



УДК 553.983

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ ЗАЛЕЖЕЙ СЛАНЦЕВЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ

ANALYSIS OF TECHNOLOGIES FOR THE DEVELOPMENT OF SHALE HYDROCARBON DEPOSITS IN THE BAZHENOV FORMATION

Жарикова Наиля Халимовна

кандидат технических наук,
доцент кафедры разработки и эксплуатации
нефтяных и газовых месторождений,
Санкт-Петербургский горный университет
Zharikova_Nkh@pers.spmi.ru

Савенок Ольга Вадимовна

доктор технических наук,
профессор кафедры разработки и эксплуатации
нефтяных и газовых месторождений,
Санкт-Петербургский горный университет
Savenok_OV@pers.spmi.ru

Кусова Лизавета Геннадиевна

студентка направления подготовки
21.05.06 «Нефтегазовые техника и технологии»,
Санкт-Петербургский горный университет
kusovalisa@gmail.com

Аннотация. Повышение спроса на энергоресурсы и снижение «традиционных» запасов нефти привело к началу разработки «нетрадиционных» источников углеводородов, к числу которых относится баженовская свита. Разработка баженовской свиты является одной из стратегических задач многих российских компаний. Баженовская свита распространена на территории около 1 млн км² и содержит в себе колоссальные ресурсы. Однако в связи со сложными геолого-физическими условиями залегающая промышленная разработка данного объекта была начата относительно недавно в отличие от группы сланцевых месторождений в США. При освоении запасов баженовской свиты специалисты сталкиваются со следующими проблемами: низкие значения фильтрационно-емкостных свойств, высокие пластовые температуры и давления, отличие формирования коллектора от «традиционного», содержание как легкой нефти, так и керогена различной степени зрелости, преобразование которого в синтетическую нефть требует высоких температур. В статье рассматриваются технологии разработки баженовской свиты и затрагиваются другие вопросы и проблемы разработки сланцевых месторождений нефти.

Ключевые слова: общие представления о сланцевой нефти; особенности геологического строения баженовской свиты; классификация нефтематеринских пород; обзор существующих методов повышения нефтеотдачи сланцевых коллекторов; типичные химические реакции, происходящие в пласте; высокотемпературное горение и низкотемпературное окисление; опыт применения метода внутрислоевого горения (окисления).

Zharikova Nailia Khalimovna

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the department
of development and operation
of oil and gas fields,
Saint Petersburg mining university
Zharikova_Nkh@pers.spmi.ru

Savenok Olga Vadimovna

Doctor of Technical Sciences,
Professor of the department of development
and operation of oil and gas fields,
Saint Petersburg mining university
Savenok_OV@pers.spmi.ru

Kusova Lizaveta Genadievna

Student training direction 21.05.06
«Oil and gas equipment and technologies»,
Saint Petersburg mining university
kusovalisa@gmail.com

Annotation. The increase in demand for energy resources and the decrease in «traditional» oil reserves led to the beginning of the development of «non-traditional» sources of hydrocarbons, which include the Bazhenov formation. Development of the Bazhenov formation is one of the strategic tasks of many Russian companies. The Bazhenov formation covers an area of about 1 million km² and contains colossal resources. However, due to the complex geological and physical conditions, the industrial development of this object was started relatively recently, in contrast to the group of shale deposits in the USA. When developing the reserves of the Bazhenov formation, experts face the following problems: low values of filtration capacity properties, high reservoir temperatures and pressures, differences in the formation of the reservoir from the «traditional» one, the content of both light oil and kerogen of different degrees of maturity, which requires transformation into synthetic oil high temperatures. The article examines the development technologies of the Bazhenov formation and touches on other issues and problems of the development of oil shale deposits.

Keywords: general idea about shale oil; special features of the geological structure of the Bazhenov formation; classification of oil parent breeds; review of existing methods of increasing oil yield of shale collectors; typical chemical reactions occurring in plastic; high-temperature combustion and low-temperature oxidation; experience using the method of intralayer combustion (oxidation).

Общие представления о сланцевой нефти

На конец второго десятилетия XXI века приходится пик добычи традиционной нефти, связанный, во-первых, со снижением темпов добычи углеводородов, во-вторых, с возникновением новых источников нетрадиционной нефти, имеющий высокий потенциал в нефтяной отрасли.



Нетрадиционные углеводороды представляют собой ресурсы, находящиеся в сложных геологических условиях, требующих нетривиальных методов разведки и добычи. Среди нетрадиционных источников углеводородов выделяют нефть сланцевых формаций, включающих сланцевую нефть (shale oil), которую получают из нефтяного сланца (порода, которую подвергают дополнительной термической обработке для получения жидкого сырья), и нефть низкопроницаемых пород (tight oil).

Если рассмотреть состав нефтеносного сланца в процентном соотношении, то 0,37 % об. составляет вода, 85,02 % об. – минеральная часть (кальцит, доломит, полевой шпат, пирит, гидрослюда и т.д.) и 14,61 % об. приходится на органическую часть, 11,93 % об. из которой составляет кероген, а остальное – жидкие углеводороды. К числу пород, богатых керогеном, относят:

- глинисто-керогено-карбонатные;
- керогено-кремнисто-глинистые;
- глинисто-кремнисто-керогенные.

Преимущественное количество нефти сланцевых формаций, в основном в виде нефти низкопроницаемых пород, сосредоточено на территории США – около 600 млрд тонн. На втором месте по объёму ресурсов нефтяного сланца находится Китай, где залегают порядка 46,5 млрд тонн нефтяного сланца и 41 млрд тонн нефти низкопроницаемых пород. Среди стран, обладающих крупнейшими ресурсами сланцевых формаций, выделяют Израиль (35 млрд тонн), Демократическую Республику Конго (14 млрд тонн), Иорданию (12,6 млрд тонн), Бразилию (11,48 млрд тонн).

На территории России также отмечаются значительные запасы нефти сланцевых пород: по оценкам разведанные запасы горючих сланцев составляют 37 млрд тонн, однако в пределах баженновской свиты (объект, признанный лидером по запасам сланцевой нефти России) запасы оцениваются Министерством энергетики в 22 млрд тонн.

Особенности геологического строения баженновской свиты

Баженновская свита – это крупнейшая низкопроницаемая группа нефтематеринских горных пород, имеющая распространение в Западно-Сибирском нефтегазоносном бассейне площадью около 1 000 000 км² и средней толщиной около 30 метров. Примерный стратиграфический возраст баженновской свиты составляет 140–145 млн лет.

Большинством геологов, изучавших баженновскую свиту, принимается, что она является материнской для многих месторождений Западной Сибири. Практически все специалисты выделяют в её составе породы, в которых преобладающими компонентами выступают глинистые минералы: аргиллиты, кремнистые аргиллиты, карбонатно-кремнистые, глинисто-карбонатно-кремнистые и кремнистые породы с невысоким содержанием глини. При этом существует чёткая закономерность в распределении органического вещества между этими типами пород. По этому принципу выделяют *баженновиты* (*баженниты*) – низкоглинистые породы, обогащённые органическим веществом до 25–50 % породы, и *аргиллиты* – высокоглинистые породы, содержащие до 3–7 % органического вещества. Причём первые находят своё распространение в центральных областях Западно-Сибирского осадочного бассейна, нефтегенерационный потенциал которого здесь максимален, а в периферийных областях бассейна преобладают аргиллиты, нефтегенерационный потенциал которых ниже.

Особенностью баженновской свиты является то, что её ресурсы одновременно представлены и породой коллектором, из которой возможно добывать нефть, и нефтематеринской породой, способной выделять свободные углеводородные флюиды, образованные в процессе катагенетических преобразований. Катагенез делится на ряд стадий, основной из которых является стадия мезокатагенеза. Её также называют «главной зоной нефтегазообразования» или «нефтяным окном», так как на этой стадии начинается перестройка керогена с образованием нефти и газа. На данной стадии породы характеризуются степенью катагенетической зрелости, оцениваемой с помощью генерационного потенциала – содержания органического вещества в виде незрелого керогена. *Керогеном* называют нерасстворимую часть органического вещества осадочных пород, и именно он является основным источником нефти и природного газа.

Условия осадконакопления баженновской свиты во многом определены степенью изменчивости её состава и строения. Главным отличием литологических типов пород баженновской свиты является содержание глинистого и органического вещества, т.е. свита представляет собой чередование баженнитов и аргиллитов, свойства которых резко отличаются друг от друга. В силу того, что в баженнитах содержится большое количество органического вещества, их свойства в пластовых условиях близки к пластичным. Аргиллиты, напротив, обладают массивной структурой, они более плотные и хрупкие. Среди основных литотипов баженновской свиты выделяют: глинисто-кремневые битуминозные породы верхней части с увеличенным содержанием глинистой составляющей, карбонатно-глинисто-кремневые битуминозные породы, пропластки окремненных радиоляритов и глинисто-кремневые битуминозные породы нижней части.

Модель порового пространства нефтесодержащей породы баженновской свиты представлен на рисунке 1.

