

УДК 622.276

ТЕХНОЛОГИЯ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ КАК СОВРЕМЕННЫЙ КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫХ ЗАПАСОВ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Коротков Роман Николаевич¹,
klimatqwf@gmail.com

Коновалов Андрей Александрович¹,
a_a_konovlov1995@mail.ru

Овчаренко Диана Маратовна¹,
dmo4@tpu.ru

Ерофеев Владимир Иванович¹,
erofeevvi@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена текущей ситуацией, когда недропользователи пытаются извлечь максимальное количество нефти в сжатые сроки, в результате чего преимущественно система разработки составляет некорректно, доля трудноизвлекаемых запасов растёт с каждым годом. Поэтому появляется острая необходимость разработки остаточных запасов из недр, которые зачастую являются трудноизвлекаемыми. Одним из комплексных подходов является термогазохимическое воздействие, которое представляет собой метод обширного влияния на пласт и описывает перспективную технологию среди других существующих методов увеличения нефтеотдачи. В свою очередь, бинарные смеси позволяют повысить нефтеотдачу пластов в среднем на 5–10 %.

Цель: исследование эффективности применения технологии бинарных систем с целью повышения нефтеотдачи пластов, содержащих трудноизвлекаемые запасы углеводородов.

Методы: систематизация классификационных подходов в части трудноизвлекаемых запасов, выделение по критерию эффективности наиболее актуальных методов увеличения нефтеотдачи, анализ Российского и зарубежного опыта применения термогазохимического воздействия, оценка технологической и экономической целесообразности применения бинарных смесей на месторождениях-аналогах.

Результаты. Использование бинарных смесей позволяет увеличивать нефтеотдачу пластов в среднем на 5–10 %. Изучены принципы вытеснения нефти с использованием аммиачной селитры и продукта реакции разложения, воспроизведен анализ опытно-промышленных испытаний как в России, так и за рубежом, изучена текущая проблематика. Также рассмотрены различные месторождения, которые уже доказали положительную динамику потенциала разработки при использовании данной технологии. Представлена предварительная оценка экономической эффективности термогазохимического воздействия при нынешнем состоянии газовой и нефтяной отрасли по сравнению с другими методами увеличения нефтеотдачи пластов.

Ключевые слова:

термогазохимическое воздействие, методы увеличения нефтеотдачи пластов, бинарные смеси, аммиачная селитра, трудноизвлекаемые запасы.

Введение

В настоящее время в связи с ухудшением количественных и качественных характеристик ресурсной базы углеводородов актуализируется задача разработки и внедрения технологий по извлечению трудноизвлекаемых запасов нефти (ТРИЗ). Доля таких запасов по оценкам Министерства природных ресурсов РФ достигает отметки в 65 % (рис. 1). Н.Н. Лисовский и Э.М. Халимов одними из первых представили классификацию ТРИЗ [1]. Граничные значения ряда технологических и геологических критериев, а также зависимость степени удаленности от существующих на тот момент центров нефтегазодобычи легли в основу данной классификации.

Сейчас ТРИЗ подразумевают запасы, разработка которых более энергозатратна по сравнению с разработкой классических залежей. С точки зрения геологии, сложность в разработке, а также неблагоприят-

ные условия залегания и физико-химические свойства не позволяют экономически выгодно извлекать ресурсы с текущей налоговой системой [2, 3]. В табл. 1 представлена систематизация различных классификационных подходов к ТРИЗ в части нефти.

В данном исследовании изучены принципы вытеснения нефти с использованием аммиачной селитры и продукта реакции разложения, воспроизведен анализ опытно-промышленных испытаний (ОПИ) как в России, так и за рубежом, изучена текущая проблематика. Также рассмотрены различные месторождения, которые уже доказали положительную динамику потенциала разработки при использовании данной технологии. Представлена предварительная оценка экономической эффективности термогазохимического воздействия (ТГХВС) на трудноизвлекаемые запасы при нынешнем состоянии газовой и нефтяной отрасли по сравнению с другими методами увеличения нефтеотдачи пластов [4, 5].

