

О.В. Савенок, Т.В. Арутюнов

# **СЛАНЦЕВЫЕ УГЛЕВОДОРОДЫ:**

## **АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ**

**О.В. Савенок, Т.В. Арутюнов**

**СЛАНЦЕВЫЕ УГЛЕВОДОРОДЫ:  
АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ  
И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ**

**Монография**

Краснодар  
2019

УДК 622.276+552.521

ББК 33.361

C12

**Рецензенты:**

**Бекетов Сергей Борисович**, доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры геофизических методов поисков  
и разведки месторождений полезных ископаемых

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»;

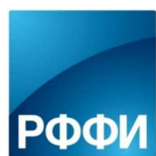
**Третьяк Александр Яковлевич**, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Нефтегазовая техника и технологии»

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический  
университет (НПИ) имени М.И. Платова», академик РАН.

**C12 Савенок, Ольга Вадимовна.**

**Сланцевые углеводороды: анализ текущего состояния и перспективы разработки** : монография / О.В. Савенок, Т.В. Арутюнов. –  
Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2019. – 272 с.

ISBN 978-5-91718-590-3



РОССИЙСКИЙ  
ФОНД  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

*Издание осуществлено при финансовой  
поддержке Российского фонда фундаменталь-  
ных исследований по проекту № 19-15-00017,  
не подлежит продаже.*

В книге представлен системный анализ и разработка научно-методических принципов лабораторно-математического моделирования глинисто-кремнистых сланцевых пород и возможность применения полученных результатов для повышения нефтеотдачи при эксплуатации сланцевых отложений. Проведён анализ повышения добычи сланцевых углеводородов методом гидроразрыва пласта. Рассмотрены теоретические аспекты разработок месторождений сланцевых углеводородов в России, выбора метода ГРП и химического агента.

Монография рассчитана на широкий круг читателей и может быть полезна для научных и инженерно-технических работников нефтегазодобывающей промышленности, занимающихся вопросами разработки месторождений сланцевых углеводородов.

ББК 33.361

УДК 622.276+552.521

ISBN 978-5-91718-590-3

© О.В. Савенок, Т.В. Арутюнов, 2019

© Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ), 2019

© Оформление – ООО «Издательский Дом – Юг», 2019



### **Ольга Владимовна Савенок**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры нефтегазового  
дела имени профессора Г.Т. Вартумяна  
ФГБОУ ВО «Кубанский государствен-  
ный технологический университет»



### **Татос Владимирович Арутюнов**

ведущий специалист отдела проекти-  
рования и мониторинга разработки  
месторождений Ставропольского края  
ООО «НК «Роснефть» - НТЦ»

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

<b>АВПД</b>	– аномально высокое пластовое давление
<b>БС</b>	– баженовская свита
<b>ГИС</b>	– геофизические исследования скважин
<b>ГРП</b>	– гидравлический разрыв пласта
<b>ГС</b>	– горизонтальная скважина
<b>ДМС</b>	– диссипативная мезотрещинная структура
<b>ЗСП</b>	– Западно-Сибирская плита
<b>ИДН</b>	– интенсификация добычи нефти
<b>ИК</b>	– индукционный каротаж
<b>КВСВ</b>	– Камско-Вятская система впадин
<b>ККСВ</b>	– Камско-Кинельская система впадин
<b>ККСП</b>	– Камско-Кинельская система прогибов
<b>МГРП</b>	– многостадийный гидроразрыв
<b>МКНС</b>	– модульная кустовая насосная станция
<b>МПНС</b>	– модульная подпорная насосная станция
<b>МУН</b>	– методы увеличения нефтеотдачи
<b>НГБ</b>	– нефтегазоносный бассейн
<b>НИУВС</b>	– нетрадиционные источники углеводородного сырья
<b>ННН</b>	– неопределённость, нечёткость и неоднородность
<b>НО</b>	– нерастворимый остаток
<b>ОВ</b>	– органическое вещество
<b>ОПЗ</b>	– обработка призабойной зоны
<b>ПЗП</b>	– призабойная зона пласта
<b>ПНП</b>	– повышение нефтеотдачи пластов
<b>ПРМ</b>	– природные радиоактивные материалы
<b>ПС</b>	– потенциал самопроизвольной поляризации
<b>ПТФ</b>	– промежуточная твердожидкая фаза
<b>РФА</b>	– рентгенофазовый анализ
<b>СПГ</b>	– сжиженный природный газ
<b>ТГВ</b>	– термогазовое воздействие
<b>УВ</b>	– углеводороды
<b>ФЕС</b>	– фильтрационно-емкостные свойства
<b>Шл.</b>	– шлиф
<b>к.к.</b>	– конец керна
<b>н.к.</b>	– начало керна
<b>н.э.</b>	– нефтяной эквивалент
<b>GR/ГК</b>	– гамма-каротаж
<b>ИК</b>	– индукционный каротаж
<b>LLD</b>	– индукционный каротаж с глубиной проникновения
<b>NKT</b>	– нейтронный по тепловым нейтронам (NKT) каротаж
<b>PZ</b>	– потенциал-зонд
<b>R</b>	– метод кажущегося сопротивления