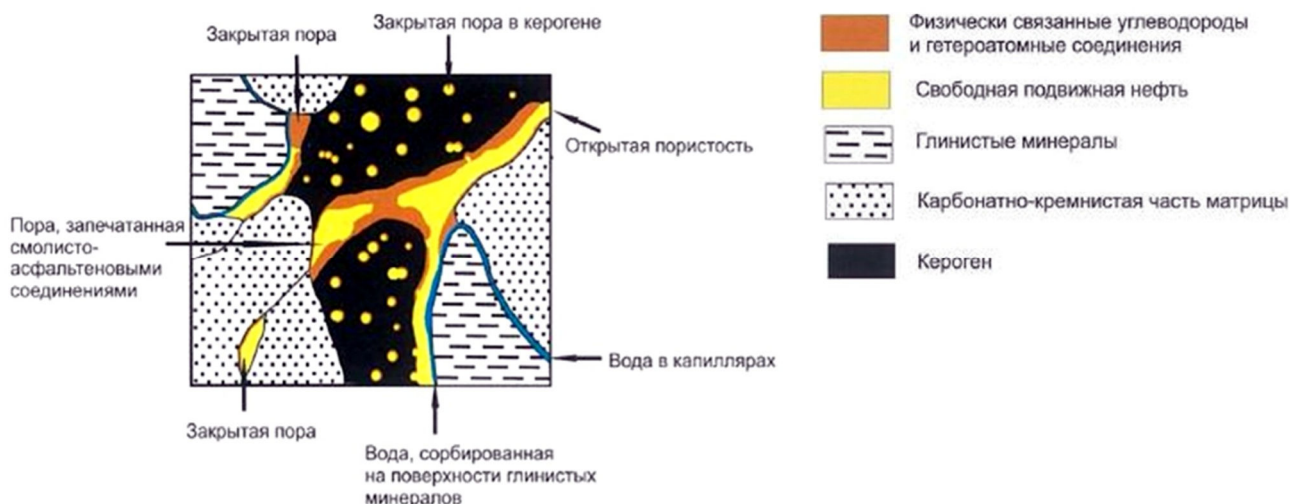


Рисунок 1 – Модель порового пространства нефтесодержащей породы баженовской свиты

Минерально-компонентный состав породы определяет соотношение кремнисто-карбонатной части матрицы, состоящей из кварца, кальцита, доломита, пирита, глинистых минералов и керогена. Между кристаллами, компонентами и в керогене находятся открытые и закрытые поры, в которых может содержаться свободная подвижная нефть. На границе «пора – твёрдая фаза» могут находиться связанные углеводороды и гетероатомные соединения.

Что касается баженовского коллектора, то его фильтрационные свойства обусловлены первичной слоистостью и вторичной трещиноватостью, т.е. коллекторские свойства баженовских отложений возникли в результате постседиментационных преобразований пород, что привело к формированию вторичной пористости и кавернозности – свойствам, характеризующим ёмкость коллектора. Наличие трещин также вносит свой вклад в фильтрационно-ёмкостные свойства пород баженовской свиты. Данные трещины связывают ёмкостное пространство в общую флюидодинамическую систему, это и обуславливает проницаемость коллектора.

Перспективными коллекторами баженовской свиты, прежде всего, являются трещинно-кавернозные карбонатные отложения. Второй тип коллектора – трещиноватые или листоватые баженовиты, сложенные главным образом керогеном и кремнезёмом. По разным оценкам пористость данных пластов достигает 20 % при проницаемости выше 1 мкм². При этом пористость матрицы обычно составляет 1–2 %.

На сегодняшний день опыт добычи нефти из отложений баженовской свиты приходится на территорию ХМАО. На 2016 год отмечался опыт разработки по 368 скважинам на 39 лицензионных участках, основная доля добычи из которых (66 %) отмечается на месторождениях ОАО «Сургутнефтегаз». На Салымской группе месторождений, оператором которой является компания «Салым Петролеум Девелопмент Н.В.» зарегистрирован дебит более 720 м³/сут.

Стоит отметить, что разработка баженовской свиты российскими компаниями не привела к сланцевой революции и, в отличие от американского опыта разработки сланцевых формаций, в большинстве случаев, была крайне убыточна. По утверждению специалистов компании «Shell», для экономического эффекта толщина пласта должна составлять не менее 30 метров с содержанием нефти 90 литров на тонну сланцевой породы. Даже нефтематеринские породы Баккена включают всего лишь 32 % запасов нефти и далеко не все эти залежи имеют толщину пласта в 30 и более метров. Для сравнения огромные запасы нативной нефти в пластах баженовской свиты обусловлены большой площадью распространения нефтематеринских отложений (более 1 млн км) с толщиной пластов в среднем 15 метров. При этом содержание нефти в породе в отдельных случаях достигает 12–15% по объёму, однако в среднем не превышает 4–5 % об. Кроме того, сложность добычи нативной нефти заключается в крайне низкой проницаемости пород баженовской свиты. На рисунке 2 приведена схема строения коллекторов формаций Баккен и баженовской свиты.

Главные потенциальные ресурсы углеводородного сырья баженовских отложений связывают, прежде всего, с высокими концентрациями твёрдого органического вещества в породе, которое имеет возможность при определённых условиях преобразовываться в подвижные углеводороды. Однако основной проблемой добычи нефти при этом является практически нулевая проницаемость глинисто-карбонатно-кремневых пород. Именно отсутствие высокоперспективной технологии разработки пластов баженовской свиты, заключающейся в превращении твёрдой органики в подвижные углеводороды и создании сети фильтрационных каналов в матричной породе, и не позволяет вести успешную промышленную разработку нефтематеринской залежи.

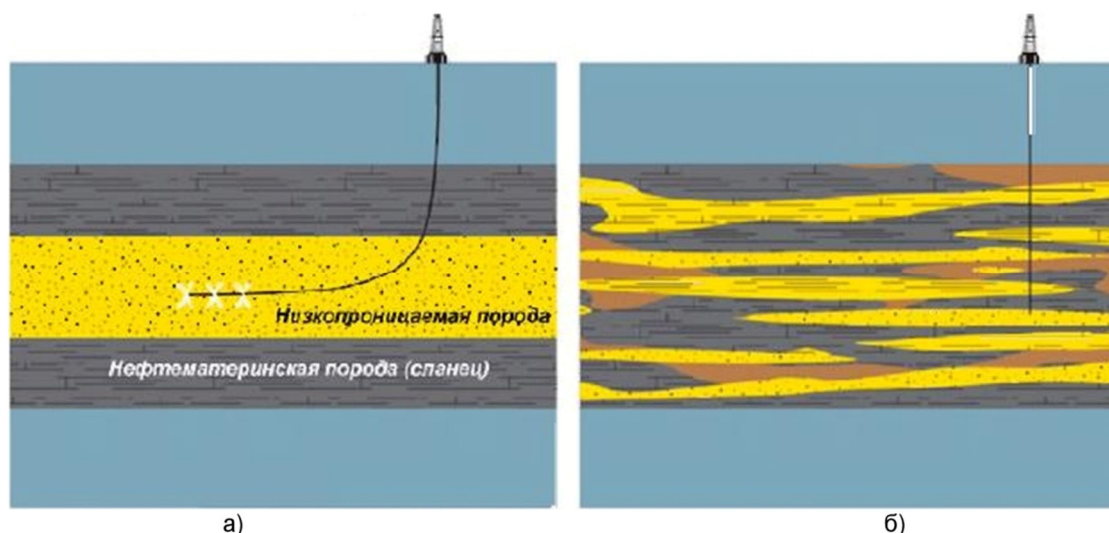


Рисунок 2 – Схема строения коллекторов формаций Баккен (а) и баженовской свиты (б)

Классификация нефтематеринских пород

Нефтегазоматеринские породы можно классифицировать в зависимости от величины генерационного потенциала, типа керогена и зрелости органического вещества (табл. 1 и 2).

Таблица 1 – Классификация нефтегазоматеринских пород по углеводородно-генерационному потенциалу

Углеводородно-генерационный потенциал	Содержание $C_{орг}$, % масс.	Параметры Rock-Eval, мг УВ/г породы	
		S_1	S_2
бедные	< 0–0,5	< 0–0,5	< 0–2,5
удовлетворительные	0,5–1	0,5–1	2,5–5
хорошие	1–2	1–2	5–10
очень хорошие	2–4	2–4	10–20
отличные	> 4	> 4	> 20

где $C_{орг}$ – содержание в породе органического углерода, % масс.; S_1 – содержание свободной нефти, мг УВ/г породы; S_2 – нефтегенерационный потенциал, мг УВ/г породы.

Таблица 2 – Индекс водорода для разных типов керогена и тип генерируемых углеводородов

Основные типы	Тип керогена	HI (мг УВ/ $C_{орг}$)	Преимущественный состав генерируемых углеводородов
Сапропелевый	I	> 600	нефть, газ
	II	300–600	нефть, газ
Гумусовый	III	50–300	газ, небольшое количество нефти

Органическое вещество баженовской свиты относится к сапропелевому и частично гумусовому типам.

Обзор существующих методов повышения нефтеотдачи сланцевых коллекторов

Стоит отметить, что разработка традиционных залежей углеводородов значительно отличается от сланцевых. Это обусловлено различием условий формирования и геологической особенностью строения сланцевых формаций. На рисунке 3 представлены отличия формирования традиционной залежи и сланцевой.

Рассмотрим существующие подходы к добыче нефти сланцевых объектов.