Таблица 1. Систематизация классификационных подходов к ТРИЗ в части нефти

Table 1. Systematization of classification approaches to TRIZ in oil

Группы Groups	Критерии Criteria	Количественные критерии Quantitative criterion		
		Граничные значения Limit values [1]	Налоговый кодекс РФ Tax code of the Russian Federation	Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых 2015 State Commission for Mineral Reserves 2015
Качественные характеристики нефти Oil quality characteristics	Вязкая нефть, в пластовых условиях, спз Viscous oil, in reservoir conditions, sps	>30	>200	>100
Качество коллекторов Collector quality	Низкопроницаемость, мкм ² Low permeability, mcm ²	<0,03	<0,002	<0,004
Наличие подгазовых зон и нефтяных оторочек Presence of sub-gas zones and oil rims				$V_{гш} > 1/3 V_{н}$ $V_{gc} > 1/3 V_o$
Технологическая Technological	Выработанность (истощенность) Proficiency	>0,7 Начальные извлекаемые запасы (НИЗ) Initial recoverable reserves (IRR)	>0,8 НИЗ/IRR	>0,8 НИЗ/IRR

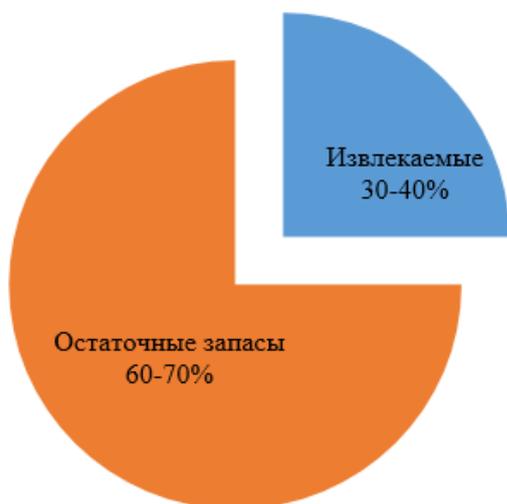


Рис. 1. Соотношение остаточных и извлекаемых запасов нефти на территории РФ

Fig. 1. Ratio of recoverable and residual oil reserves in the Russian Federation

Методы

Пласты-коллекторы с осложненными условиями добычи углеводородного флюида разрабатываются при помощи различных методов увеличения нефтеотдачи (МУН). В основном, МУН определяются по типу рабочих агентов.

Одними из самых эффективных способов разработки месторождений Западной Сибири являются методы гидравлического разрыва пласта (ГРП), забуривание бокового горизонтального ствола (ЗГБС), а также обработки призабойной зоны пласта (ПЗП) соляной и прочими кислотами. Использование вышеописанных способов ограничивается анизотропией физических свойств пластов-коллекторов и геологическими условиями залегания (табл. 2) [6–8].

Так, вышеперечисленные методы обладают различной степенью возможности увеличения нефтеотдачи пластов (рис. 2) [9–12].

В результате исследования различных технологий по повышению нефтеотдачи пластов, а также приняв

во внимание систематизацию классификационных подходов к ТРИЗ в части нефти (табл. 1), авторы делают вывод о том, что необходимо использование уникальной новой комбинации технологий, а именно термогазохимического воздействия на пласт с применением бинарных смесей (БС) [13].

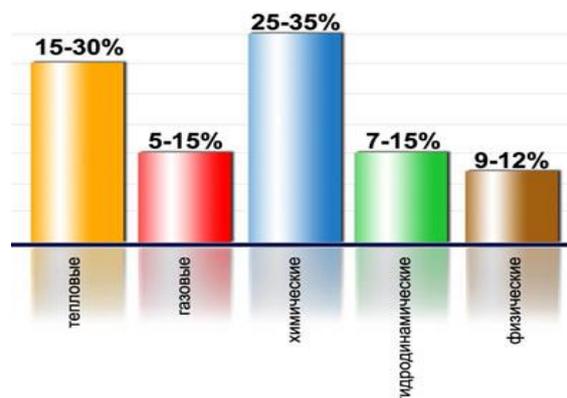


Рис. 2. Потенциальные возможности увеличения нефтеотдачи пластов различными методами

Fig. 2. Potential opportunities for increasing oil recovery by various methods

Данные смеси представляют собой водные растворы неорганических солей (ВРНС), в состав которых входит аммиачная или органическая селитра с добавлением инициаторов реакции разложения (в большинстве случаев используется нитрит натрия). В зависимости от геологических условий закачка водных растворов реагентов БС может осуществляться как по индивидуальным каналам, так и по общему с последующим использованием термоизолирующего агента для исключения возможной коррозии погружного оборудования (ПО) [14].

ВРНС активируются в призабойной зоне пласта, и по итогу взаимодействия протекает термогазохимическая реакция, продукты которой проникают в пласт под давлением, создаваемым агрегатом на устье скважины. Рис. 3 демонстрирует схему нагнетания ВРНС в скважину [15].