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	9
<b>Глава 1</b>	
<b>Изученность ресурсов сланцевого газа и газоносных сланцев</b> .....	13
1.1 Общие представления о нетрадиционных ресурсах углеводородов .....	13
1.2 Происхождение сланцевого газа .....	16
1.3 Уникальные особенности газоносных сланцев .....	17
1.4 Особенности залегания и миграции сланцевого газа в сланцевых толщах .....	19
1.5 Состояние, тенденции и перспективы выработки запасов (ресурсов) углеводородов из сланцевых отложений .....	20
1.5.1 Состояние выработки запасов (ресурсов) углеводородов из сланцевых отложений .....	20
1.5.2 Сланцевые нефть и газ России .....	22
1.5.3 Запасы и ресурсы нефтегазоносных сланцев .....	23
1.5.4 Перспективы выработки запасов углеводородов из сланцевых отложений .....	27
1.6 История изучения газоносных сланцев .....	31
1.7 Методология оценки ресурсов сланцевых отложений .....	33
1.8 Методы и технологии выработки запасов УВ из сланцевых месторождений .....	35
1.9 Принципы классификации нефтегазодобывающих систем по признакам неопределённости, нечёткости и неоднородности .....	42
<b>Выводы</b> .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Литолого-петрографические особенности и условия формирования отложений баженовской свиты</b> .....	44
2.1 Условия накопления и нефтеносность баженовской свиты Западной Сибири .....	44
2.1.1 Запасы нефти в пластах баженовской свиты .....	44
2.1.2 Отложения баженовской свиты .....	44
2.1.3 Состав пород баженовской свиты .....	45
2.1.4 Формирование баженовской свиты .....	46
2.2 Территориальное и стратиграфическое положение отложений баженовской свиты .....	47
2.3 Нефтегазоносность отложений баженовской свиты .....	50
2.4 Особенность баженовского коллектора .....	52
2.5 Особенности геологического строения нетрадиционных коллекторов баженовской свиты .....	53

2.6	Литолого-петрографические особенности и условия формирования отложений баженовской свиты на Западно-Квензерской площади (Томская область) .....	58
2.6.1	Характеристика объекта исследования .....	58
2.6.2	Методы и методика исследований .....	59
2.6.3	Выделение литотипов в разрезе скважины № 4 Западно-Квензерской площади .....	61
2.6.4	Геофизическая характеристика литотипов .....	66
2.6.5	Петрографические особенности литотипов .....	68
2.6.6	Вещественный состав литотипов по результатам рентгенофазового анализа .....	71
2.7	Современный опыт разработки баженовской свиты .....	73
2.8	Применение технологии термогазового воздействия (ТГВ).....	75
2.8.1	Описание метода термогазового воздействия .....	76
2.8.2	Преимущества метода ТГВ .....	79
2.8.3	Значимость метода ТГВ в науке .....	79
	<b>Выводы</b> .....	80