Поскольку сланцевые коллекторы отличаются низкими фильтрационно-емкостными свойствами и имеют сложное геологическое строение, основными методами повышения нефтеотдачи являются бурение горизонтальных скважин (ГС) с проведением многостадийного ГРП и тепловые методы.

На текущий момент основной технологией разработки сланцевых пород являются методы, направленные на извлечение подвижных УВ посредством бурения ГС с МГРП (табл. 3).

Опыт бурения горизонтальных скважин с последующим проведением многостадийного ГРП в качестве технологии освоения трудноизвлекаемых запасов с пониженными фильтрационно-емкостными свойствами отмечается не только за рубежом, но и в России.

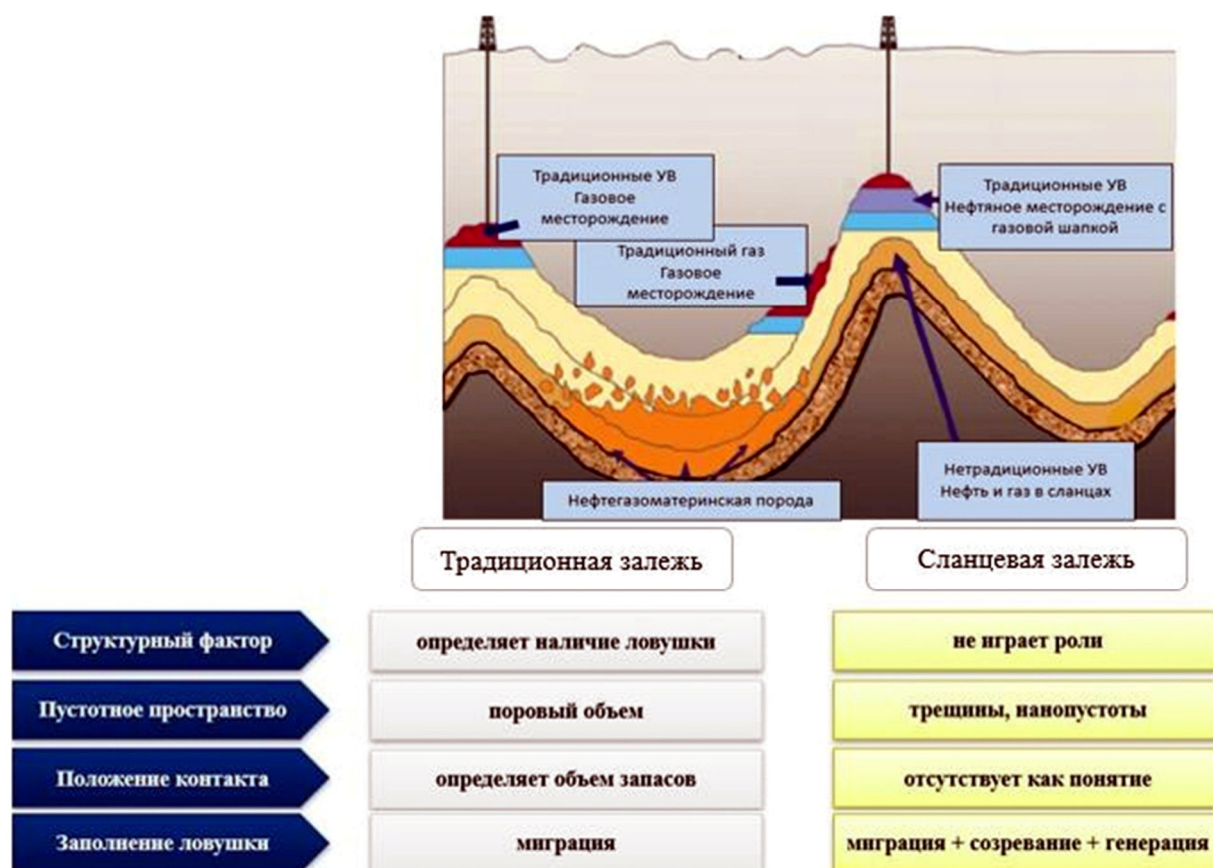


Рисунок 3 – Схема традиционной и сланцевой залежи

Таблица 3 – Существующие подходы к добыче нефти сланцевых объектов (подвижные УВ)

Метод разработки	КИН, %	Технология МГРП	Система заканчивания
МГРП	6	Slickwater, Hybrid и др.	Plug & Perf и др.
МГРП + CO ₂	9–12	Slickwater	Plug & Perf с закачкой CO ₂
МГРП + ПАВ	12–15	Slickwater	Plug & Perf с закачкой ПАВ

Дочернее общество компании «Газпром нефти» технологический центр «Бажен» на протяжении последних лет тестирует новые технологии освоения баженовской свиты на Пальяновской площади Краснотеневского месторождения в ХМАО, где пробурено 20 высокотехнологичных скважин и проведено более 250 операций многостадийного ГРП, что позволило увеличить приток из баженовской свиты в 2,2 раза. В ПАО «Газпром нефть» были опробованы технологии ГС с МГРП. Схематичное изображение технологии представлено на рисунке 4.

Данная технология позволяет проводить закачку жидкости с проппантом или кислоты в выбранные интервалы горизонтального ствола скважины.

Среди компоновок для проведения МГРП можно выделить следующие:

- 1) цементируемый хвостовик с муфтами ГРП;
- 2) нецементируемый хвостовик с системой заколонных пакеров и муфт ГРП;
- 3) цементирование хвостовика с выполнением перфорации и использованием систем изоляции интервалов.

В настоящее время данной компанией опробованы следующие технологии:

- ГС с длинами ствола от 400 до 1500 м;
- МГРП с числом стадий от 4 до 30 и массой проппанта на стадию от 33 до 140 тонн, максимальная масса проппанта на скважину – 1187 тонн;
- установка равнопроходных цементируемых хвостовиков с целью проведения адресных инициаций трещин и определение влияния их числа на продуктивность (11 скважин);
- кластерный МГРП (около 50 скважино-операций);
- раздвижные муфты многократного использования для открытия (закрытия) порта (более 80 скважин).

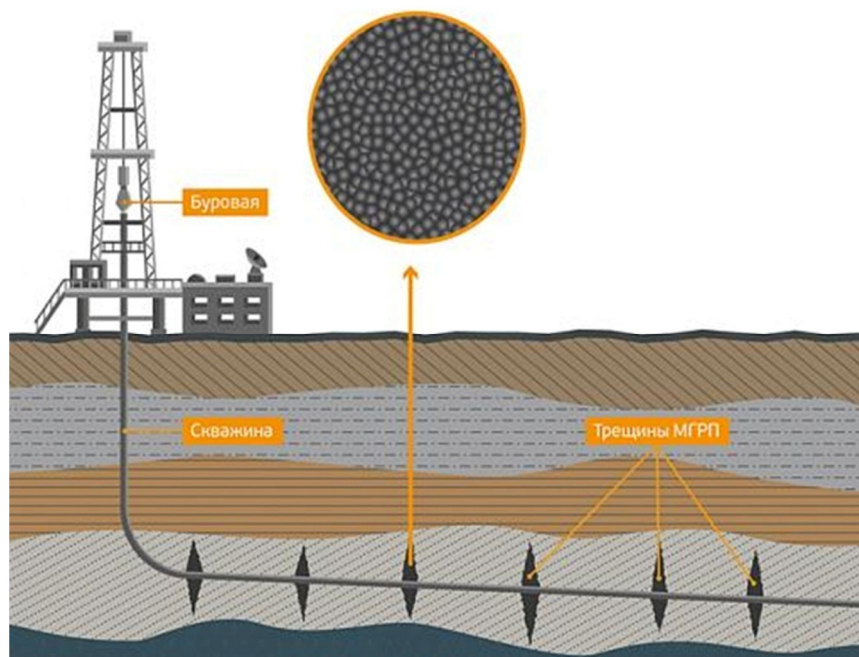


Рисунок 4 – Бурение горизонтальной скважины с последующим проведением МГРП

На начало 2017 года фонд ГС с МГРП составлял около 200 скважин (или 14 % действующего фонда), эти скважины обеспечивают сегодня примерно 24 % всей суточной добычи нефти.

Отложения баженовской свиты часто сравнивают с отложениями Баккена. При разработке сланцевой формации Баккен хорошо себя зарекомендовала и доказала свою эффективность технология «Plug & Perf». Применение данной технологии также может привести к хорошим результатам в Западной Сибири. При использовании данной технологии отмечается наибольшее образование трещин в пласте (рис. 5) и наибольшая добыча углеводородов.