Таблица 2. Матрица применения наиболее эффективных МУН на территории Западной Сибири

Table 2. Matrix of application of the most effective methods for increasing oil recovery on the territory of Western Siberia

Технология Technology	Тип коллектора Collector type			
	I	II	III	IV
Бурение горизонтальных скважин/ многозабойных скважин Drilling horizontal wells/ multilateral wells	+ Пересечение большого числа трещин Большая зона дренирования Intersection of a large number of cracks Large drainage area			+ Большая зона дренирования Large drainage area
	- Относительно дорого Технически сложно Relatively expensive Technically difficult			
ГРП/Кислотный ГРП Hydraulic fracturing / Acid fracturing	+ Раскрывает имеющиеся трещины Преодоление скин-зоны Opens existing cracks Overcoming the skin zone	+ Аналогично типу I Увеличение эффективного радиуса скважины Similar to type I Increasing the well radius	+ Улучшает приток из матрицы Создает дополнительные каналы в матрице Improves flow from matrix Creates additional channels in the matrix	+ Аналогично типу II Similar to type II
	- Относительно дорого Неэффективно при сильной анизотропии Relatively expensive Ineffective with strong anisotropy			
Кислотные обработки Acid treatment	+ Дешево Cheap		+ Улучшает проводимость матрицы призабойной зоны Improves the conductivity of the near-wellbore matrix	
	- Неэффективно ввиду малого радиуса обработки Коррозия нефтепогружного оборудования (НПО) Ineffective due to small processing radius Corrosion of oil submersible equipment			- Технические сложности в массивных залежах Коррозия НПО Technical difficulties in massive deposits Corrosion of oil submersible equipment

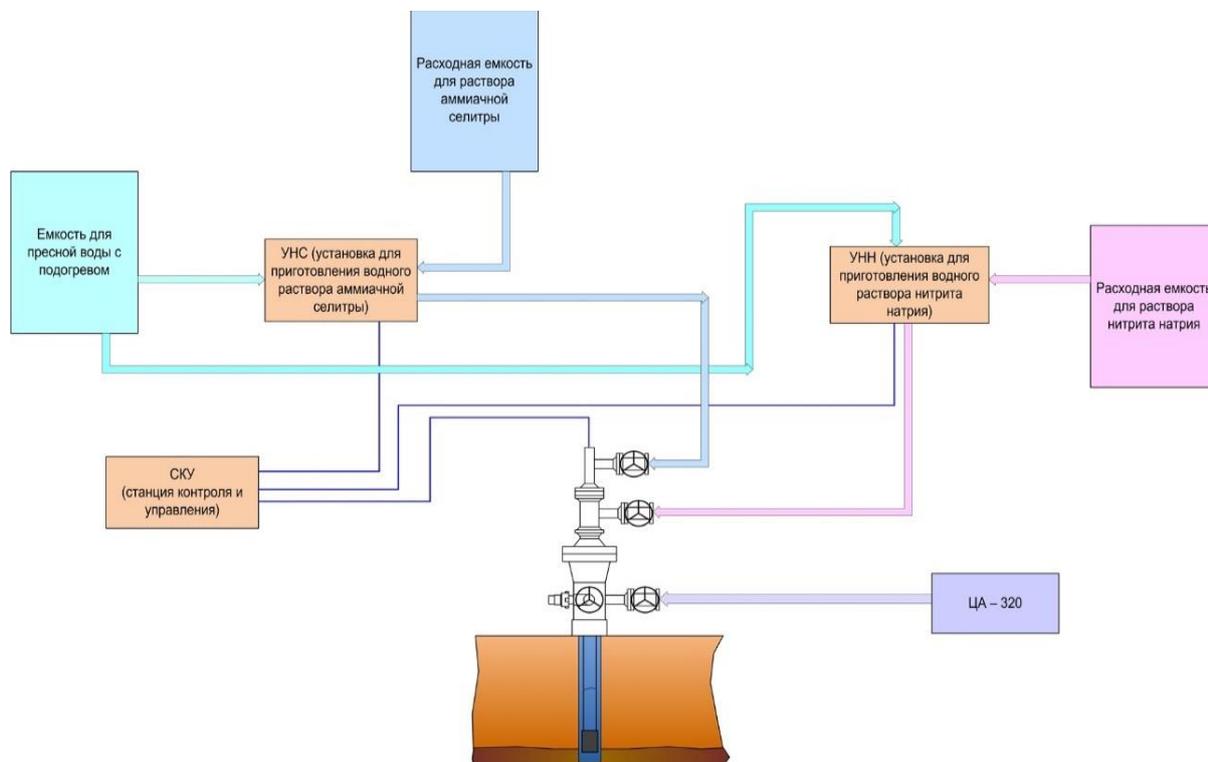


Рис. 3. Схема нагнетания ВРНС в скважину

Fig. 3. Scheme of injection of aqueous solutions of inorganic salts into a well

В качестве регулируемой закачки ВРНС с последующей прокачкой инициатора взаимодействия и термоизолирующей пачки можно рассматривать процесс, в ходе которого селитра вступает в термогазохимическую реакцию: $\text{NH}_4\text{NO}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 0,5\text{O}_2 + \text{Q}$. По итогу происходит самопроизвольный нагрев ПЗП, а также возникает дополнительная энергия для газлифта, агентом которого является кислород, окисляющий нефть [16].

