

Научная статья

УДК 553.982

DOI: 10.15372/KhUR2025650

EDN: LUOUBI

Экологические вопросы разработки металлоносной нефти баженовской свиты

И. Г. ЯЩЕНКО , И. В. РУССКИХ*Институт химии нефти СО РАН, Томск, Россия**E-mail: sric@ipc.tsc.ru[✉], rus@ipc.tsc.ru*

Аннотация

Приведен анализ характеристик металлоносной нефти баженовской свиты Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна, при разработке которой существует опасность попадания тяжелых металлов (например, ванадия и никеля) в окружающую среду в процессе добычи, транспортировки и переработки нефти. В работе использованы информация из базы данных Института химии нефти СО РАН (Томск) и методы статистического и пространственного анализа географических информационных систем. На основе классификации трудноизвлекаемой нефти выявлены месторождения баженовской свиты с высоким и средним содержанием ванадия и никеля. Показано распределение нефти из указанных месторождений по глубине залегания. С ростом глубины залегания содержание металлов в нефти уменьшается почти на порядок. Выявлены литологические особенности пород коллекторов: металлоносная баженовская нефть находится в основном в песчаниках (86.2 % образцов нефти) и песчано-алевролитовых породах (13.8 % образцов), что подтверждает принадлежность коллекторов свиты к терригенному типу. Определены средние значения пластовых параметров, характеризующих фильтрационно-емкостные свойства залежей месторождений. Для проведения анализа металлоносной баженовской нефти использована выборка объемом 68 образцов нефти из 33 месторождений Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. Результаты исследования могут быть использованы при разработке новых и совершенствовании существующих методов и технологий добычи и переработки металлоносной нефти с учетом экологических последствий.

Ключевые слова: металлоносная нефть, баженовская свита, ванадий, никель, месторождения, Западно-Сибирский нефтегазоносный бассейн

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Института химии нефти СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИОКТР № 121031500046-7).

Для цитирования: Ященко И. Г., Русских И. В. Экологические вопросы разработки металлоносной нефти баженовской свиты // Химия в интересах устойчивого развития. 2025. Т. 33, № 2. С. 256–266. DOI: 10.15372/KhUR2025650. EDN: LUOUBI.

Original article

Environmental issues of the development of metalliferous oil of the Bazhenov Formation

I. G. YASHCHENKO , I. V. RUSSKIKH*Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia**E-mail: sric@ipc.tsc.ru , rus@ipc.tsc.ru*

Abstract

Analysis of the properties of the Bazhenov Formation metalliferous oil from the West Siberian oil and gas basin is presented. During the development of these oil reserves, there is a danger of heavy metals (for example, vanadium and nickel) entering the environment during oil extraction, transportation and refining. The information from the database of the Institute of Petroleum Chemistry SB RAS (Tomsk) and the methods of statistical and spatial analysis of geographical information systems are used in the work. Based on the classification of hard-to-recover oil, deposits of the Bazhenov Formation with high and medium vanadium and nickel content have been identified. The distribution of oil from these fields over the depth of occurrence is shown. With an increase in the depth of occurrence, the concentration of metals in oil decreases by almost an order of magnitude. The lithological features of reservoir rocks have been revealed: metalliferous Bazhenov oil is mainly found in sandstones (86.2 % of oil samples) and in sandy-siltstone rocks (13.8 % of samples), which confirms that the reservoirs of the formation belong to the terrigenous type. The average values of reservoir parameters characterising filtration properties and the capacity of deposits are determined. To analyse metalliferous Bazhenov oil, a set of 68 oil samples from 33 fields in the West Siberian oil and gas basin was used. The results obtained in the study can be used in the development of new methods and technologies, and improvement of the existing ones, for the extraction and processing of metalliferous oil, taking into account environmental consequences.

Keywords: metalliferous oil, Bazhenov Formation, vanadium, nickel, deposits, West Siberian oil and gas basin

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 2010 года, в России ежегодно добывается ≥ 500 млн т нефти (рис. 1). Усовершенствование известных, апробирование и ввод новых инновационных технологий добычи трудноизвлекаемой нефти, повышение качества знаний о добываемом углеводородном сырье позволили держать планку добычи на таком высоком уровне. Будущее нефтепроизводства для России – это трудноизвлекаемая нефть ввиду истощения запасов традиционно добываемого сырья [1–3]. Известно, что включение в разработку трудноизвлекаемой нефти создает различные технологические, экологические и экономические проблемы.