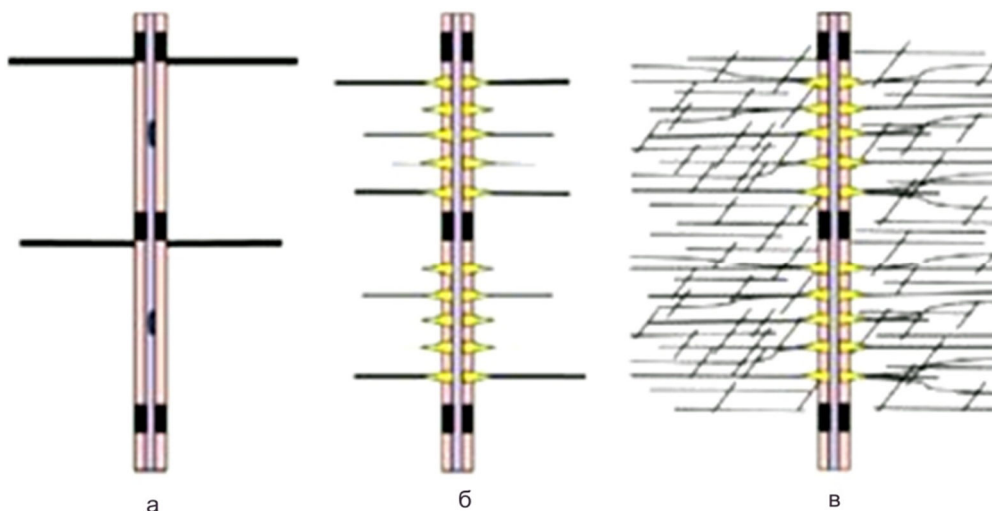


Рисунок 5 – Создание трещиноватости в пласте при различных методах проведения ГРП:

- а – низкая скорость закачки жидкости ГРП, небольшой объём закачиваемого геля (технология «Siding Sleeves»);
- б – низкая скорость закачки жидкости ГРП, небольшой объём закачиваемого геля (технология «Plug & Perf»);
- в – высокая скорость закачки жидкости ГРП, большой объём закачиваемой воды (технология «Plug & Perf»)

При проведении МГРП в горизонтальных скважинах по технологии «Plug & Perf» используется следующая схема:

- 1) расстояние между интервалами перфорации от 10 до 15 метров;
- 2) длина интервала перфорации – четырёхкратный диаметр ствола;
- 3) число интервалов перфорации на каждую стадию ГРП 4–8;
- 4) число интервалов зависит от возможных скоростей закачки при ГРП: 0,235 м³/мин. через одно перфорационное отверстие, 1,5–2,3 м³/мин. на интервал.



На сегодняшний день в планы ряда компаний входит использование технологии «Plug & Perf» при испытании отложений баженовской свиты. При планируемой технологии заканчивания используется нецементируемый хвостовик 114 мм, толщина стенки 7 мм, подвесное устройство хвостовика и полированное седло, с установкой саморазбухающих пакеров через 100 м. На башмаке хвостовика устанавливается одна скользящая муфта для проведения первой стадии ГРП без перфорации.

Сама перфорация проводится по технологии «Plug&Perf». На одну стадию производится перфорация 5 интервалов – через 15–16 м каждый, длина одного перфорированного интервала 0,5 м. Доставка перфосборки с пробкой в интервал перфорации производится закачкой жидкости продавки по окончании очередной стадии. Выполнение основных стадий перфорации планируется без применения НКТ – закачка жидкости будет осуществляться по эксплуатационной колонне диаметром 173 мм, переходящей на хвостовик диаметром 114 мм.

Более перспективной технологией для разработки баженовской свиты является внутрислово-вый нагрев (рис. 6), позволяющий под действием высоких температур превращать кероген в жидкие и газообразные углеводороды, а также формировать дополнительные трещины, что позволяет повысить коэффициент извлечения нефти и газа за счёт увеличения дренируемых зон.

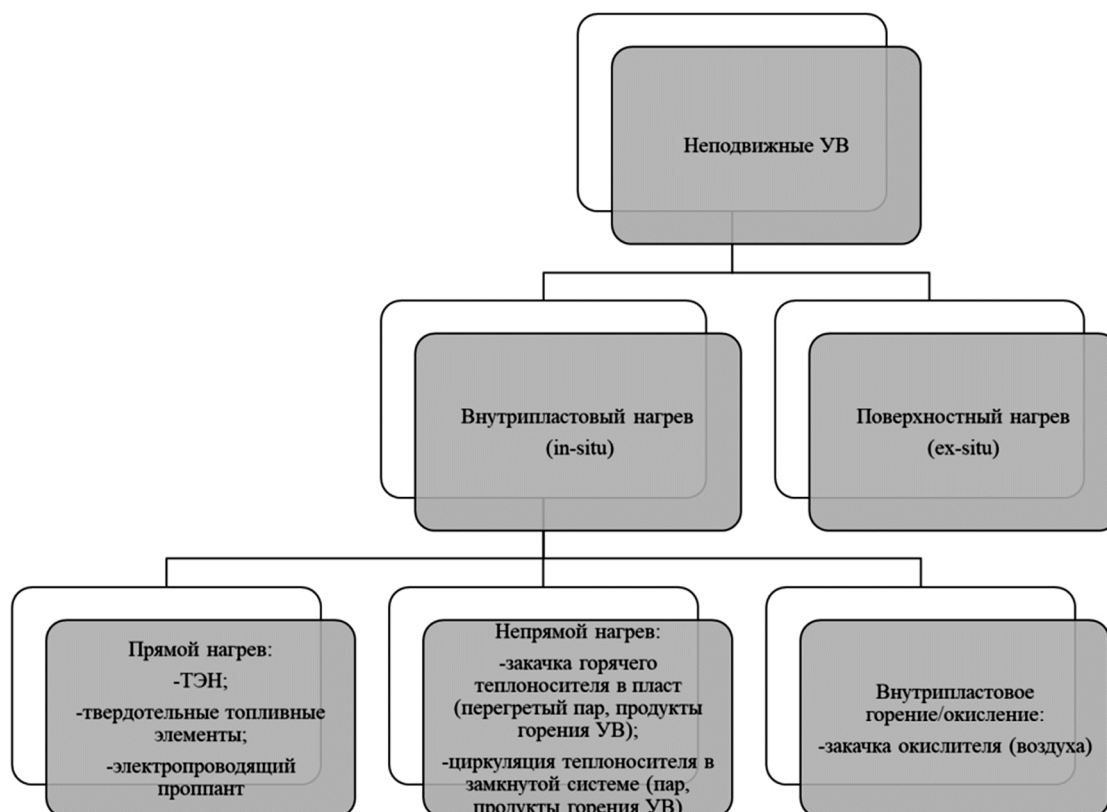


Рисунок 6 – Существующие подходы к добыче нефти сланцевых объектов (неподвижные УВ)

На сегодняшний день существует множество зарубежных энергоэффективных методов внутрислово-вого нагрева. Один из инновационных методов прямого внутрислово-вого ретортинга был разработан компанией «Shell». Технология «Shell» «In-Situ Process» (ICP) (рис. 7) заключается в местном нагреве участка пласта путём сочетания нагревающих и замораживающих скважин.

После подготовки месторождения к добыче по его контуру устанавливают «замораживающие стены», далее бурят добывающие скважины, через которые вместо нефти сначала поступает вода, и пласт обезвоживается. Создание «замораживающих стен» при помощи закачки в замораживающие скважины водного аммиака позволяет равномерно прогреть изолированный сланцевый пласт. Отдельно бурят «нагревательные скважины», в которых тепловые насосы нагревают сланцевые пласты до 200 °С, за счёт чего начинается перегонка нефти внутри пласта. Для получения на устье добывающих скважин смесь низкокипящих углеводородов в нагнетательные скважины закачивают лёгкие углеводороды. Данный способ нагрева позволяет начать переработку органического вещества сланца в нефть и газ непосредственно под землёй, добыча продуктов пиролиза производится традиционными методами.

Ещё один из методов прямого внутрислово-вого ретортинга предложен американской компанией «Chevron Corporation» (рис. 8). Нагрев пласта в данном методе происходит за счёт нагнетания в скважину под большим давлением нагретого природного газа. Энергетическая эффективность достигается за счёт рециркуляции воздуха через отработанные пласты под высоким давлением. Фактически воздух выступает в качестве теплоносителя, нагреваясь в отработанных пластах за счёт сгорания тя-



жѐлых углеводородных остатков, поступает в новые добычные пласты через нагнетательные скважины, где за счёт собственной высокой температуры стимулирует распад керогена.