В качестве примера успешной практики термогазохимического воздействия на пласт можно отметить положительный результат на Усинском месторождении по двум скважинам (ООО «Лукойл-Коми»). В результате опытно-промышленных испытаний были получены следующие результаты: дополнительная добыча жидких углеводородов (ЖУВ) составила 1397 т. Производительность скважин возросла в 5 раз относительно исходного состояния. Представленная статистика помогает сделать вывод о положительном воздействии на пласт ВРНС (табл. 3) [17, 18]. Использование ВРНС на остальных скважинах увеличило

дополнительную добычу нефти на 13232 т, что в среднем на одну скважину – около 2646 т.

Ввиду положительного опыта от проведения ОПИ ТГХВ в периметре ООО «Лукойл-Коми» данная технология представлена огласке, а также была исследована за рубежом, в штате Техас, на скважинах месторождения Eastland, которые были законсервированы в 1994 г. ввиду малодебитности. В ходе обработки был получен приток из скважины № 8, состоящий из 30 % нефти и 70 % воды, а из скважины № 10 – 10 и 90 %, соответственно [19, 20].

Усинское месторождение характеризуется содержанием высоковязкой нефти пермокарбонového периода. Данная залежь представляет собой аналог одного из крупнейших месторождений России – Русское, находящееся на территории Западной Сибири. Русское месторождение представляет собой эталон по запасам трудноизвлекаемой нефти ввиду ее высокой плотности, а также является сложным с точки зрения геологического строения и особенностей разработки [21, 22].

Таблица 3. Результаты ОПИ ТГХВ на скважинах № 3003 и 1242 Усинского месторождения

Table 3. Results of pilot testing of thermogas-chemical influence on wells no. 3003 and 1242 of the Usinsk field

№ скв. Wells no.	Марка насоса Pump brand	Начальный дебит, т/с Basic flow rate, t/day	Кол-во суток Number of days	Средний дебит, т/сут Average flow rate, t/day	Доп. добыча нефти, т Additional oil production, t	Удельный дебит нефти, т/сут Specific flow rate, t/day	План. уд. дебит Planned specific flow rate
3003	ЭВНТ-25-1500	1,93	28,00	10,6	242,9	–	–
			23,00	10,6	199,6		
			30,75	9,98	247,6		
Итого/Total				81,75	690,10	8,44	6,5
1242	ЭВНТ-25-1500	0	22,00	5,82	128,00	–	–
			30,83	5,50	169,57		
			31,00	4,63	143,00		
			29,00	4,94	143,26		
			31,00	3,98	123,38		
Итого/Total				143,83	707,73	4,92	8,5

Закачку бинарных смесей в пласт можно производить в комплексе с МГРП в горизонтальных скважинах, при грамотном соотношении компонентов можно будет достичь высоких результатов с учетом большой эффективной толщины пласта и высоким уровнем запасов в рассматриваемой зоне (табл. 2).

Также месторождения-аналоги можно выделить исходя из геологического соотношения параметров и залегания пластов. В текущий период на территории Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции в палеозойских отложениях открыто более 50 месторождений, среди которых Арчинское, Урманское, Северо-Останинское и др., являющиеся наиболее перспективными в отношении нефтегазоносности палеозоя (табл. 4) [23, 24].

Таблица 4. Оптовая стоимость компонентов и рыночная стоимость нефти марки Urals

Table 4. Wholesale cost of components and market value of Urals crude oil

Аммиачная селитра, р./т Ammonium nitrate, rub/t	Нитрит натрия, р./т Sodium nitrite, rub/t	Рыночная стоимость нефти марки Urals, р./бар Market value of Urals crude oil, rub/bar
9700	77000	5092,68

Авторами работы для решения поставленной проблематики предлагается комплексный подход для повышения нефтеотдачи палеозойских отложений Западной Сибири, в том числе путем строительства полигона на территории Томской области для испытания технологии БС. В случае положительного эффекта данная технология может быть тиражирована и дополнит собой уже зарекомендовавшие себя методы повышения извлечения нефти [25, 26].

