой) считали концепции «нанотехнологий коммерческого производства» (Jamison, 2005), «нанотехнологий текстильной промышленности» (Ulrich, 2006), «нанотехнологий потребительских товаров» и «нанотехнологий нефтепереработки» (Schwartz, 2006).

Несмотря на начальный скептицизм, применения «нанотехнологий» в зарубежной нефтегазовой промышленности становятся все более известными, особенно в отраслях производства различных нефтепродуктов. Например, в США уже широко используют наноструктурированные цеолиты, позволяющие получать до 40% больше бензина, чем с помощью традиционных катализаторов (Ratner and Ratner, 2002; Crane et al., 2002; Schwartz, 2006). Известно применение нанотехнологий для создания новых материалов с улучшенными свойствами (Jackson, 2005; Mokhatab et al., 2006). Управление структурой материалов на наноуровне позволяет производить более легкое и прочное нефтегазовое оборудование, устойчивое к воздействию агрессивных сред. Нанотехнологии помогают в создании новых систем контроля, использующих миниатюрные датчики, что обеспечивает получение более качественной информации о продуктивном пласте (Mokhatab et al., 2006).

Другие перспективные приложения нанотехнологий в нефтяной промышленности за рубежом связаны с разработкой новых типов технологических «умных жидкостей» для повышения нефтеотдачи, бурения и т. п. (Chaudhury, 2003; Wasan and Nikolov, 2003; Zitha, 2005; Mokhatab et al., 2006). Среди таких жидкостей – новые

наносоставы поверхностно-активных веществ и полимеров, микроэмульсий, коллоидных дисперсий - гелей, бижидкостных пен («афронов»). Примеры последних лет связаны с использованием так называемых «наножидкостей», которые готовят путем введения небольших количеств наноразмерных твердых частиц в технологические жидкости для улучшения их эксплуатационных характеристик. Некоторые недавно разработанные наножидкости отлично проявили себя в таких приложениях, как снижение вязкого трения, крепление слабосцементированных песков, получение устойчивых гелей, контролируемое изменения характера смачиваемости пород, создание антикоррозионных покрытий и в ряде других (Chaudhury, 2003; Wasan and Nikolov, 2003).

Хотя ведущие зарубежные нефтегазовые компании уже на протяжении длительного времени осуществляют активные исследования в сфере «нанотехнологий», Россия пока что делает только первые шаги в данном направлении. Для многих российских специалистов словосочетание «нанотехнологии в нефтегазовой промышленности» до сих пор – оксюморон (Сюняев и Сафиева, 2009). Сегодня российский нефтегазовый комплекс и отечественная отраслевая наука все еще достаточно изолированы друг от друга. В результате нефтяные компании зачастую продолжают пользоваться «дедовскими» методами, которые, конечно, проверены годами, но не являются на данный момент эффективными, а уж тем более ресурсосберегающими и экологически чистыми (Андрианов, 2007).

Возможна ли «нанореволюция» в отечественной нефтегазодобыче? Ответ на этот вопрос искали участники первого международного форума по нанотехнологиям RUSNANOTECH-08, прошедшего в Москве 3-5 декабря 2008 года. В рамках форума состоялась специальная панельная дискуссия «Нанотехнологии в нефтяной промышленности». В целом дискуссия, в которой участвовали представители компаний "ЛУКОЙЛ", "Роснефть", "Татнефть", ТНК-ВР, «Газпром-нефть НТЦ», Shell, Saudi Aramco, Schlumberger и другие, выявила, что на сегодняшнем этапе в России существует лишь самое общее представление о возможностях использования нанотехнологий в нефтегазовой сфере. Предполагается, что они могут найти применение в создании новых, более устойчивых к коррозии материалов для трубопроводов, в

технологиях для поддержания пластового давления, возможно - в нефтегазовом приборостроении.

Несмотря на то, что компания "ЛУКойл" уже открывает специализированный центр по нанотехнологиям в нефтяной промышленности, проведенная дискуссия еще раз показала, что пока не достигнуто точное понимание того, что мы считаем нанотехнологиями.

С развитием разнообразных промышленных нанотехнологий связывают большие надежды, но, как часто бывает в России, одновременно наблюдается и волна разного рода спекуляций. Так, уже в декабре 2007 года, на заседании правительственного совета по нанотехнологиям вице-премьер Сергей Иванов вынужден был отреагировать на шумиху, возникшую вокруг нанотехнологий в некоторых областях производства: «Я сильно сомневаюсь, что там вообще есть какие-нибудь нанотехнологии. Вот хочу просто граждан об этом предупредить. Их уже пытаются дурить...» (Третьяков и Гудилин, 2009).