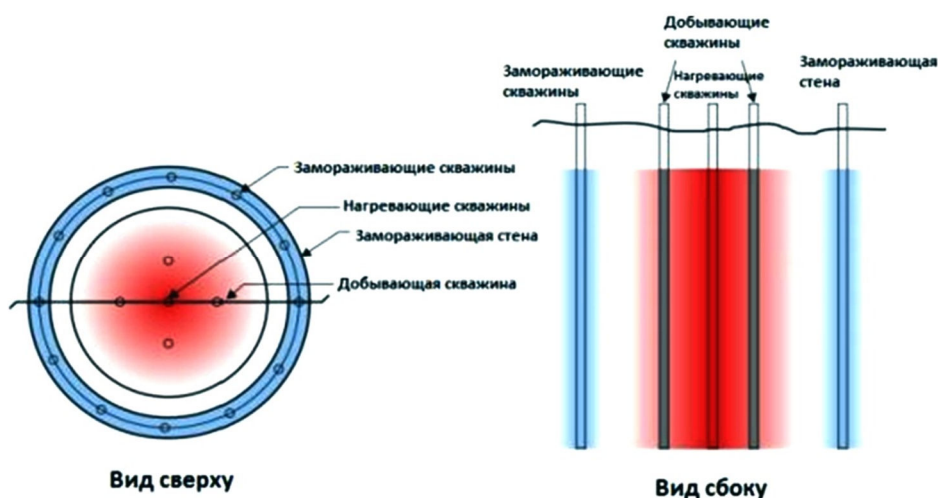


Рисунок 7 – Технология «Shell» «In-Situ Process»

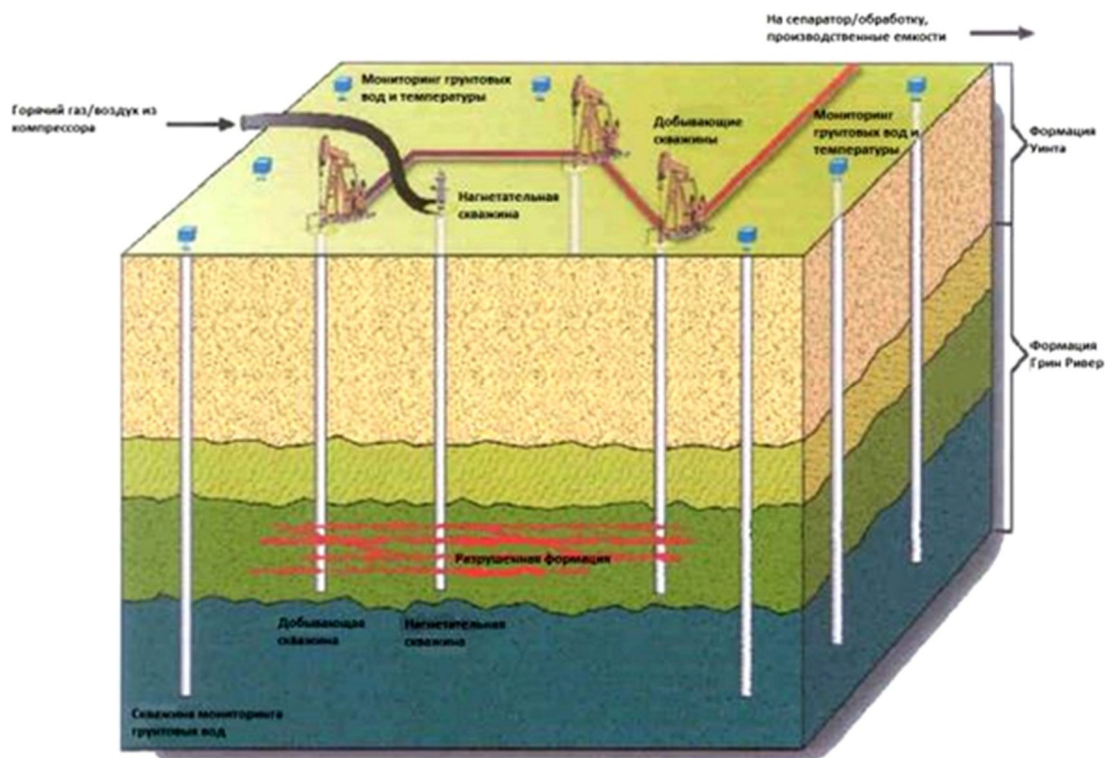


Рисунок 8 – Технология «Chevron» «In-Situ Process»

Также к технологии внутрипластового ретортинга можно отнести технологию гидроразрыва с проводящим материалом «ExxonMobil» «Electofrac». Под воздействием электричества электропроводящий флюид нагревает сланцевый пласт и содержащийся в нём кероген (рис. 9). Дальнейшая добыча нефти происходит традиционными способами.

Проведѐм сравнительный анализ основных типов технологий подвода тепла в пласт (табл. 4).

Используемые параметры для проведения оценки согласно геологическим особенностям строения баженовской свиты:

- пористость до 10 %;
- проницаемость ~ 0,0005 мД;
- пластовое давление 280–450 атм.;
- пластовая температура 90–120 °С;
- ОВ твёрдая фаза (кероген) 13–18 %;
- В жидкая фаза ~ 2 %.

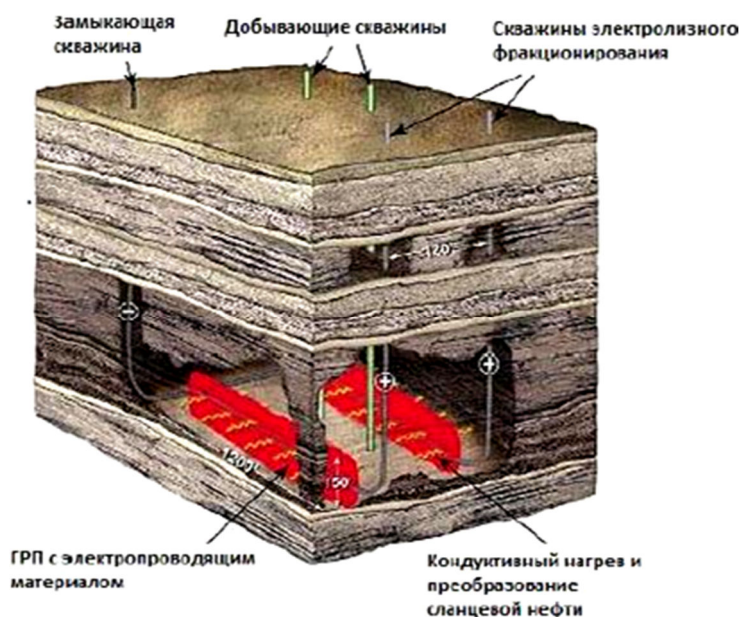


Рисунок 9 – Технология «ExxonMobil» «Electofrac»

Таблица 4 – Условия применения технологий подвода тепла в пласт

Методы воздействия	Глубина залегания (2800-3000м)	ФЕС (Кпр ~10 ⁻⁵ мД)	Толщина (30-40м)	Пластовое давление (300-400атм)	Контролируемость процесса	Радиус воздействия
Внутрипластовое горение, ТГВ	Green	Yellow	Green	Red	Red	Green
Закачка агента в виде CO ₂ , находящегося в сверхкритическом состоянии	Yellow	Green	Green	Red	Red	Red
Закачка агента в виде воды, находящейся в сверхкритическом состоянии	Red	Green	Green	Red	Red	Red
Высокочастотные волны	Green	Yellow	Green	Green	Green	Red
Электронагрев	Green	Yellow	Yellow	Green	Green	Red
Геотермические тепловыделяющие элементы	Green	Yellow	Green	Green	Green	Red
Закачка прогретого воздуха или пара	Red	Green	Green	Red	Green	Red
Поверхностные методы	Red	Green	Green	Green	Green	Red

■ Удовлетворяет условиям применения метода
■ Требуется дополнительные исследования
■ Критичный фактор

Исходя из предложенной информации, потенциально возможным методом воздействия в условиях бажендовской свиты могут быть тепловые методы с использованием энергии пласта (термогазовое воздействие, внутрипластовое горение) при выполнении следующего условия: предварительного создания равномерной проницаемой среды.

С одной стороны, органическое вещество обладает «хорошими» окислительными способностями, с другой, доступ кислорода к керогену ограничивается низкой проницаемостью пород, и решение проблемы по улучшению фильтрационно-емкостных свойств продуктивных пластов позволит в значительной мере вовлечь в разработку содержащееся в пластах твердое органическое вещество.

Необходимо отметить разрабатываемую в настоящее время технологию внутрипластового каталитического ретортинга, в основе которой лежит физическое и химическое воздействие на пласты материнской породы с использованием рабочего агента (состоящего из сверхкритической воды, углекислого газа, углеводородных растворителей и наноразмерного катализатора) с формированием температуры до 500 °С и давления до 50 МПа.



В ходе реализации указанной технологии ожидается генерация углеводородов из твёрдого органического вещества, увеличение подвижности нефти за счёт дробления крупных углеводородных молекул на более мелкие и повышение проницаемости продуктивных пластов на макро-, мезо- и микроуровнях.

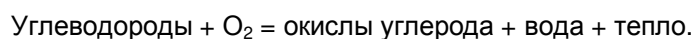
Типичные химические реакции, происходящие в пласте при высокотемпературном горении и низкотемпературном окислении

Сложность составов как нефти в целом, так и отдельных фракций делает составление полного набора химических реакций, происходящих при внутрипластовом горении (ВГ) и термогазовом воздействии (ТГВ).

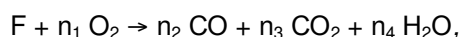
Накопленные в настоящее время достаточно многочисленные лабораторные данные позволяют указать несколько характерных типов реакций, происходящих при данных способах воздействия на пласт. Отметим, что реакции, происходящие при ВГ и ТГВ, отличаются от реакций, протекающих при термической переработке твёрдых горючих сланцев в специальных химических реакторах на поверхности. Главными в обоих типах воздействия (ВГ и ТГВ) являются 3 вида реакций:

- 1) реакции с разрывом связей в молекуле;
- 2) реакции с присоединением кислорода к молекуле;
- 3) термическое преобразование, иными словами, термолиз (пиролиз).