### **Глава 3**

#### **Анализ характеристик геологического строения**

	<b>и коллекторских свойств сланцевых объектов</b> .....	81
3.1	Особенности строения месторождений сланцевых отложений ....	81
3.2	Условия образования горючих сланцев .....	87
3.2.1	Палеогеографические условия проявления сланценосных формаций .....	87
3.2.2	О роли бактерий в преобразовании органического вещества .....	91
3.2.3	Глубина накопления органического вещества горючих сланцев .....	92
3.2.4	Стадийность сланцеобразования .....	93
3.3	Сланценосные формации и форма залежей горючих сланцев .....	95
3.3.1	Основные сланценосные формации .....	95
3.3.2	Фации и ритмы сланценакопления .....	103
3.3.3	Геотектонические типы месторождений горючих сланцев .....	107
3.3.4	Форма залежей горючих сланцев .....	110
3.4	Основные свойства горючих сланцев .....	116
3.4.1	Элементарный состав органического вещества .....	116
3.4.2	Выход смолы .....	117
3.4.3	Зольность .....	119
3.4.4	Концентраты керогена .....	120
3.4.5	Влажность .....	120
3.4.6	Крепость .....	121
3.4.7	Плотность .....	121

3.4.8	Пористость .....	122
3.4.9	Пределы прочности .....	122
3.4.10	Теплофизические свойства .....	122
3.4.11	Радиоактивность сланцев .....	123
3.4.12	Химическая классификация сланцев .....	123
3.5	Исследование сланцевых пород и природы сланцевой нефтеносности баженовской свиты и формации Vakken .....	124
3.6	Постановка задачи физико-химического моделирования сланцевых пород .....	143
<b>Выводы</b> .....		148

## **Глава 4**

<b>Моделирование поровой структуры сланцевых пород</b> .....		149
4.1	Принципы моделирования поровой структуры сланцевых пород .....	149
4.2	Оценка параметров порового пространства глинистых пород ....	157
4.3	Моделирование глинистых пород с колломорфным кремнезёмом .....	169
<b>Выводы</b> .....		172

## **Глава 5**

### **Экспериментальные исследования**

<b>глинисто-кремнистых сланцевых пород</b> .....		173
5.1	Постановка задачи экспериментальных исследований глинисто-кремнистых сланцевых пород .....	173
5.2	Разработка методологии приготовления образцов глинисто-кремнистых пород с учётом факторов неоднородности и неопределённости .....	175
5.2.1	Факторы методической неоднородности, неопределённости и нечёткости сланцевых пород .....	175
5.2.2	Методология приготовления искусственных образцов глинисто-кремнистых сланцевых пород с заданными свойствами .....	177
5.3	Исследование удельной поверхности сланцевых пород .....	188
5.4	Экспериментальные исследования способности глинисто-кремнистых образцов пород создавать новые поверхности .....	201
<b>Выводы</b> .....		210

## **Глава 6**

### **Технологические подходы к разработке**

<b>ресурсов сланцевого газа</b> .....		211
6.1	Направленное и горизонтальное бурение .....	211



6.2	Гидравлический разрыв пласта (ГРП) .....	214
6.2.1	Технологии ГРП по типу стимуляционного флюида .....	214
6.2.2	Технологии ГРП по методике проведения разрыва .....	218
6.3	Мониторинг процесса гидроразрыва и развития трещин .....	222
6.4	Объёмный ГРП .....	223
6.4.1	Концепция стимулированного объёма пласта и объёмного ГРП .....	223
6.4.2	Технологические особенности проведения объёмного ГРП .....	226
6.5	Обзор опыта применения методов интенсификации притока нефти на коллекторах с осложнёнными условиями разработки .....	227
6.6	Жизненный цикл инновационного продукта – сланцевого газа .....	232
	<b>Выводы</b> .....	234

## **Глава 7**

	<b>Экологические проблемы при разработке месторождений сланцевых углеводородов</b> .....	236
	<b>Выводы</b> .....	244

## **Глава 8**

	<b>Влияние сланцевого газа на мировой энергетический рынок</b> .....	245
8.1	Карта месторождений сланцевого газа в мире, перспективы разработки месторождений .....	245
8.2	Экономические факторы добычи углеводородов из сланцевых месторождений .....	248
8.3	Перспективы экономического влияния сланцевого газа на мировой газовый рынок .....	252
8.4	Перспективы российского газа в контексте газосланцевой лихорадки .....	252
8.5	Энергетический аспект экономической безопасности внешней торговли России в современных условиях .....	255
	<b>Выводы</b> .....	257

	<b>Заключение</b> .....	258
--	-------------------------	-----

	<b>Список литературы</b> .....	259
--	--------------------------------	-----

## ВВЕДЕНИЕ

XXI век уже давно прогнозируется как век исчерпания основной части традиционных запасов ископаемого топлива, и наступает время разработки нетрадиционных ресурсов углеводородов.