В России первое место по запасам трудноизвлекаемой нефти занимает баженовская сви-

та (БС) Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна (НГБ) [1–3]. Считается, что основное и приоритетное направление разработки и добычи баженовской нефти – это горизонтальное бурение, а именно технология гидроразрыва пласта [4, 5]. Для достаточно высокой экономической эффективности нефтедобычи из баженовских отложений с применением данной технологии требуются значительные инвестиции по сравнению с разработкой традиционных ресурсов. В настоящее время эта технология успешно использована в продуктивных пластах БС Новопортовского, Красноленинского, Вынгайхинского, Пальяновского месторождений. Для изучения и реализации ресурсов БС в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре (ХМАО) создан технологический центр “Бажен”, в Томской обл. на Еллейском и Арчинском месторождениях от-

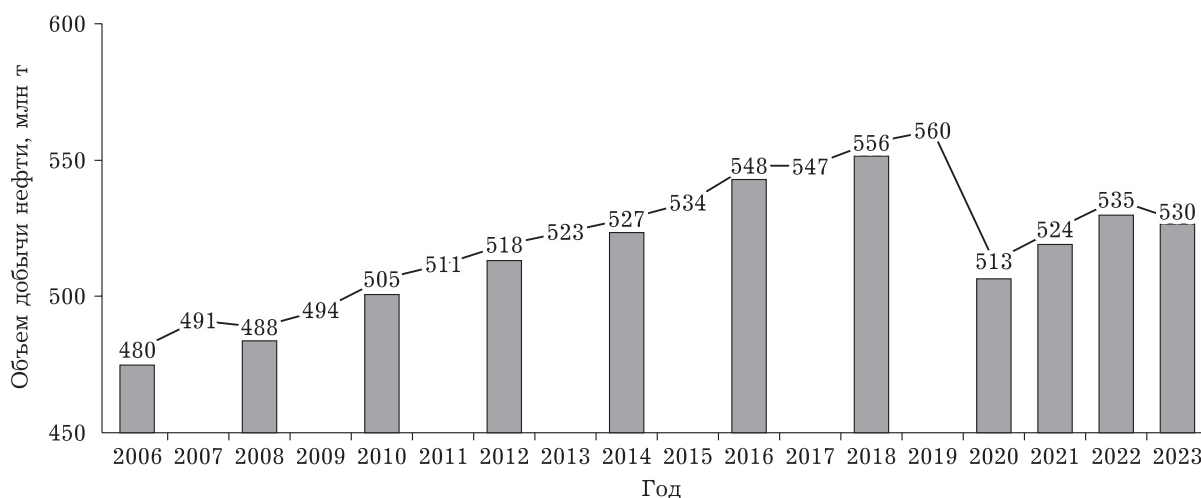


Рис. 1. Объем добычи нефти в России в период 2006–2023 гг.

крыт полигон для отработки технологий нефтеизвлечения из БС.

Между тем, помимо необходимости значительных вложений в разработку баженовских пластов, многими учеными [5–9] отмечены экологические последствия применения технологий гидроразрыва пласта:

- необходимость больших запасов воды при создании смеси из песка и химикатов для успешной нефтедобычи;
- скопление большого объема загрязненной воды, которая наносит вред почве, уничтожая ее плодородие;
- большая вероятность загрязнения поверхностных и пластовых вод;
- сейсмическая нестабильность вследствие разрушения подземных пластов.

Кроме того, недостаточно освещена проблема разработки и добычи содержащей тяжелые металлы баженовской нефти, что еще больше усугубляет риск негативного воздействия на природную систему и человека. Необходимо учитывать, что применение технологии гидроразрыва пластов влечет тепловое воздействие и увеличение давления на продуктивные отложения, закачку большого объема химических реагентов и воды. Это может способствовать высвобождению соединений металлов и их выбросу в вышележащие пласты, на поверхность Земли и в атмосферу.

Тяжелые металлы представляют большую опасность для человека. В организм металлы могут попадать с вдыхаемым воздухом при сжигании углеводородов, горении разливов нефти, с почвенной пылью на месторождениях, по пищевым цепочкам. При миграции тяжелых метал-

лов из загрязненной почвы в поверхностные и грунтовые воды загрязняется питьевая вода. Воздействие тяжелых металлов на человека проявляется в виде процессов образования опухолей. Например, соединения никеля провоцируют опухоли почек, слизистой носа и гортани [10].

Таким образом, изучение свойств металлоносной нефти, ее пространственное распределение, учет уровней содержания токсикопасных тяжелых металлов может уменьшить или предотвратить негативное влияние такой нефти на природную среду и человека. Знания о составе и содержании металлов в нефти позволят принять защитные меры на стадиях добычи, переработки и утилизации токсикопасных углеводородов. Кроме того, получение стратегически важных металлов из нефти рентабельно и экономически обоснованно по сравнению с процессами их рудоизвлечения, и это может дать существенную прибыль нефтедобытчикам [11, 12]. Учитывая вышесказанное, цель работы – изучение физико-химических свойств нефти и пространственного распределения месторождений БС с высоким и средним содержанием ванадия и никеля.