Первый тип реакций, по сути, является реакциями горения; их можно представить схематично в следующем виде:



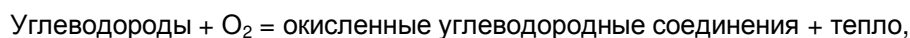
В тяжёлой нефти при температурах выше 350 °С этот тип реакций играет заметную роль (эта температура часто называется «порогом воспламенения»), а при температуре выше 450 °С является преобладающим. В лёгкой нефти такие реакции начинаются при более низких температурах, близких к пластовым или несколько более высоких, во всяком случае, они наблюдались при температурах 150–300 °С. В частности, начальное самовоспламенение лёгкой нефти начинается уже при повышении температуры прискважинной зоны выше 210 °С. Тем не менее, в лёгкой нефти такой тип реакций играет подчинённую роль ввиду небольшого содержания высокомолекулярных соединений; основным типом реакций является низкотемпературное окисление, рассмотренное ниже. Полное сгорание топлива приводит к образованию CO₂ и H₂O, неполное сгорание – к образованию CO и H₂O. Упрощённо реакции горения топлива, образовавшегося в результате предварительного окисления, описывают следующей формулой:



где F – полутвёрдый остаток, образующийся при преобразовании пластовой нефти в результате низкотемпературного окисления, предшествующего горению; коэффициенты n_i определяются экспериментально.

Этот остаток F часто называют «коксом». Реакции такого типа являются гетерогенными (газ / твёрдое тело) и (газ / жидкость) и экзотермическими (температура системы во время процессов горения самопроизвольно возрастает).

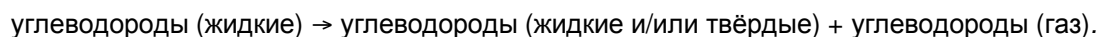
Реакции низкотемпературного окисления схематично можно представить в следующем виде:



где окисленные соединения представлены альдегидами, спиртами, кетонами, гидроперекисями, карбоновыми кислотами, фенолами и т.д. При этом количество образующихся оксидов углерода крайне незначительно.

Этот тип реакций при окислении тяжёлой нефти преобладает при температурах ниже 300–350 °С, а при окислении лёгкой нефти – при температурах ниже 150 °С. При сравнительно низких температурах этот тип реакций вызывает увеличение вязкости и плотности тяжёлой нефти, увеличение её молекулярной массы и доли асфальтенов в нефти.

Третий тип реакций, термическое преобразование или термолиз, происходящее только за счёт повышения температуры в пласте при недостатке или отсутствии кислорода, которое происходит приблизительно по следующей схеме:



В качестве реагирующих веществ могут быть как исходные углеводороды нефти, так и продукты её низкотемпературного окисления, в том числе и кислородсодержащие соединения. Этот третий тип реакций крайне важен при ВГ и ТГВ, поскольку именно при этом процессе образуется большая часть топлива для последующего горения. Эти реакции являются эндотермическими, т.е. идут с поглощением тепла.



Опыт применения метода внутрислового горения (окисления) при разработке баженоской свиты

Исследователями был проведен ряд экспериментов на породах баженоской свиты Сахалинского и Быстринского месторождений по определению зависимости температуры инициирования процесса горения от удельной поверхности контакта породы и кислорода воздуха. Согласно исследованиям, температура инициирования процесса горения на породах баженоской свиты находится в диапазоне от 110 до 410 °С. Отмечается, что создание новой системы трещин обеспечит необходимую величину площади контакта для инициирования процесса горения и применение специальных инициаторов горения не потребуется.

Повышение температуры для всех литотипов нефтекерогеносодержащих пород оказывает позитивное влияние на улучшение фильтрационно-емкостных свойств низкопроницаемых коллекторов, обусловленное увеличением общей пустотности и трещиноватости.

Стоит отметить реализацию опытно-промышленных работ в ПАО «Лукойл» на опытном участке Средне-Назымском месторождении. Одними из главных предпосылок применения термогазового воздействия являются зависимость определения фильтрационно-емкостных свойств породы баженоской свиты уровнем температуры и значительное содержание керогена в породе. Именно интегрированное воздействие водовоздушной смесью на пласт позволяет обеспечить самопроизвольные окислительные процессы кислорода с углеводородами, находящимися в пласте, в результате которых образуется вытесняющий газовый агент.

Для отработки данной технологии был создан опытный участок, который состоит из одной нагнетательной и четырех добывающих скважин (рис. 10), комплекса наземного оборудования, состоящего из воздушной компрессорной установки, насосной установки, дизельной электростанции, операторной, индивидуальных замерных установок на устьях добывающих скважин и др.). Воздух из атмосферы, сжимаясь в компрессорном блоке до необходимого давления, подается в скважину совместно с водой из артезианской скважины с помощью насосного блока (рис. 11).

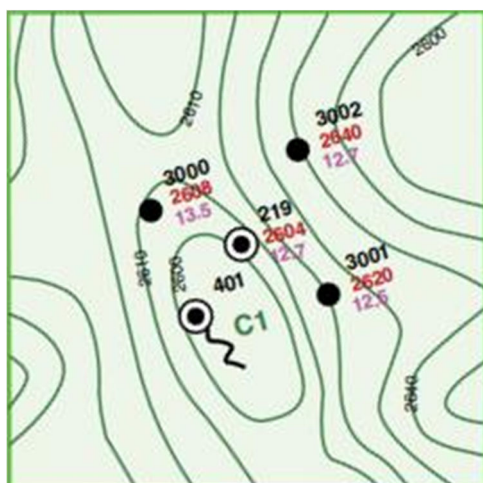


Рисунок 10 – Схема участка ТГВ № 1 Средне-Назымского месторождения



Рисунок 11 – Принципиальная схема реализации термогазового воздействия

За период эксперимента в нагнетательную скважину закачано более 6 млн nm^3 воздуха. При реализации термогазового воздействия в скважинах опытного участка наблюдается рост пластового давления на 20–100 атм. В ходе проведения данного эксперимента были получены промышленные результаты, которые доказывают существенное влияние термогазового воздействия на породы баженоской свиты. Во-первых, отмечаются активные внутрисловые окислительные процессы, этому подтверждение – значительный рост в добываемом газе углекислого газа до 16 % об., азота до 45 % об., отсутствие кислорода (рис. 12).

Во-вторых, увеличение до двукратного объема добываемых углеводородных газов и увеличение доли добычи углекислого газа говорит о том, что в качестве топлива при окислительных процессах выступает кероген. Также наблюдается изменение группового состава нефти: увеличивается содержание лёгких углеводородов ($\text{C}_1 - \text{C}_7$) (рис. 13), вследствие чего снижается вязкость и плотность нефти.

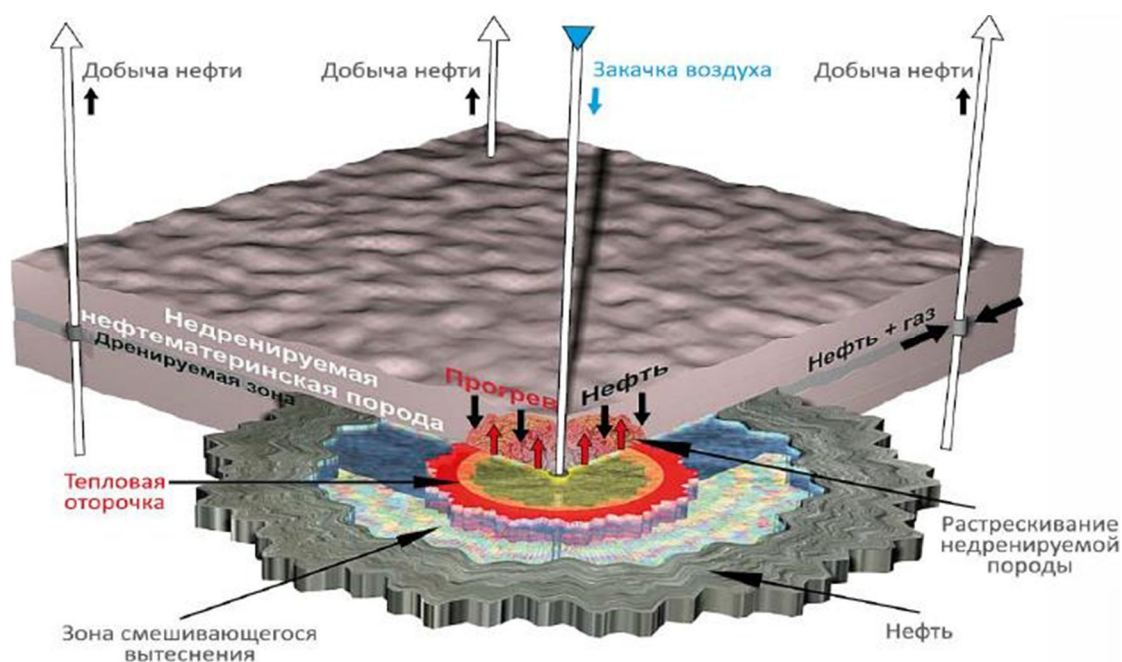


Рисунок 12 – Схема применяемого метода компанией ПАО «Лукойл»