Выводы

В данной работе был представлен анализ эффективности применения технологии бинарных смесей на палеозойских месторождениях Западной Сибири. В результате анализа были выявлены критерии подбора скважин для применения технологии бинарных смесей и отражены основные направления применимости данного воздействия. Также доказана эффективность решения посредством сравнения данной технологии с существующими, и отражена экономическая составляющая данной обработки. При помощи данной работы можно подобрать схожие по физико-химическим свойствам месторождения, обладающие залежами нефти с высокой вязкостью, а также аналогичным гео-

логическим строением палеозойских отложений. На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что использование данной технологии приведет к увеличению конечного коэффициента извлечения нефти и найдет технологически и экономически эффективное применение для дальнейшего обширного

использования не только на группе месторождений Западной Сибири, но и по всей России [25, 26].

Авторы выражают благодарность Центру коллективного пользования «Физико-химические методы анализа» (ТПУ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисовский Н.Н., Халимов Э.М. О классификации трудноизвлекаемых запасов // Вестник ЦКР Роснедра. – 2009. – № 6. – С. 33–35.
2. Касимов А.С. Разработка месторождений с трудноизвлекаемыми запасами // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Тюмень: ТИУ, 2015. – Т. 2. – С. 214–215.
3. Якуцени В.П., Петрова Ю.Э., Суханов А.А. Динамика доли относительного содержания трудноизвлекаемых запасов нефти в общем балансе // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2007. – Т. 2. – С. 23–33.
4. Повышение нефтеотдачи путем закачки углекислого газа / И.А. Синцов, О.С. Трухина // Нефть и газ Западной Сибири: материалы международной научно-технической конференции. Т. 2. Разработка и эксплуатация нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений / отв. ред. П.В. Евтин. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – С. 47–49.
5. Палеозой Западной Сибири: региональная модель геологического строения и нефтегазоносность / В.А. Конторович, Л.М. Калинина, Д.В. Аюнова, А.Ю. Калинин, М.С. Канаков, К.И. Канакова, Е.С. Сурикова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 2. – № 1. – С. 79–83.
6. Хижняк Г.П., Диенг Ассан. Влияние технологических параметров на эффективность гидроразрыва пласта // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 6. – С. 120–125.
7. Ямкин М.А., Сафиуллина Е.У. Оценка соответствия результатов компьютерного моделирования притока жидкости к трещине гидроразрыва пласта реальным данным // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 3. – С. 210–217.
8. Галкин В.И., Колтырин А.Н. Обоснование прогнозной величины прироста дебита нефти после применения ГТМ с помощью статистического метода // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 81–86.
9. Shandrygin A.N., Lutfullin A. Current status of enhanced recovery techniques in the fields of Russia // SPE annual technical conference and exhibition. – OnePetro, 2008.
10. Bera A., Vij R.K., Shah S. Impact of newly implemented enhanced oil and gas recovery screening policy on current oil production and future energy supply in India // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – V. 207. – P. 109196.
11. Enhanced oil recovery techniques for heavy oil and oilsands reservoirs after steam injection / X. Dong, H. Liu, Z. Chen, K. Wu, N. Lu, Q. Zhang // Applied energy. – 2019. – V. 239. – P. 1190–1211.
12. Иванов Е.Н., Кононов Ю.М., Мухамадиев Р.В. Разработка методики выбора методов увеличения нефтеотдачи на нефтяных месторождениях на основе геолого-физической информации // Увеличение нефтеотдачи – приоритетное направление воспроизводства запасов углеводородного сырья: Сбор. трудов Междунар. научно-практ. конф. – Уфа, 7–8 сентября, 2011. – С. 229–232.
13. Алтунина Л.К., Кувшинов В.А. Физико-химические методы увеличения нефтеотдачи пластов нефтяных месторождений // Успехи химии. – 2007. – Т. 76. – № 10. – С. 1034–1052.
14. Моделирование процессов тепло- и газовой выделении при разложении бинарных систем в технологии добычи нефти и газа / А.С. Зимин, В.А. Соснин, В.Б. Заволжский, Ю.А. Ганькин, Р.А. Идиятуллин, К.В. Березина // Вестник Казанского технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 19. – С. 123–127.
15. Добыча трудноизвлекаемых и неизвлекаемых запасов нефти с помощью технологии бинарных смесей / Е.Н. Александров, Н.М. Кузнецов, С.Н. Козлов, Ю.Г. Серкин, Е.Е. Низова // Георесурсы. – 2016. – Т. 18. – № 3. – С. 154–159.
16. Aleksandrov E., Koller Z. Technology of oil and bitumen output stimulation by heat from reactions of binary mixtures (BM) // TCTM limited. – 2008. – P. 76.
17. Актуальные проблемы и перспективы освоения запасов нефти, связанных с подгазовыми нефтяными залежами и нефтяными оторочками месторождений ОАО «Газпром» / Г.П. Косачук, С.В. Буракова, Ф.Р. Былалов, Е.В. Мельникова, С.И. Буточкина, Н.В. Будревич // Вести газовой науки. – 2012. – № 1 (9). – С. 226–232.
18. Иванов Е.Н., Кононов Ю.М., Мухамадиев Р.В. Разработка методики выбора месторождений при обосновании применения методов увеличения нефтеотдачи на месторождениях Томской области // Математическое моделирование и компьютерные технологии в процессах разработки месторождений, добычи и переработке нефти: Сб. тез. докл. IV научно-практ. конф. – Уфа, 26–28 апреля, 2011. – С. 34.
19. Гидродинамическое моделирование термохимического воздействия на низкопроницаемые керогеносодержащие коллекторы / М.Н. Кравченко, Н.Н. Диева, А.Н. Лищук, А.В. Мурадов, В.Е. Вершинин // Георесурсы. – 2018. – Т. 20. – № 3. – С. 178–185.
20. Стимулирование добычи нефти продуктами реакций бинарных смесей (БС) как альтернатива технологиям, обводняющим нефтяной пласт / Е.Н. Александров, С.Д. Варфоломеев, В.Ю. Лиджи-Горяев, А.Л. Петров // Точка опоры. – 2012. – № 158. – С. 14.
21. Кузнецов Н.М. К стимулированию нефтедобычи на основе бинарных смесей // Горение и взрыв. – 2016. – Т. 9. – № 2. – С. 111–119.
22. Исследование фильтрационных характеристик и эффективности вытеснения нефти при заводнении морского месторождения с тяжелой нефтью / Кун Се, Цзе Мэй, Нажису Нажису, В.И. Ерофеев, Ченг Су, Вэйдун Цзян, Сянго Лу // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 105–114.
23. Влияние минерализации пластовых вод на физико-химические и фильтрационные характеристики полимерных растворов и гелей для повышения нефтеотдачи пластов / Нажису, В.И., Ерофеев Сянго Лу, Цзиньлун Лу, Сяоянь Ван, Лидонг Чжан // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 3. – С. 136–145.
24. Оптимизация параметров неорганического агента управления профилем на основе силиката натрия для эффективного вытеснения нефти из коллекторов с высокой минерализацией / Нажису, В.И. Ерофеев, Сянго Лу, Чжуньюань Тянь, Лидонг Чжан. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 11. – С. 59–68.
25. Исследование фильтрационных и реологических свойств полимерного геля для повышения нефтеотдачи пластов / Нажису, В.И. Ерофеев, Цзиньлун Лу, Вэй Ван // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 147–158.
26. Китов Е.С., Ерофеев В.И., Джалилова С.Н. Анализ технологий промысловой подготовки природного газа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 10. – С. 31–38.