МЕТОДЫ И ХАРАКТЕРИСТИКА ДАННЫХ

Основой для анализа металлоносности нефти БС в Западной Сибири является информация из базы данных (БД) о физико-химических свойствах нефти мира, созданной и используемой более трех десятилетий в Институте химии нефти СО РАН (Томск) [13]. В настоящее время в БД представлено более 45 600 описаний образцов нефти из 7247 месторождений 195 нефтега-

ТАБЛИЦА 1

Информация в базе данных (БД) о месторождениях баженовской свиты с металлоносной нефтью

Регион	Количество месторождений (количество образцов нефтей) в БД	Название месторождений
Ханты-Мансийский автономный округ	22 (49)	Быстринское, Варьеганское, Ватьеганское, Верхне-Салымское, Восточно-Сургутское, Ем-Еговское, Западно-Сургутское, Малобалыкское, Мегионское, Повховское, Приобское, Равенское, Салымское, Самотлорское, Сорымское, Тагринское, Тевлинско-Русскинское, Угутское, Урьевское, Федоровское, Ханты-Мансийское, Яунлорское
Ямало-Ненецкий автономный округ	6 (13)	Вынгайхинское, Губкинское, Ен-Яхинское, Комсомольское, Новопортовское, Уренгойское
Томская область	4 (5)	Катыльгинское, Ледовое, Оленье, Первомайское
Новосибирская область	1 (1)	Межовское
Итого	33 (68)	

зовых бассейнов мира. Нефти БС представлены в БД 2833 образцами из 127 месторождений Западной Сибири. Расширенный перечень этих месторождений с залежами баженовской нефти представлен в работах [14–16].

Согласно данным, приведенным на карте-схеме расположения месторождений с залежами баженовской нефти на территории Западной Сибири [14, 16], наибольшее количество и самые крупные месторождения находятся в центральной части Западно-Сибирского НГБ на территории ХМАО. Их доля составила почти 70 %. Количество месторождений Томской обл. – более 16 %, доли месторождений Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) и Новосибирской обл. самые минимальные – 12 и 2 % соответственно. Однако распределение запасов месторождений БС иное: максимальные запасы сосредоточены в месторождениях ХМАО (89 % запасов всех месторождений), на второй позиции – запасы БС в ЯНАО (10 %), в Томской области – 1 %, данные о запасах месторождений Новосибирской обл. в БД отсутствуют.

По данным [15, 16], залежи нефти БС приурочены к коллекторам с относительно большими глубинами залегания. Установлено, что глубоко-залегающая нефть (глубина залегания 4000–8000 м) составила малочисленную выборку объемом 23 образца (1.1 %) из Ен-Яхинского, Уренгойского и Комсомольского месторождений ЯНАО. Наибольшее количество (почти 77 %) образцов баженовской нефти приурочено к интервалу 2000–4000 м. Сюда относится нефть БС из почти всех месторождений Томской обл. и ЯНАО (13 и 12 месторождений соответственно) и из 65 месторождений ХМАО. На глубинах 1000–2000 м залегает 18 % нефти, а выборка для малых глубин (до 1000 м) малочисленна и составила 2 %.

Выборка металлоносной баженовской нефти состоит из 67 образцов из 33 месторождений. Перечень этих месторождений приведен в табл. 1, где представлена общая информация из БД о количестве месторождений и числе образцов в каждом регионе.

В исследованиях использованы методы пространственного анализа данных с применением средств геоинформационных систем и статистические методы, включая корреляционный анализ данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Классификация баженовской нефти по содержанию ванадия и никеля

Понятие “ванадиевая или никелевая нефть” в настоящий момент не имеет однозначного толкования как в России, так и в мире. Кондиционное содержание ванадия в нефти составляет 30 г/т (или 0.003 %), а никеля – 70 г/т (или 0.007 %). Данный уровень содержания ванадия и никеля может обеспечивать промышленное получение металлов из углеводородного сырья, по рентабельности сопоставимое с его промышленным извлечением из рудного сырья [11]. В соответствии с классификацией трудноизвлекаемой нефти [17–19] для ванадия и никеля металлоносной нефти определены пределы их содержания: высокое содержание ванадия – ≥ 0.003 %, среднее или низкое содержание – < 0.003 %; высокое содержание никеля – ≥ 0.007 %, среднее или низкое содержание – < 0.007 %.

Из БД на территории ХМАО выявлено 24 образца нефти из 11 месторождений с высоким содержанием ванадия (табл. 2). Максимальной

ТАБЛИЦА 2

Классификация баженовской нефти по содержанию ванадия и никеля

Классификация нефти по содержанию металлов	Среднее значение, %	Пределы изменения, %	Количество образцов
Высокое содержание ванадия	0.0098	0.0036–0.0376	24
Среднее или низкое содержание ванадия	0.0008	0.00001–0.0026	44
Среднее или низкое содержание никеля	0.0007	0.00001–0.0053	47

концентрацией ванадия характеризуется нефть Салымского, Западно-Сургутского и Ханты-Мансийского месторождений (содержание ванадия – 376, 237 и 232 г/т соответственно). Содержание никеля в этих месторождениях является средним или низким (см. табл. 2). Следует отметить, что в БС отсутствуют нефти с высоким содержанием никеля. Средним содержанием никеля ($<0.007\%$) характеризуется нефть Сорымского, Западно-Сургутского и Урьевского месторождений (53, 23 и 20 г/т соответственно).