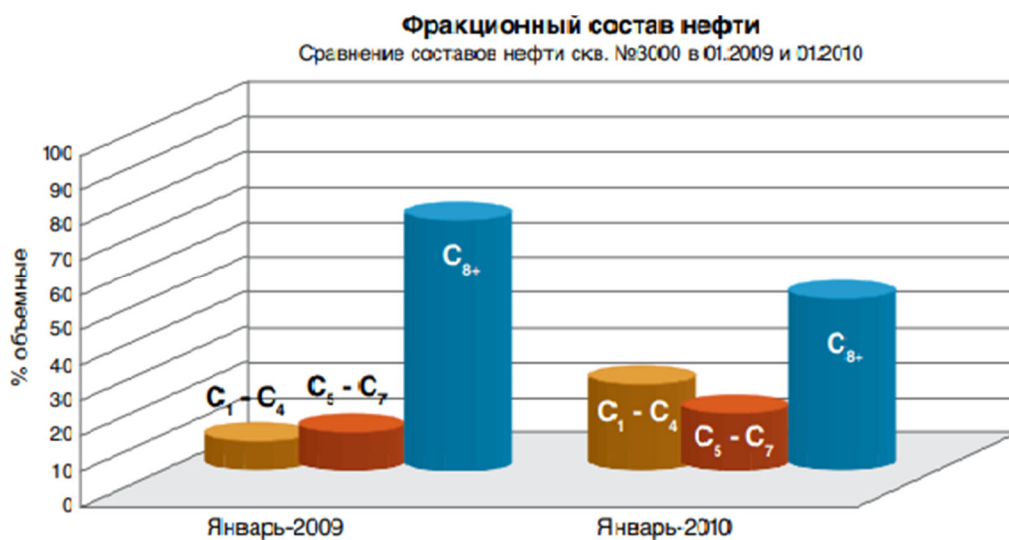


Рисунок 13 – Изменения фракционного состава нефти

Предлагаемый технологический подход

Таким образом, обобщая опыт применения термогазового воздействия на опытных промысловых участках за рубежом и в России, можно сформировать технологический подход разработки баженовской свиты методом внутрипластового горения:

- выбор отработанных участков пласта Ю₀ (т.е. после извлечения имеющихся подвижных УВ) для применения технологии закачки окислителя и инициирования внутрипластового горения / окисления;
- закачка окислителя (инициирование процесса окисления / горения), оценка скорости генерации синтетических УВ и их накопления в вышележащих интервалах за счёт миграции УВ в каналах индуцированной трещиноватости (скорость «всплытия» капелек нефти);
- выбор участков и интервалов для бурения добывающих скважин.

На рисунке 14 изображена схема реализации технологии, на рисунке 15 схематически продемонстрирована предлагаемая технология.

Полувековое освоение объектов баженовской свиты как традиционными способами, так и привнесёнными американскими технологиями в настоящее время не позволяет обеспечить рентабельность добычи углеводородного сырья, которая за весь период разработки едва превысила ~ 10 млн тонн. Для обеспечения эффективного вовлечения в разработку углеводородного потенциала твёрдого органического вещества необходимо ускорить процесс преобразования керогена в подвижные углеводороды, что возможно с помощью изменения термических условий в породах баженовской свиты.



Рисунок 14 – Схема реализации предлагаемой технологии

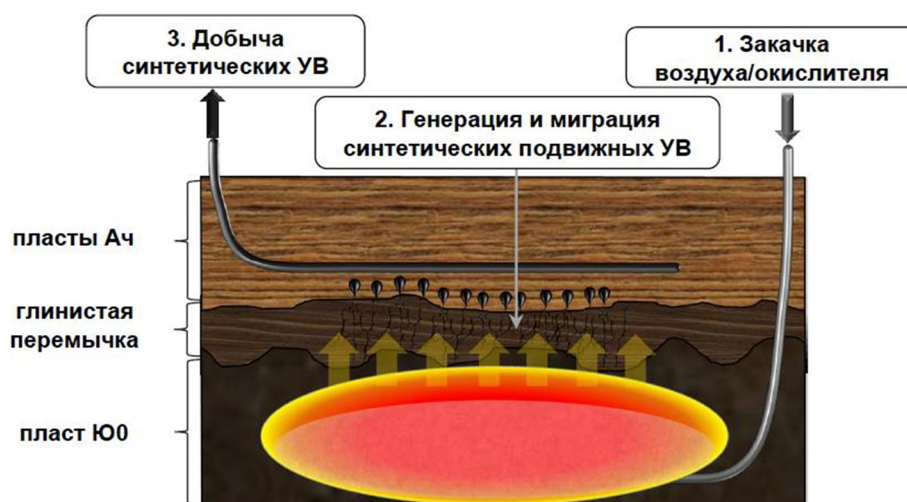


Рисунок 15 – Схематическая иллюстрация предлагаемой технологии

Список литературы:

1. Брадучан Ю.В., Гулари Ф.Г., Захаров В.А. Баженовский горизонт Западной Сибири (стратиграфия, палеогеография, экосистема, нефтеносность). – Новосибирск : Наука, 1986. – 217 с.
2. Горпинченко А.Н., Жарикова Н.Х., Савенок О.В. Геологические основы разработки нефтяных и газовых месторождений: учебное пособие. – Ухта : Ухтинский государственный технический университет, 2022. – 240 с.
3. Прищепа О.М., Ильинский А.А., Аверьянова О.Ю. Нефть и газ низкопроницаемых сланцевых толщ – резерв сырьевой базы углеводородов России. – СПб. : ВНИГРИ, 2016. – 323 с.
4. Савенок О.В., Арутюнов Т.В. Сланцевые углеводороды: анализ текущего состояния и перспективы разработки. – Краснодар : Издательский Дом - Юг, 2019. – 272 с.
5. Арутюнов Т.В., Поздняк А.Н., Савенок О.В. Перспективы разработки сланцевой нефти на примере пласта ЮС₀ Салымского месторождения // Материалы VII Всероссийской конференции «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых» (28–31 октября 2014 года, г. Пермь). – Пермь : Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2014. – С. 203–206.
6. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Анализ методов и технологий промышленной разработки месторождений углеводородов сланцевых отложений // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2014. – № 3. – С. 43–47.
7. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Состояние, тенденции и перспективы выработки запасов углеводородов из сланцевых отложений // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2014. – № 4. – С. 39–51.



8. Арутюнов Т.В., Арутюнов А.А., Савенок О.В. Перспективы разработки месторождений сланцевых отложений // *Фундаментальные проблемы науки: сборник статей Международной научно-практической конференции* (23 января 2015 года, г. Уфа). – Уфа : РИО МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2015. – С. 126–135.
9. Арутюнов Т.В., Арутюнов А.А., Савенок О.В. Методология оценки ресурсов сланцевых отложений // *Горный информационно-аналитический бюллетень* (научно-технический журнал). – 2015. – № 3. – С. 266–271.
10. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Исследование сланцевых пород и природы сланцевой нефтеносности баженовской свиты и формации Баккен // *Наука. Техника. Технологии* (политехнический вестник). – 2015. – № 1. – С. 28–46.
11. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Жизненный цикл инновационного продукта – сланцевого газа // *Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы Всероссийской с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных* (19–20 мая 2015 года, г. Тюмень). – Тюмень : Издательство Тюменского государственного нефтегазового университета, 2015. – Т. 1. – С. 49–52.
12. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Экологические проблемы при разработке месторождений сланцевых углеводородов // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. – 2015. – № 9. – С. 39–42.
13. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Технология добычи сланцевого газа и влияние на экологию // *Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: материалы XIV Международной конференции, посвящённой 20-летию Естественно-технического факультета Кыргызско-Российского славянского университета* (14–20 сентября 2015 года, Кыргызстан г. Бишкек). – М. : Издательство Российского университета дружбы народов, 2015. – С. 76–78.
14. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Анализ применения технологии термогазового воздействия на Средне-Назымском нефтяном месторождении // *Технические и технологические системы: материалы девятой Международной научной конференции «ТТС-17»* (22–24 ноября 2017 года, г. Краснодар). – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2017. – С. 217–230.
15. Арутюнов Т.В., Савенок О.В. Методология оценки запасов сланцевого газа // *Наука и технологии в нефтегазовом деле: сборник тезисов докладов Международной научно-практической конференции, посвящённой 100-летию Кубанского государственного технологического университета и 25-летию кафедры машин и оборудования нефтяных и газовых промыслов Армавирского механико-технологического института* (09-10 февраля 2018 г.). Секция 3 «Управление и мониторинг разработки месторождений нефти и газа». – Краснодар : ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2018. – С. 127–129.
16. Баженовская свита. Общий обзор, нерешённые проблемы / И.С. Афанасьев [и др.] // *Научно-технический вестник ОАО «НК Роснефть»*. – 2010. – № 4. – С. 20–25.
17. Белозеров И.П., Губайдуллин М.Г. О концепции технологии определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов на цифровой модели ядра // *Записки Горного института*. – 2020. – Т. 244. – С. 402–407.
18. Боровский М.Я., Борисов А.С., Богатов В.И. Геофизическая разведка на нетрадиционные источники углеводородного сырья // *Булатовские чтения*. – 2021. – Т. 1. – С. 31–34.
19. Гладков Е.А. Проведение прострелочно-взрывных работ под ГРП по технологии Plug & Perf для низкопроницаемых коллекторов Западной Сибири // *Горные ведомости*. – 2015. – № 1. – С. 52–57.
20. Жарикова Н.Х., Савенок О.В., Ситёв Р.Р. Особенности геологического строения баженовской свиты на примере Ай-Пимского нефтяного месторождения // *Булатовские чтения*. – 2022. – Т. 1. – С. 73–84.
21. Жарикова Н.Х., Савенок О.В., Ситёв Р.Р. Анализ геологического строения Сорковского нефтегазового месторождения по результатам изучения ядра разведочной скважины // *Булатовские чтения*. – 2022. – Т. 1. – С. 85–99.
22. Кирсанов Я.В. Высокотемпературное окисление пород пласта Ю₀ (баженовской свиты Сахалинского и Быстринского месторождений): (иницирование, кинетика) // *Сборник тезисов докладов V конференции молодых специалистов организаций, осуществляющих виды деятельности, связанной с пользованием участками недр на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры* (16–18 февраля 2005 года, г. Ханты-Мансийск). – Уфа, 2005. – С. 150–156.
23. Магомед Р.Д. Добыча сланцевого газа // *Записки Горного института*. – 2014. – Т. 207. – С. 125–130.
24. Мазурова А.С. Лабораторное моделирование теплового воздействия на горные породы баженовской свиты Мамонтовского нефтяного и Приобского нефтяного месторождений (ХМАО) / Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа природных ресурсов, Отделение нефтегазового дела; науч. рук. И.С. Хомяков. – Томск, 2022.
25. Манылова М.В. Перспективы развития сланцевой промышленности России на основе инновационного проекта // *Записки Горного института*. – 2005. – Т. 161. – С. 46–48.
26. Никитина Е.А., Толоконский С.И., Гришин П.А. Особенности теплового воздействия на керогенсодержащую породу баженовской свиты // *Нефтяное хозяйство*. – 2017. – № 2. – С. 68–71.