*Поступила: 10.04.2023 г.
Прошла рецензирование: 17.04.2023 г.*

Информация об авторах

Коротков Р.Н., аспирант отделения нефтегазового дела Школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Коновалов А.А., аспирант отделения нефтегазового дела Школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Овчаренко Д.М., магистр отделения нефтегазового дела Школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ерофеев В.И., заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, профессор отделения нефтегазового дела Школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.276

BINARY MIXTURE TECHNOLOGY AS A MODERN COMPLEX METHOD OF INCREASING OIL RECOVERY FOR THE DEVELOPMENT OF HARD-TO-RECOVER RESERVES IN THE FIELDS OF WESTERN SIBERIA

Roman N. Korotkov¹,
klimatqwf@gmail.com

Andrey A. Konovalov¹,
a_a_konovalov1995@mail.ru

Diana M. Ovcharenko¹,
dmo4@tpu.ru

Vladimir I. Erofeev¹,
erofeevi@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the study is caused by the current situation, when subsoil users are trying to extract the maximum amount of oil in a short time, as a result of which the development system is mainly compiled incorrectly, the share of hard-to-recover reserves is growing every year. Therefore, there is an urgent need to develop residual reserves from the subsoil, which are often difficult to recover. One of the complex reservoir stimulation is thermal-gas-chemical stimulation, which is a method of extensive reservoir stimulation and describes a promising technology among other existing methods for enhanced oil recovery. Binary mixtures, in their turn, will increase oil recovery by an average of 5–10 %.

Purpose: to study the effectiveness of the application of binary systems technology in order to increase oil recovery from reservoirs containing hard-to-recover hydrocarbon reserves.

Methods: systematization of classification approaches in terms of hard-to-recover reserves, selection of the most relevant methods of enhanced oil recovery according to the efficiency criterion, analysis of Russian and foreign experience in the use of thermal-gas-chemical treatment, assessment of the technological and economic feasibility of using binary mixtures in analogous fields.