Ранее были установлены типы нефтегазовых бассейнов, классифицируемые по наибольшим значениям отношения ванадия к никелю (V/Ni). Если содержание ванадия превышает содержание никеля в нефти ($V/Ni > 1$), то нефтегазовосный бассейн (НГБ) относится к ванадиевому типу. Если содержание ванадия меньше содержания никеля в нефти ($V/Ni < 1$), то – к никелевому типу [11, 20]. Западно-Сибирский НГБ характеризуется доминированием ванадиевых соединений в нефти ($V/Ni = 1.50$), для баженовской нефти это отношение в 4 раза больше и равно 5.71.

В работах [20, 21] нефтяные залежи классифицируются на “обедненные” и “обогащенные” металлами. К первому типу относится нефть, суммарное содержание металлов в которой ниже 1 г/т. “Обогащенной” называется нефть, в которой суммарное содержание металлов выше 10 г/т. Исследованная нами нефть имеет суммарное содержание ванадия и никеля 3004 г/т и относится к “обогащенной”.

В табл. 3 представлены данные о наиболее уникальных и крупных по своим ресурсам месторождениях БС со средним значением содержания ванадия и никеля.

Особенности условий залегания металлоносной нефти баженовской свиты

Как известно [1], БС распространена в Западно-Сибирском НГБ на территории более 1 млн км², отличается высоким уровнем неодно-

родности и сложностью геологического строения. Из БД и работ [1, 16] было установлено, что баженовская нефть залегает в следующих породах: в песчаниках количество образцов составило более 56 %, песчано-алевролитовых коллекторах – почти 30 % образцов, аргиллитах – более 7 % образцов, терригенах, битуминозных аргиллитах и глинах – по 3 % образцов, глинах – менее 1 % образцов нефти. Металлоносная нефть БС находится в основном в песчаниках (86.2 % образцов нефти) и песчано-алевролитовых породах (13.8 % образцов), что подтверждает принадлежность коллекторов БС к терригенному типу [1, 6, 21].

Наибольшее количество (почти 80 %) образцов исследованной нефти находится в интервале средних глубин залегания – 2000–3000 м (табл. 4). Глубокозалегающая нефть (глубина залегания более 4500 м) отсутствует. Выявлена взаимосвязь изменения концентраций ванадия и никеля на разных глубинах – в среднем содержание тяжелых металлов уменьшается с ростом глубины залегания. Содержание ванадия и никеля в интервале залегания от 1000 до 4000 м снижается от 21 до 5 г/т и от 6.7 до 0.5 г/т, т. е. уменьшается в 4 и в 13 раз соответственно.

Стратиграфический диапазон БС долгое время определялся как ранне-поздневожский юрской системы. На основе более детальных исследований границу возраста увеличили до валанжинского яруса меловой системы, т. е. БС формировалась в глубоководном морском бассейне в конце юрского и начале мелового периода, приблизительно 145 млн лет назад [5, 22]. В табл. 5 показано, что с уменьшением возраста отложений содержание ванадия в нефти уменьшается с 85 до 37 г/т, а никеля, наоборот, увеличивается с 0.4 до 5.4 г/т. Следовательно, четкой связи изменения содержания тяжелых металлов с возрастом выявить не удалось.

Средние значения пластовых характеристик баженовских отложений представлены в табл. 6. Видно, что пористость пластов варьируется от

ТАБЛИЦА 3

Распределение по запасам месторождений баженовской свиты с металлоносной нефтью

Месторождение	Содержание ванадия, %	Содержание никеля, %
Уникальные (более 300 млн т нефти)		
Самотлорское	0.0020	0.0011
Приобское	0.0041	0.0005
Федоровское	0.0068	0.0008
Уренгойское	0.0001	0.0001
Повховское	0.0011	–
Ватьеганское	0.0020	0.0015
Салымское	0.0136	0.0006
Крупные (от 30 до 300 млн т нефти)		
Тевлинско-Русскинское	0.0007	–
Новопортовское	0.0006	0.0008
Вынгайхинское	0.0001	0.0001
Малобалыкское	0.0022	0.0003
Комсомольское	0.0016	0.0003
Урьевское	0.0017	0.0020
Западно-Сургутское	0.0096	0.0010
Первомайское	0.0006	–
Быстринское	0.0075	–
Средние (от 10 до 30 млн т нефти)		
Верхне-Салымское	0.0043	0.0006
Олень	0.0005	0.0001
Тагринское	0.0001	0.0005
Угутское	0.0013	–
Катыльгинское	0.0002	–
Мелкие (от 1 до 10 млн т нефти)		
Равенское	0.0084	–
Ледовое	0.0001	0.0001
Восточно-Сургутское	0.0055	0.0005