27. Савенок О.В., Кусова Л.Г. Анализ геологического строения баженовской свиты и критерии прогноза её нефтегазоносности // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2022. – № 3. – С. 164–181.

28. Перспективы добычи нефти из отложений баженовской свиты / А.А. Севастьянов [и др.] // Neftegaz.RU. – 2018. – № 3. – С. 35–40.

List of references:

1. Braduchan Yu.V., Gurari F.G., Zakharov V.A. Bazhenov horizon of Western Siberia (stratigraphy, paleogeography, ecosystem, oil-bearing capacity). – Novosibirsk : Nauka, 1986. – 217 p.

2. Gorpichenko A.N., Zharikova N.Kh., Savenok O.V. Geological bases of oil and gas fields development: textbook. – Ukhta : Ukhta State Technical University, 2022. – 240 p.

3. Prischepa O.M., Ilyinsky A.A., Aveyanova O.Yu. Oil and gas of low-permeability shale strata – the reserve raw hydrocarbon base of Russia. – SPb. : VNIGRI, 2016. – 323 p.

4. Savenok O.V., Arutyunov T.V. Shale hydrocarbons: analysis of the current state and development prospects. – Krasnodar : Publishing House – Yug, 2019. – 272 p.

5. Arutyunov T.V., Pozdnyak A.N., Savenok O.V. Prospects of shale oil development by the example of the YuS0 formation of the Salym field // Materials of the VII All-Russian Conference «Problems of Hydrocarbon and Ore Mineral Fields Development» (28–31 October 2014, Perm). – Perm : Publishing house of Perm National Research Polytechnic University, 2014. – P. 203–206.

6. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Analysis of methods and technologies of industrial development of hydrocarbon deposits of shale deposits // Science. Engineering. Technologies (Polytechnic Bulletin). – 2014. – № 3. – P. 43–47.

7. Arutyunov T.V., Savenok O.V. State, trends and prospects of hydrocarbon reserves from shale deposits // Science. Engineering. Technologies (Polytechnic Bulletin). – 2014. – № 4. – P. 39–51.

8. Arutyunov T.V., Arutyunov A.A., Savenok O.V. Prospects for the development of shale deposits // Fundamental problems of science: collection of articles of the International Scientific–Practical Conference (January 23, 2015, Ufa). – Ufa : OMEGA SIGNS RIO, 2015. – P. 126–135.

9. Arutyunov T.V., Arutyunov A.A., Savenok O.V. Methodology of resource assessment of shale deposits // Mountain Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). – 2015. – № 3. – P. 266–271.

10. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Study of shale rocks and the nature of shale oil-bearing formation of the Bazhenov Formation and Bakken Formation // Science. Engineering. Technologies (Polytechnic Bulletin). – 2015. – № 1. – P. 28–46.

11. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Life cycle of innovative product – shale gas // New technologies – oil and gas region: materials of All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists (19–20 May 2015, Tyumen). – Tyumen : Publishing house of Tyumen State Oil and Gas University, 2015. – V. 1. – P. 49–52.

12. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Environmental problems in the development of shale hydrocarbon deposits // Environmental Protection in Oil and Gas Complex. – 2015. – № 9. – P. 39–42.

13. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Technology of shale gas extraction and impact on the environment // Resource-reproducing, low-waste and environmental technologies of subsurface development: Proceedings of the XIV International Conference dedicated to the 20th anniversary of the Faculty of Science and Technology of the Kyrgyz–Russian Slavic University (14–20 September 2015, Kyrgyzstan, Bishkek). – M. : Publishing House of Peoples' Friendship University of Russia, 2015. – P. 76–78.

14. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Analysis of application of thermal gas impact technology at Sredne-Nazymyskoye oil field // Technical and technological systems: Proceedings of the Ninth International Scientific Conference "TTS-17" (22–24 November 2017, Krasnodar). – Krasnodar : Publishing House – Yug, 2017. – P. 217–230.

15. Arutyunov T.V., Savenok O.V. Methodology of shale gas reserves assessment // Science and technology in oil and gas business: collection of abstracts of the International scientific–practical conference dedicated to the 100th anniversary of Kuban State Technological University and the 25th anniversary of the department of machines and equipment of oil and gas fields of Armavir Mechanical and Technical Institute (09–10 February 2018). Section 3 «Management and monitoring of oil and gas field development». – Krasnodar : FGBOU VO «KubGTU», 2018. – P. 127–129.

16. Bazhenov Formation. General overview, unresolved problems / I.S. Afanasyev [et al.] // Scientific–technical bulletin of OJSC «NK Rosneft». – 2010. – № 4. – P. 20–25.

17. Belozherov I.P., Gubaidullin M.G. On the concept of technology for determining filtration–volume properties of terrigenous reservoirs on a digital core model // Notes of the Mining Institute. – 2020. – V. 244. – P. 402–407.

18. Borovsky M.Y., Borisov A.S., Bogatov V.I. Geophysical exploration for unconventional sources of hydrocarbon raw materials // Bulatov Readings. – 2021. – V. 1. – P. 31–34.



19. Gladkov E.A. Prostrelno–blasting under fracturing using Plug & Perf technology for low–permeability reservoirs of Western Siberia // *Gornye Vedomosti*. – 2015. – № 1. – P. 52–57.
20. Zharikova N.Kh., Savenok O.V., Sityov R.R. Features of the geological structure of the Bazhenov formation by the example of the Ai-Pim oil field // *Bulatov readings*. – 2022. – V. 1. – P. 73–84.
21. Zharikova N.Kh., Savenok O.V., Sitev R.R. Analysis of the geological structure of the Sorovskoye oil–gas field based on the results of exploratory well core studies // *Bulatov Readings*. – 2022. – V. 1. – P. 85–99.
22. Kirsanov Y.V. High–temperature oxidation of reservoir rocks of Yu0 formation (Bazhenov Formation of Sakhalin and Bystrinskoye fields): (initiation, kinetics) // *Collection of abstracts of reports of the V conference of young specialists of the organizations engaged in activities related to the use of subsurface sites on the territory of Khanty–Mansiysk Autonomous Okrug – Ugra (16–18 February 2005, Khanty–Mansiysk)*. – Ufa, 2005. – P. 150–156.
23. Magomet R.D. Extraction of shale gas // *Notes of the Mining Institute*. – 2014. – V. 207. – P. 125–130.
24. Mazurova A.S. Laboratory modeling of thermal impact on rocks of the Bazhenov Formation of the Mamontovskoye oil and Priobskoye oil fields (KhMAO) / National Research Tomsk Polytechnic University, Engineering School of Natural Resources, Department of Oil and Gas Engineering; supervisor. I.S. Khomyakov. – Tomsk, 2022.
25. Manylova M.V. Prospects for the development of the Russian oil shale industry on the basis of the innovation project // *Notes of the Mining Institute*. – 2005. – V. 161. – P. 46–48.
26. Nikitina E.A., Tolokonskii S.I., Grishin P.A. Features of thermal impact on the kero-gene-bearing rock of the Bazhenov Formation // *Oil Industry*. – 2017. – № 2. – P. 68–71.
27. Savenok O.V., Kusova L.G. Analysis of the geological structure of the Bazhenov formation and criteria for predicting its oil and gas content // *Nauka. Technology. Technology (Polytechnic Bulletin)*. – 2022. – № 3. – P. 164–181.
28. Prospects of oil production from deposits of the Bazhenov Formation / A.A. Sevastyanov [et al.] // *Neftegaz.RU*. – 2018. – № 3. – P. 35–40.