Results. The use of binary mixtures makes it possible to increase oil recovery by 5–10 % on average. The principles of oil displacement using ammonium nitrate and the decomposition reaction product were studied, an analysis of pilot industrial tests both in Russia and abroad was reproduced, and current issues were studied. Various fields are also considered, which have already proved the positive dynamics of the development potential when using this technology. A preliminary assessment of the economic efficiency of thermal-gas-chemical treatment in the current state of the gas and oil industry in comparison with other methods of enhanced oil recovery is presented.

Key words:

thermal-gas-chemical effects, methods for increasing oil recovery, binary mixtures, ammonia selitra, hard-to-recover reserves.

The authors are grateful to the Center of physical and chemical methods of analysis at Tomsk Polytechnic University.

REFERENCES

1. Lisovsky N.N., Khalimov E.M. O klassifikatsii trudnoizvlekaemykh zapasov [On the classification of hard-to-recover reserves]. *Vestnik TsKR Rosnedra*, 2009, no. 6, pp. 33–35.
2. Kasimov A.S. Razrabotka mestorozhdeniy s trudnoizvlekaemyimi zapasami [Development of deposits with hard-to-recover reserves]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. Novye tekhnologii – neftegazovomu regionu* [Materials of the international scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists. New technologies for the oil and gas region]. Tyumen, 2015. Vol. 2, pp. 214–215.
3. Yakutseny V P., Petrova Yu.E., Sukhanov A.A. Dinamika doli otноситelnogo soderzhaniya trudnoizvlekaemykh zapasov nefti v obshchem balanse [Dynamics of the share of the relative content of hard-to-recover oil reserves in the overall balance]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2007, vol. 2, pp. 23–33.
4. Sincov I.A., Truhina O.S. Povicheniye nefteotdachi putem zakachki uglekislogo gaza [Enhanced oil recovery by injecting carbon dioxide]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Neft i gaz Zapadnoy Sibiri* [Materials of the international scientific and technical conference. Oil and gas of Western Siberia]. Tyumen, 2015. Vol. 2, pp. 47–49.
5. Kontorovich V.A., Kalinina L.M., Ayunova D.V., Kalinin A.Yu., Kanakov M.S., Kanakova K.I., Surikova E.S. Paleozoy Zapadnoy Sibiri: regionalnaya model geologicheskogo stroeniya i neftegazonosnost [Paleozoic of Western Siberia: regional model of geological structure and oil and gas potential]. *Interespo Geo-Sibir*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 79–83.
6. Khizhnyak G.P., Dieng Assan. The influence of technological parameters on the efficiency of hydraulic fracturing. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 6, pp. 120–125. In Rus.
7. Yamkin M.A., Safiullina E.U. Assessing the correspondence of the results of computer moderation of fluid inflow to a hydraulic fracture to real data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 3, pp. 210–217. In Rus.
8. Galkin V.I., Kolyrin A.N. Justification of the predicted value of the increase in oil production after the use of geological and technical measures using a statistical method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 2, pp. 81–86. In Rus.
9. Shandrygin A.N., Lutfullin A. Current status of enhanced recovery techniques in the fields of Russia. *SPE annual technical conference and exhibition. OnePetro*, 2008.
10. Bera A., Vij R.K., Shah S. Impact of newly implemented enhanced oil and gas recovery screening policy on current oil production and