ТАБЛИЦА 4

Глубина залегания металлоносной баженовской нефти

Глубина залегания, м	Количество образцов, %	Среднее значение содержания ванадия, %	Среднее значение содержания никеля, %
1000–2000	17.7	0.0021	0.00067
2000–3000	79.4	0.0033	0.00034
3000–4000	2.9	0.0005	0.00005

14 до 28 %, проницаемость – от сотых долей до 1.5 мкм². Широкий диапазон изменений характерен и для термобарических показателей: пластовая температура – от 56 до 110 °С, пластовое давление – от 20 до 38 МПа. Согласно [17–19], трудноизвлекаемая нефть характеризуется высокими либо низкими значениями пластовых температур и давления. “Горячая” баженовская нефть (пластовая температура выше 100 °С) характерна для Салымского и Урьевского месторождений (ХМАО). Нефть БС с низкой пластовой температурой (менее 20 °С) не выявлена.

Проницаемость и пористость оказывают непосредственное влияние на режим разработки и выбор применяемых технологий извлечения нефти (см. табл. 6). Большинство образцов исследованной нефти находится в среднепроницаемых (проницаемость от 0.05 до 0.5 мкм²) и высокопористых (пористость более 15 %) коллекторах. Данные свойства пород характерны, например, для коллекторов Уренгойского (ЯНАО), Мегионского, Самотлорского, Урьевского и Яунлорского (ХМАО) месторождений. Вынгайхинское (ЯНАО) и Ледовое (Томская обл.) месторож-

ТАБЛИЦА 5

Возраст отложений металлоносной баженовской нефти

Возраст отложений	Количество образцов, %	Среднее значение содержания ванадия, %	Среднее значение содержания никеля, %
Среднеюрский	11.4	0.0085	0.00004
Верхнеюрский	28.6	0.0004	0.00019
Нижнемеловой	60.0	0.0037	0.00054

ТАБЛИЦА 6

Пластовые характеристики залегания металлоносной баженовской нефти

Пластовые характеристики	Среднее значение	Пределы изменения	Количество образцов, шт.
Температура пласта, °С	83.63	56.00–110.00	19
Давление пласта, МПа	25.44	20.00–37.60	19
Проницаемость, мкм ²	0.30	0.02–1.49	10
Пористость, %	20.05	14.00–28.00	11

дения отличаются проницаемостью – коллекторы этих месторождений являются низкопроницаемыми (пористость менее 0.05 мкм²).

Сравнительный анализ геолого-физических и химических характеристик металлоносной баженовской нефти

Известно, что изменения геолого-физических условий залегания баженовской нефти в залежах отражаются на ее реологических и физико-химических параметрах. Плотность, вязкость, температура застывания, содержание смол, серы, асфальтенов, парафинов, тяжелых металлов влияют на сложности добычи, транспортировки и переработки нефти, а также на негативные экологические последствия. Как упоминалось выше, самой эффективной и приоритетной технологией повышения нефтеотдачи и добычи баженовской нефти, но в то же время самой экологически опасной технологией является технология гидравлического разрыва пласта, которая требует широких знаний об условиях залегания нефти, о пластовых характеристиках пород, ее физико-химических свойствах, особенно для нефти БС, обогащенной тяжелыми металлами.

Информативной физической величиной служит плотность, на ее значение оказывают влияние все компоненты, входящие в состав нефти, пропорционально их содержанию. Плотность нефти является одним из главных факторов определения трудноизвлекаемости нефти. По собранным данным металлоносная баженовская нефть по общим физико-химическим характеристикам имеет значительные различия. Так,

плотность меняется от 0.811 (месторождение Губкинское, ЯНАО) до 0.915 г/см³ (месторождение Новопортовское, ЯНАО), среднее значение плотности равно 0.860 г/см³. Вариации плотности влияют на изменения физико-химических параметров, таких как содержание смол – от 2.3 (месторождение Губкинское, ЯНАО) до 19.1 % (месторождение Западно-Сургутское, ХМАО), асфальтенов – от 0.12 (месторождение Губкинское, ЯНАО) до 5.5 % (месторождение Сорымское, ХМАО), парафинов – от 1.3 (месторождение Олень, Томская обл.) до 7.63 % (месторождение Губкинское, ЯНАО), серы – от 0.02 (месторождение Салымское, ХМАО) до 2.5 % (месторождение Западно-Сургутское, ХМАО). Вязкость нефти имеет также широкие границы изменений – от 3.16 (месторождение Губкинское, ЯНАО) до 82.1 мм²/с (месторождение Федоровское, ХМАО), среднее значение вязкости при 20 °С составляет 17.79 мм²/с. Положительной температуры застывания для металлоносной нефти БС не установлено, в основном нефть имеет отрицательную температуру застывания (от –1 до –48 °С).