Нетрадиционные ресурсы углеводородов означают ту часть ресурсов нефти и газа, подготовка и освоение которых нуждаются в разработке новых методов и способов выявления, разведки, добычи, переработки и транспорта. К основным нетрадиционным ресурсам природного газа относятся: сланцевый газ, метан угольных пластов, газ в плотных песчаниках и др. Благодаря прогрессу в технологиях разработки и эксплуатации, эти ранее не извлекаемые запасы теперь становятся извлекаемыми.

В США газ из плотных песчаников и метан из угольных пластов добываются уже давно, а добыча сланцевого газа резко увеличилась лишь в последние несколько лет при использовании технологий многоствольного горизонтального бурения и крупномасштабного многостадийного гидравлического разрыва пласта (ГРП). В 2009 году США стали мировым лидером по добыче газа (745,3 млрд м<sup>3</sup>), причём более 40 % приходилось на нетрадиционные источники (метан из угольных пластов и сланцевый газ). В 2011 году годовое производство сланцевого газа в США достигло 226 млрд м<sup>3</sup>, данная цифра намного больше общего годового производства природного газа в Китае (102,53 млрд м<sup>3</sup>). По оценкам компании «British Petroleum», к 2030 году 63 % газа в США будет добываться из сланцев и угольных пластов. А по прогнозу МЭА к 2035 году эта доля вырастет до 71 %. Эти цифры стимулировали процессы поиска и разработки аналогичных сланцев по всему миру, в том числе и в России.

В настоящее время в России в наибольших масштабах сланцевая нефть добывается компанией «Салым Петролеум Девелопмент» (совместное предприятие концерна «Shell» и российской нефтяной компании «Эвихон») из баженовской свиты Западной Сибири. Дебиты скважин в пределах Салымского сланцевого поля колеблются в очень широких пределах 0,1–1 тонн/сут (15 %), 1–5 тонн/сут (28 %), 5–10 тонн/сут (22 %), 10–100 тонн/сут (21 %), более 100 тонн/сут (14 %). Средний дебит скважин около 30 тонн/сут.

Прогнозные ресурсы сланцевой нефти баженовской свиты в Западной Сибири составляют около 9,7 млрд тонн. По данным Энергетического информационного агентства США (июнь 2013 года), извлекаемые ресурсы сланцевой нефти баженовской свиты Западной Сибири оцениваются в 75 млрд барр. (более 10 млрд тонн). Для сравнения: извлекаемые ресурсы крупнейшего месторождения сланцевой нефти Баккен в США оцениваются в 3,8 млрд тонн.

Американская «сланцевая революция» заставила мир вступить в эпоху широкого освоения технологически сложных в разработке энергетических ресурсов сланцевого газа. Добыча углеводородов из сланцевых ме-

сторождений имеет специфические особенности. В силу высокой плотности и прочности сланцев для высвобождения нефти и газа из порового пространства практически единственным приёмом является разрушение пласта с помощью гидравлического разрыва. При этом низкая проницаемость и насыщенность пласта вынуждают разрушать пласт многократно.

В книге описаны результаты новых исследовательских работ, изменившие наши представления о принципиальных вопросах разработки месторождений сланцевых углеводородов и природе некоторых фундаментальных явлений:

1. Определены критерии различия между низкопроницаемыми коллекторами с трудноизвлекаемыми запасами и нетрадиционными коллекторами нефтегазоматеринских залежей, заключающиеся:

- в процессе формирования ловушек для подвижных углеводородов;
- типе емкостного пространства;
- методах выявления потенциально продуктивных коллекторов;
- оценке начальных геологических и извлекаемых запасов;
- подходах к разработке и методам интенсификации добычи нефти;
- возможности искусственной генерации углеводородов.

2. На основе исследования мирового опыта, системных научно-технических подходов и методов показано, что сланцевые месторождения как нетрадиционные ресурсы УВ характеризуются следующими признаками:

- рассеянностью органического вещества по большой площади, низкой пригодностью для описания состоянием структурными, стратиграфическими, литологическими и прочими традиционными методами;
- вариативностью степени зрелости органического вещества по разным месторождениям;
- формирование коллекторов (пустотного пространства, микроструктуры) и органического вещества происходит одновременно в результате процессов диагенеза, катагенеза и метабенеза.