К сожалению, нано-спекулятивная шумиха не миновала и нефтегазовую промышленность. На ведущие роли в развитии и распространении «нанотехнологий нефтедобычи» претендуют многочисленные, растущие как грибы «нано-общества», «нано-центры», «нано-фонды», самопровозглашенные «нано-эксперты». Спекулятивность же предлагаемых рецептов зачастую не очевидна для нефтяников-практиков. Так, некоторые «нано-эксперты» обсуждают значимость в добыче нефти и газа «наноявлений», имеющих место в геологических телах, пластовых флюидах и промысловом оборудовании, и предлагают технологии регулирования этих явлений («нанотехнологии»). При этом к «наноявлениям» они относят практически любые процессы, связанные с перемещением молекул/ионов в нефтегазовых средах, аргументируя это тем, что характерные размеры молекул/ионов не превышают 1 нм. После такого спекулятивного расширения понятия, в качестве «новейших нанотехнологий» они пропагандируют, например, давно разработанные методы повышения нефтеотдачи с применением поверхностно-активных веществ.

Наиболее тревожная ситуация сложилась, по-видимому, с представлениями специалистов-нефтяников о «нефтяных

нанотехнологиях», объектом которых являются не конструкционные материалы, пластовые породы или технологические жидкости, а *сами природные нефтегазовые флюиды*. Даже в некоторых нефтегазовых университетах России популяризируют представления, весьма далекие от реальности. Так, в газетном интервью (Хабиуллина, 2008) один из заведующих кафедрой высказывает следующее мнение о перспективах использования нанотехнологий:

«... нефть залегает в микроскопическом поровом пространстве коллектора, а “нано” - это что? Это то же самое - 10 в минус девятой степени! И вот представьте, что очень маленький робот запускается в нефтяной пласт и полностью по нему проходит. В итоге мы получаем более реалистичное представление о строении залежи или процессах, в ней протекающих. А может быть, тысячи роботов пройдут по пласту, и по их данным мы нарисуем карту остаточных запасов... Конечно, сегодня это звучит как фантастика, но допустить идею можно, ведь запускают же роботов в кровеносную систему людей. Поэтому нанотехнологии имеют огромные перспективы...».

Предлагаемая читателю книга является попыткой автора изложить основные принципы «нанотехнологий природных нефтегазовых флюидов» с современных позиций отечественной и зарубежной нефтепромышленной науки и практики.

Как будет показано в Части 1, весьма сомнительная идея использования неких микроскопических механических устройств в нефтегазовых пластах проистекает, по-видимому, из избыточной популяризации упрощенных трактовок только одного направления нанотехнологий – методов механосинтеза. Эти методы основаны на силовой манипуляции молекулами с использованием специальных устройств, некоторые из которых можно назвать нанороботами (Drexler, 1986). В обозримом будущем трудно ожидать сколь-нибудь активного использования подобных нанотехнологий в нефтегазовой промышленности.

Реальные же перспективы практического внедрения очевидно связаны с другим направлением нанотехнологий, называемом «супрамолекулярной химией» (Atwood and Steed, 2004), где фундаментальная концепция – самоорганизация молекулярных

систем без внешнего силового управления. При использовании механизмов самоорганизации, для получения желаемых объектов используют предварительно выявленные сведения о фазовых диаграммах самоорганизующихся молекулярных систем. Эти диаграммы показывают, как желаемая структура наночастиц может быть реализована даже при слабом воздействии на макроскопические параметры системы, например, при незначительном изменении температуры, давления или концентрации одного их компонентов.

Типичными объектами данного направления нанотехнологий являются так называемые ассоциативные коллоиды. Отличие от обычных инертных «коллоидных суспензий» - систем со стабильными размерами твердых частиц дисперсной фазы, состоит в том, что в «ассоциативных коллоидах» частицы закономерно эволюционирующей дисперсной фазы могут претерпевать ряд обратимых структурных преобразований (Фролов, 1989; Волков, 2001; Everett and Koopal, 2001). Ассоциативные коллоиды, как правило, демонстрируют очень сложное фазовое поведение, формируя фазы от дисперсий простейших наночастиц до дисперсий крайне сложных супрамолекулярных наноструктур (Mittal and Lindman, 1984).

В Части 2 рассмотрены присутствующие в углеводородном сырье природные наноразмерные структуры, которые могут быть объектами «нефтяных нанотехнологий».