По значению плотности выделено 3 группы металлоносной баженовской нефти: легкая (плотность менее 0.84 г/см³), средняя (плотность от 0.84 до 0.88 г/см³) и тяжелая (плотность более 0.88 г/см³). Средние значения пластовых характеристик и основных физико-химических показателей исследованной нефти каждой группы приведены в табл. 7. Вторая группа (средняя по плотности нефть) содержит наибольшее количество образцов, их доля составила 50 %, доля тяжелой нефти – 27.6 %, самая малочисленная

ТАБЛИЦА 7

Средние значения физико-химических показателей металлоносной нефти баженовской свиты в зависимости от плотности

Физико-химические показатели	Легкие нефти	Средние нефти	Тяжелые нефти
Условия залегания			
Глубина залегания, м	2512	2369	2086
Пластовая температура, °С	89.83	42.47	26.78
Пластовое давление, МПа	28.37	11.78	9.47
Проницаемость, мкм ²	0.14	0.40	0.008
Пористость, %	17.20	19.49	16.67
Физические показатели			
Плотность, г/см ³	0.8274	0.8558	0.8955
Вязкость при 20 °С, мм ² /с	3.31	6.76	25.81
Вязкость при 50 °С, мм ² /с	1.74	2.92	11.15
Температура застывания, °С	–26.67	–13.21	–12.07
Химические показатели			
Содержание, мас. %:			
серы	0.39	0.65	1.54
парафинов	3.72	3.23	1.87
смола	5.32	7.09	9.58
асфальтенов	0.66	1.24	1.53
ванадия	0.0003	0.0015	0.0065
никеля	0.0002	0.0006	0.0006
Газосодержание в нефти, м ³ /т	350.00	69.50	21.02

группа – это легкая нефть, ее доля составила 22.4 %. Аналогично и распределение запасов нефти в каждой группе: наибольшие запасы сосредоточены в группе месторождений со средней нефтью (57.3 %, Приобское, Самотлорское, Ватъеганское и другие месторождения), 31.6 % запасов находится в группе с тяжелой нефтью (Федоровское, Новопортовское, Салымское и другие месторождения), 11.1 % – это запасы легкой нефти (Повховское, Уренгойское, Вынгайхинское и другие месторождения). Наблюдается четкая взаимосвязь между изменениями плотности нефти и основными ее реологическими и физико-химическими показателями (см. табл. 7). Тяжелая баженовская нефть залегает на меньших глубинах, с низкими значениями пластовых температуры и давления, коллекторы имеют низкую проницаемость и высокую пористость. Легкая нефть залегает в более глубоких пластах, с самыми высокими значениями температуры и давления. Средняя по плотности нефть находится в породах с самыми высокими значениями проницаемости и пористости.

Показано, что при увеличении плотности от группы легкой нефти до группы тяжелой увеличивается вязкость нефти почти в 10 раз, температура застывания в среднем повышается в

2 раза, содержание серы, смол и асфальтенов увеличивается более чем в 3 раза, содержание газа в нефти при этом уменьшается примерно на порядок. Содержание парафинов практически стабильное в разных группах, более высокое наблюдается в группе легкой нефти. Тяжелая нефть, согласно классификации нефти по физико-химическим свойствам [17–19], отнесена к классу мало- или средневязкой нефти (вязкость менее 35 мм²/с). Эта нефть является сернистой, среднепарафиновой, среднесмолистой и малоасфальтеновой, с низким и средним газосодержанием.

Проведен статистический анализ данных и рассчитаны коэффициенты парной корреляции. Зафиксирована положительная корреляция между ванадием и никелем, что можно объяснить их содержанием в ванадилпорфириновых комплексах органического вещества пород. Положительная корреляция выявлена между плотностью и вязкостью, парафинами, серой, смолами и асфальтенами, между ванадием и серой, никелем и серой.

Однако распределения месторождений БС с ванадиевой нефтью по площади, а также по содержанию ванадиевых порфиринов и ванадия в битумоидах пород показали расчлененность и

ТАБЛИЦА 8

Содержание ванадия в нефти и битумоидах, а также ванадиевых порфиринов в битумоидах пород некоторых месторождений баженовской свиты

Месторождение	Ванадиевые порфирины в битумоидах, % [23]	Ванадий в битумоидах, % [24]	Ванадий в нефти (из БД*), %
Новопортовское	0.0	0.0	0.0006
Губкинское	0.0	0.032	0.0002
Салымское	0.0	0.014	0.0136
Вынгайхинское	0.023	0.046	0.00007
Тагринское	0.044	0.092	0.0001
Самотлорское	0.770	0.112	0.0020
Федоровское	1.065	0.183	0.0060
Угутское	2.380	0.008	0.0013
Мегионское	3.100	0.034	0.0006

* База данных.