3. Установлено, что системная методология оценки запасов и ресурсов нефтегазоносных сланцев в научном и практическом плане не проработана в достаточной степени по причине слабой изученности ресурсной базы, а также в низком уровне достоверности применяемых методов оценки ресурсов.

4. Разработана методология и выполнены экспериментальные исследования глинисто-кремнистых сланцевых пород:

- разработана методология приготовления искусственных образцов глинисто-кремнистых сланцевых пород, позволяющая снизить влияние неопределённости и нечёткости и выстроить системные подходы к исследованию базовых характеристик сланцевых пород;
- показано, что способность пород создавать новые поверхности коррелирует с долей коллоидной компоненты;
- показано, что характер деформационного поведения глинисто-кремнистых сланцевых пород в значительной степени зависит от влагосодержания пород.

5. Разработаны принципы и методы моделирования глинисто-кремнистых сланцевых пород и показано, что:

- к основным отличительным признакам глин относятся высокодисперсность, коллоидный и водный факторы;
- глинистые породы – физико-химические системы с иерархическим строением структурных элементов, активно взаимодействующих друг с другом на всех уровнях;
- разработана композиционная модель глинисто-кремнистых сланцевых пород.

6. Разработан экспериментально определяемый новый параметр пород, характеризующий способность породы при гидродинамическом воздействии создавать новые поверхности.

7. Доказано, что глинистые сланцевые породы имеют многоуровневую структурную организацию, в которой большая часть пор заключена в агрегаты и не активна, и для перехода в активную фазу необходимо использование методов разрушения агрегатов.

8. Несмотря на различия в геологическом строении, подходы к разработке нетрадиционных запасов целесообразно рассматривать исходя из мирового опыта разработки низкопроницаемых коллекторов.

9. Показано, что эффективные сланцевые технологии опираются на применение высокоинтенсивных методов воздействия на пласты и должны отвечать требованиям высокой адаптивности к особенностям месторождения и изменению условий добычи.

Технологии добычи сланцевой нефти решают две главные задачи:

1) создание методами множественного ГРП большого объёма свободной поверхности породы, чтобы обеспечить высокую эффективность на этапе разделения фаз;

2) отделение керогена от породы методами дистилляции, тепловой обработки и др.

10. Особенности добычи сланцевого газа из низкопроницаемых сланцев являются короткий срок жизни скважины, длительный срок разработки и необходимость использования горизонтальных скважин вместе с многостадийным гидроразрывом.

11. Добыча сланцевого газа из сланцев в основном зависит от трёх типов технологий: горизонтального направленного бурения, гидравлического разрыва пласта, мониторинга ГРП и развития трещин.

12. Проанализированы особенности и объекты применения технологий разработки газосланцевых месторождений, позволяющие решить задачу выбора оптимальных технологий освоения конкретного газосланцевого месторождения с учётом конкретных характеристик и условий.

13. Проанализирована разность между традиционным и объёмным ГРП. Объёмный ГРП позволяет повысить стимулированный объём пласта, а стимулированный объём пласта напрямую влияет на дебит скважины. При разработке газосланцевых толщ целесообразно применять технологию объёмного ГРП.

14. Накоплен большой положительный опыт в применении таких методов интенсификации добычи нефти в низкопроницаемых коллекторах, как гидравлический разрыв пласта, кислотные обработки с новейшими модификациями и их комбинациями между собой.

15. Несмотря на принципиально схожие подходы при разработке технологий интенсификации притока нефти для баженовской свиты, необходимо учитывать следующие её специфические особенности:

- аномально высокие значения пластового давления;
- повышенные пластовые температуры;
- низкие значения пористости и проницаемости коллекторов;
- литологическую неоднородность и слоистость пород;
- наличие вертикальной и горизонтальной трещиноватости;
- неравномерное распределение по площади и быстрое снижение начальных дебитов;
- обширный минералогический состав с высоким содержанием алюмосиликатов.

16. Показано, что в результате усилий отечественных учёных разработаны научные принципы природы сланцевой нефтеносности на примере баженовской свиты, что создаёт определённые предпосылки для технологических решений.