В Части 3 показано, что возникновение «нефтяных нанотехнологий» становится возможным, прежде всего, благодаря выявлению закономерного характера структурных фазовых превращений нанокolloидов асфальтенов в природных нефтяных средах и обнаружению значительного влияния этих превращений на эксплуатационно важные макроскопические свойства сырых нефтей. Так, плотность и вязкость нефти могут претерпевать нежелательные и весьма резкие изменения, вызванные неконтролируемыми в традиционных технологиях переходами через границы нанофаз. Описанная в главе 3.3 хорошо структурированная фазовая диаграмма асфальтенов нефти позволяет рассматривать асфальтены как «ассоциативные нанокolloиды». Поэтому природные сырые нефти представляют собой «ассоциативные наножидкости», являющиеся

естественными объектами супрамолекулярных «нефтяных нанотехнологий», понимаемых как методы управления структурой и свойствами природных ассоциативных нанокolloидов.

В связи с этим, термин «нефтяные нанотехнологии» предлагается использовать для описания любых промышленных технологий и операций, которые спроектированы и осуществляются с учетом закономерностей сложных структурных изменений ассоциативных молекулярных систем нефтяных сред. Такие технологии должны включать специально разработанные операции (проводиться при специально выбранных условиях) с тем, чтобы целенаправленно предотвращать (или наоборот, провоцировать) осуществление тех или иных фазовых превращений в нанокolloидах нефти. В результате, может быть сохранен баланс тонкой внутренней структуры природной нефти и обеспечено улучшение (или, по крайней мере, сохранение) эксплуатационных свойств и товарной ценности добываемого сырья.

В Части 4 приведен обзор некоторых проблем, наблюдаемых в практике нефтегазового производства, а именно, осложнений при осуществлении технологических операций, предусматривающих термообработку нефтей, смешение природных нефтей различного происхождения либо смешение природных нефтей с разнообразными растворителями. Рассмотрены конкретные примеры «нефтегазовых нанотехнологий» термообработки и смешивания, которые могут быть использованы для предотвращения осложнений в процессах добычи, транспорта и хранения нефтей.

Одним из решающих сдерживающих факторов при внедрении новой техники и технологий обычно является необходимость больших капитальных затрат на серийное производство нового оборудования и создание необходимой инфраструктуры для организации продаж, проведения монтажных работ, ремонта и т.д. Для широкомасштабного внедрения «нефтяных нанотехнологий» этого не требуется - все необходимое уже есть. По сути, подобное внедрение сводится к распространению знаний о критическом влиянии нанофаз нефти на свойства и качество добываемого сырья. Если при осуществлении производственных операций нефтяники будут следовать требованию «не навреди» по отношению к тонкой природной организации нанофаз, то это позволит сохранить

основные достоинства традиционных технологий, и приобрести новые, неизвестные ранее преимущества.

Данное учебное пособие написано, в основном, на материале курсов лекций, прочитанных автором в РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Нефтегазовое дело» и дипломированных специалистов (инженеров - исследователей) по направлению «Горное дело». В учебном пособии использованы и оригинальные научные результаты исследований, проведенных автором на кафедре физики РГУ нефти совместно с Н.Ю. Елисеевым, Б.Р. Ахметовым, А.П. Лосевым, М.А. Новиковым и другими преподавателями, аспирантами и студентами. За комплекс исследовательских работ по созданию научной базы для перспективных нанотехнологий добычи, транспорта и хранения нефтегазового сырья, коллективу авторов в 2007 году была присуждена Премия им. Н.К. Байбакова Международной топливно-энергетической Ассоциации (МТЭА).

Эта книга предназначена, прежде всего, для использования студентами старших курсов, магистрантами и аспирантами. Так как книга содержит подробное изложение результатов многих современных научно-исследовательских работ, она может также представить интерес для научных сотрудников и специалистов нефтегазовой отрасли.

Для того, чтобы учебное пособие было максимально полезным при выборе студентами тематики квалификационных исследовательских работ, при написании обзорных разделов магистерских и кандидатских диссертаций, в тексте приведены ссылки на все источники оригинальных данных. Перечень литературы составлен в более подробном формате, чем в обычных библиографических стандартах - приведены фамилии и инициалы всех авторов, полные заголовки статей и наименования изданий без сокращений.

Огромную благодарность хочу выразить коллективу кафедры физики РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, поддерживавшему меня

на всех этапах моей работы над учебным пособием. Особо хочу отметить и поблагодарить А.П. Лосева, который оказал неоценимую помощь при подготовке рукописи к изданию. Он осуществил редактирование большинства иллюстраций Частей 1 и 2, а также объемного перечня литературы, совместно с ним написаны тексты глав 1.2, 2.4, 3.2, разделов 2.2.2 и 2.3.3.