несогласованность их распределения (табл. 8). Например, месторождения с высоким содержанием ванадиевых порфиринов сконцентрированы в центре БС, в районе среднего течения Оби, а месторождения с низким содержанием ванадиевых порфиринов находятся в основном на южной, западной и северной границах БС [23]. Распределение месторождений с низким содержанием ванадия в битумоидах [24] показывает некоторую согласованность с размещением месторождений с содержанием ванадиевых порфиринов в пластах. Месторождения с низким содержанием ванадия в битумоидах располагаются в южных районах БС и тянутся до северных границ, самое высокое содержание установлено у западных границ и в центре БС. Различия в данных о содержании ванадия в нефти, а так же ванадия и ванадилпорфиринов в органическом веществе доказывают сложность интерпретации их отличий или аналогий. Это свидетельствует о неоднозначности процессов генерации и миграции нефти в отложениях БС, что, в свою очередь, доказывает необходимость более детального изучения сложных условий формирования залежей металлоносной баженовской нефти и перспектив эффективного ее нефтеизвлечения без экологических последствий (см. табл. 8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам статистического и пространственного анализа представлены данные о распределении месторождений с металлоносной нефтью по площади БС, о классификации нефти по содержанию металлов, о закономерностях залегания нефти в зависимости от глубины и возраста. Приведены средние содержания ме-

таллов, парафинов, смол, асфальтенов и серы. Показано, что в зависимости от плотности нефти изменяются и основные физико-химические свойства. Выявлена несогласованность распределения месторождений по содержанию ванадия в нефти и органическом веществе, что доказывает необходимость дополнительных исследований процессов генерации и миграции нефти в сложнопостроенных пластах БС.

Нефть БС вводится в производство с помощью технологии горизонтального бурения с применением метода гидравлического разрыва пласта, которая признана во всем мире приоритетной и эффективной. В настоящее время в России большинство новых скважин вводятся в производство с применением этой высокой технологии. Значимость разработки ресурсов БС еще в 2017 г. признана на уровне государства. Этому проекту, курируемому Министерством энергетики Российской Федерации, присвоен статус национального по созданию комплекса отечественных технологий и высокотехнологичного оборудования разработки запасов БС. Реализация задач проекта способствовала внедрению более 10 новых технологий в области строительства скважин на месторождениях БС с использованием российского скважинного оборудования, что очень важно и перспективно в современных реалиях санкционной политики западных государств.

Полноценная добыча трудноизвлекаемой баженовской нефти в скором будущем станет двигателем разработки и внедрения высоких технологий во многих отраслях промышленности – от тяжелого машиностроения до микроэлектроники, искусственного интеллекта и цифрового моделирования. На примере БС эти технологии могут применяться и для разработки ресурсов с

трудноизвлекаемой нефтью в доманиковых отложениях в Волго-Уральском и Тимано-Печорском НГБ, в куонамских отложениях Восточной Сибири, в хадумских – на Кавказе.

Однако при всех положительных результатах внедрения технологии гидроразрыва пластов БС следует учитывать негативные экологические последствия разработки баженовской нефти, обогащенной тяжелыми металлами. Глубина гидроразрыва должна быть не менее 2 км, чтобы не пострадали грунтовые и артезианские водоносные горизонты. При правильном гидроразрыве толщина трещин в пластах должна быть менее 1 см, тогда при возможном смыкании трещин не будет сейсмических всплесков на поверхности. Необходимо качественное цементирование вокруг скважинного оборудования для исключения прорыва на поверхность технологической жидкости и ее попадания на почву и в водоемы. Кроме того, нужно исключить испарение технической жидкости, использовать ее по замкнутому циклу, а также для закачки в пласт применять экологически безопасные вещества и реагенты отечественного производства.