- future energy supply in India. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 207, pp. 109–196.
11. Dong X., Liu H., Chen Z., Wu K., Lu N., Zhang Q. Enhanced oil recovery techniques for heavy oil and oil sands reservoirs after steam injection. *Applied energy*, 2019, vol. 239, pp. 1190–1211.
 12. Ivanov E.N., Kononov Yu.M., Mukhamadiev R.V. Razrabotka metodiki vybora metodov uvelicheniya nefteotdachi na neftyanykh mestorozhdeniyakh na osnove geologo-fizicheskoy informatsii [Development of a methodology for selecting methods for enhanced oil recovery in oil fields based on geological and physical information]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Uvelichenie nefteotdachi – prioritnoe napravlenie vosпроизводства zapasov uglevodorodnogo syr'ya* [Collection of works of the International scientific practical conference. Increased oil recovery is a priority direction for the reproduction of hydrocarbon reserves]. Ufa, 2011. pp. 229–232.
 13. Altunina L.K., Kuvshinov V.A. Fiziko-khimicheskie metody uvelicheniya nefteotdachi plastov neftyanykh mestorozhdeniy [Physical and chemical methods of enhanced oil recovery of oil fields]. *Uspekhi khimii*, 2007, vol. 76, no. 10, pp. 1034–1052.
 14. Zimin A.S., Sosnin V.A., Zavolzhskiy V.B., Gankin Yu. ., Idiyatullin R.A., Berezina K.V. Modelirovanie protsessov teplo- i gazovydeleniya pri razlozhenii binarnykh sistem v tekhnologii dobychi nefiti i gaza [Modeling of heat and gas release processes during decomposition of binary systems in oil and gas production technology]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, vol. 19, no. 19, pp. 123–127.
 15. Alexandrov E.N., Kuznetsov N.M., Kozlov S.N., Serkin Yu.G., Nizova E.E. Dobycha trudnoizvlekaemykh i neizvlekaemykh zapasov nefiti s pomoshchyu tekhnologii binarnykh smesey [Production of hard-to-recover and non-recoverable oil reserves using binary mixture technology]. *Georesursy*, 2016, vol. 18, no. 3, pp. 154–159.
 16. Aleksandrov E., Koller Z. Technology of oil and bitumen output stimulation by heat from reactions of binary mixtures (BM). *TCTM limited*, 2008, pp. 76.
 17. Kosachuk G.P., Burakova S.V., Bilalov F.R., Melnikova E.V., Butchikina S.I., Budrevich N.V. Aktualnye problemy i perspektivy osvoeniya zapasov nefiti, svyazannykh s podgazovymi neftyanyimi zalezhami i neftyanyimi otorochkami mestorozhdeniy OAO «Gazprom» [Actual problems and prospects for the development of oil reserves associated with under-gas oil deposits and oil rims of Gazprom's fields]. *Vesti gazovoy nauki*, 2012, no. 9, pp. 226–232.
 18. Ivanov E.N., Kononov Yu.M., Mukhamadiev R.V. Razrabotka metodiki vybora mestorozhdeniy pri obosnovanii primeneniya metodov uvelicheniya nefteotdachi na mestorozhdeniyakh Tomskoy oblasti [Development of a methodology for selecting fields in the justification of the application of methods for enhanced oil recovery at the fields of the Tomsk region]. *Sbornik tezisev dokladov IV nauchno-prakticheskoy konferentsii. Matematicheskoe modelirovanie i kompyuternye tekhnologii v protsessakh razrabotki mestorozhdeniy, dobychi i pererabotke nefiti* [Abstract report of the IV scientific and practical conference. Mathematical Modeling and Computer Technologies in the Processes of Field Development, Oil Production and Refining]. Ufa, 2011. pp. 34.
 19. Kravchenko M.N., Dieva N.N., Lishchuk A.N., Muradov A.V., Vershinin V.E. Gidrodinamicheskoe modelirovanie termokhimicheskogo vozdeystviya na nizkopronitsaemye kerozenosoderzhashchie kollektory [Hydrodynamic modeling of thermochemical impact on low-permeability kerogen-bearing reservoirs]. *Georesursy*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 178–185.
 20. Aleksandrov E.N., Varfolomeev S.D., Lidzhi-Goryaev V.Yu., Petrov A.L. Stimulirovanie dobychi nefiti produktami reaktsiy binarnykh smesey (BS) kak alternativa tekhnologiyam, obvodnyayushchimi neftyanoy plast [Stimulation of oil production by products of reactions of binary mixtures (BS) as an alternative to technologies that flood the oil reservoir]. *Tochka opory*, 2012, no. 158, p. 14.
 21. Kuznetsov N.M. K stimulirovaniyu nefteodobychi na osnove binarnykh smesey [To stimulate oil production based on binary mixtures]. *Gorenie i vzryv*, 2016, vol. 9, no. 2, pp. 111–119.
 22. Kun X., Jie M., Narisu, Erofeev V.I., Cheng S., Weidong J., Xiangguo L. Study on seepage characteristics and displacement efficiency of water flooding in offshore heavy oil reservoir // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 105–114. In Rus.
 23. Narisu, Erofeev V.I., Lu X., Lv J., Wang X., Zhang L. The effect of layer water mineralization on physical chemical and filtration characteristics of polymeric solutions and gels for increasing oil recovery. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 136–145. In Rus.
 24. Narisu, Erofeev V.I., Lu X., Tian Z., Zhang L. Optimization of parameters of inorganic profile control agent on the basis of sodium silicate for effective oil displacement from high salinity reservoir. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 11, pp. 59–68. In Rus.
 25. Narisu, Erofeev V.I., Lv J., Wang W. Study on filtration and rheological properties of polymer gel to improve oil recovery. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 3, pp. 147–157. In Rus.
 26. Kitov E.S., Erofeev V.I., Dzhailova S.N. Analysis of technologies of natural gas field preparation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 10, pp. 31–38. In Rus.

Received: 10 April 2023.
Reviewed: 17 April 2023.

Information about the authors

Roman N. Korotkov, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Andrey A. Kononov, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Diana M. Ovcharenko, Master student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vladimir I. Erofeev, honoured worker of science of the RF, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.