В связи с этим для учета и мониторинга экологической ситуации на месторождениях БС необходимы знания широкого круга исследований по оценке условий залегания, геолого-физических характеристик отложений, физико-химических свойств металлоносной нефти, что подчеркивает актуальность данной работы, а ее результаты могут быть использованы в дальнейших исследованиях нефтедобычи трудноизвлекаемых запасов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Конторович А. Э., Родякин С. В., Бурштейн Л. М., Костырева Е. А., Рыжкова С. В., Ян П. А. Пористость и нефтенасыщенность пород баженовской свиты // Геология нефти и газа. 2018. № 5. С. 61–73.
2. Ларионова Е. И., Чинаева Т. И., Шпаковская Е. П. Анализ развития нефтегазового сектора в современных условиях // Статистика и Экономика. 2019. Т. 16, № 6. С. 29–36.
3. Прищепа О. М. Состояние сырьевой базы и добычи трудноизвлекаемых запасов нефти в России // Минерал. ресурсы России. Экономика и управление. 2019. № 5 (168). С. 14–20.
4. Хисамов Р. С., Ахметгареев В. В., Хакимов С. С., Кенжеханов Ш. Ш. Технологии многостадийного гидравлического разрыва пласта для разработки сланцевых коллекторов в США и возможность их адаптации к условиям доманиковых отложений Республики Татарстан // Нефтяное хоз-во. 2020. № 3. С. 47–52.
5. Пуланова С. А., Нукунов Д. К вопросу об экологических последствиях горизонтального бурения сланцев в связи с их обогащенностью микроэлементами // Георесурсы. 2017. Т. 19, № 3. С. 239–248.
6. Полетаева О. Ю., Леонтьев А. Ю. Тяжелые, сверхвязкие, битуминозные, металлоносные нефти и нефтеносные песчаники // Нефтегазохимия. 2019. № 1. С. 19–24.
7. Poletaeva O. Yu., Kolchina G. Yu., Leontev A. Yu., Babayev E. R., Movsumzade E. M., Khasanov I. I. Geometric and electronic structure of heavy highly viscous oil components // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. Химия и хим. технология. 2019. Т. 62, № 9. С. 40–45.
8. Якуцени С. П. Распространенность углеводородного сырья, обогащенного тяжелыми элементами-примесями. Оценка экологических рисков. СПб.: Недра, 2005. 370 с.
9. Якуцени С. П. Глубинная зональность в обогащенности углеводородов тяжелыми элементами-примесями // Нефтегазовая геология. Теория и практика: электрон. журн. 2010. Т. 5, № 2. URL: http://www.ngtp.ru/rub/7/30_2010.pdf. (дата обращения: 10.10.2024)
10. Башкин В., Галиулин Р., Галиуллина Р. Тяжелые металлы в нефти // Деловой журн. Neftegaz.RU. 2013. № 7–8 (19–20). С. 76–78.
11. Яценко И. Г. Тяжелые ванадиевые нефти России // Изв. Томского политехн. ун-та. 2012. Т. 321, № 1. С. 105–111.
12. Пуланова С. А. Трудноизвлекаемые запасы тяжелой нефти и битумов – приоритетное направление геологоразведочных работ, инновационный потенциал малого и среднего бизнеса // Новая техника и технологии для трудноизвлекаемых запасов углеводородов: тез. докл. XXX Научно-практ. конф. им. В. В. Лаптева, 21–24 мая 2024 г. Уфа: Новтек Бизнес, 2024. С. 72–76.
13. Яценко И. Г., Полищук Ю. М. Трудноизвлекаемые нефти: физико-химические свойства и закономерности размещения. Томск: В-Спектр, 2014. 153 с.
14. Яценко И. Г., Полищук Ю. М. Физико-химические свойства нефтей с высоким содержанием парафинов в Арктической зоне России // Башкирский хим. журн. 2023. Т. 30, № 1. С. 104–110.
15. Яценко И. Г. Пластовые условия залегания трудноизвлекаемых нефтей баженовской свиты и их физико-химические свойства // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66, № 11. С. 6–17.
16. Яценко И. Г. Особенности условий залегания баженовских, доманиковых и куонамских отложений нефтегазовых бассейнов России // Химия в интересах устойчивого развития. 2024. Т. 32, № 2. С. 223–232.
17. Аббасова С. В. Анализ, классификация и оценка качества трудноизвлекаемых нефтей: современное состояние проблемы // Азербайджанское нефтян. хоз-во. 2022. № 2. С. 27–32.
18. Akhmetov D. A., Efendiyev G. M., Karazhanova M. K., Koylibayev B. N. Classification of hard-to-recover hydrocarbon reserves of Kazakhstan with the use of fuzzy cluster-analysis // 13th Int. Conf. on Theory and Application of Fuzzy Systems and Soft Computing – ICAFS-2018. Cham: Springer, 2019. P. 865–872.
19. Магомедов Р. Н., Попова А. З., Марютина Т. А., Кадиев Х. М., Хаджиев С. Н. Состояние и перспективы деме-таллизации тяжелого нефтяного сырья (обзор) // Нефтехимия. 2015. Т. 55, № 4. С. 267–290.
20. Пуланова С. А. Особенности накопления в нафтидах ванадия и никеля // Актуал. проблемы нефти и газа: электрон. журн. 2018. № 3 (22). Ст. 2. URL: https://oilgasjournal.ru/issue_22/pulanova.html (дата обращения: 15.10.2024).

21. Цомбуева Б. В., Сохорова З. В., Фадеева И. Ю., Убушаева Б. В. Микроэлементная характеристика сырых нефтей ряда месторождений Республики Калмыкия // Успехи соврем. естествознания. 2019. № 1. С. 18–23.
22. Фомин М. А., Сайтов Р. М., Замирайлова А. Г. Литология и нефтеносность баженовской свиты в центральной части Мансийской синеклизы // Георесурсы. 2023. Т. 25, № 4. С. 176–191.
23. Пунанова С. А. Геохимические особенности распределения микроэлементов в нефтидах и металлоносность осадочных бассейнов СНГ // Геохимия. 1998. № 9. С. 959–972.
24. Пунанова С. А., Шустер В. Л. Новый взгляд на перспективы нефтегазоносности глубокозалегающих доюрских отложений Западной Сибири // Георесурсы. 2018. Т. 20, № 2. С. 67–80.

Поступила в редакцию 01.11.2024

Принята к публикации 20.11.2024