УДК
622.276.3

В.П. Малюков, Ш.Э. Буурулдай

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ЦИКЛИЧЕСКОГО ПАРОТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ

Проанализированы тепловые технологии воздействия на месторождения высоковязкой нефти в различных регионах. Рассмотрены инновационные отечественные и зарубежные технологии паротеплового воздействия с использованием горизонтальных скважин. Применение технологии термокапиллярного гравитационного дренирования с использованием двух горизонтальных скважин может увеличить коэффициент извлечения нефти в два раза по сравнению с ранее применяемыми технологиями.
Ключевые слова: высоковязкая нефть, тепловые методы, Ярегское и Усинское месторождения, термошахтная разработка, внутрипластовое горение, паротепловая обработка, горизонтальные скважины, радиальные отводы, термогравитационное дренирование, месторождение Бока де Харуко (Куба), Ашальчинское месторождение (Татарстан).

Существуют различные технологии добычи нефти. К нефтегазовым нанотехнологиям относятся тепловые технологии (закачка через скважины в продуктивный пласт горячей воды, пара, термогенерирующих агентов).

Высоковязкие нефти в настоящее время рассматриваются как основной резерв мировой добычи нефти. В последние годы доля высоковязкой нефти (ВВН) в общей добыче нефти в мире постоянно растет.

Особую актуальность представляют технологии повышения эффективности эксплуатации скважин, методы и технологии повышения нефтеотдачи и обеспечения экономически рентабельной эксплуатации месторождений с трудноизвлекаемыми запасами.

Более 3-х десятков лет на двух крупных месторождениях (Ярегском и Усинском) испытывались и испытываются самые

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 12. С. 260–269.
© 2016. В.П. Малюков, Ш.Э. Буурулдай.

современные технологии добычи высоковязкой нефти, позволившие многократно увеличить нефтеотдачу пласта. Некоторые из этих технологий, например, термошахтный метод, закачка пара высокой температуры на глубину 1200–1300 м, пароциклические обработки скважин с радиальными отводами, являются уникальными и применяются только на Ярегском и Усинском месторождениях [1].

Уникальность Ярегского нефтетитанового месторождения состоит в том, что кроме больших запасов нефти оно содержит огромные запасы нефтетитановой руды (50% общероссийских). Нефтетитановая руда представляет собой пропитанный нефтью песчаник.

Месторождения высоковязкой нефти представляют собой сложную многопластовую систему, этажи нефтеносности которой имеют не только различные емкостно-фильтрационные свойства, но и отличные друг от друга свойства пластового флюида.

Существуют различные методы разработки залежей тяжелых нефтей и природных битумов, которые различаются технологическими и экономическими характеристиками. Условно их можно подразделить на три группы:

1 – карьерный и шахтный способы разработки;

2 – так называемые «холодные» способы добычи;

3 – тепловые методы добычи.

Наиболее известным примером шахтно-скважинной и термошахтной разработки залежей тяжелых нефтей является разработка Ярегского месторождения.

Шахтный способ с применением теплового воздействия на пласт (термошахтный) включает в себя одногоризонтную, двухгоризонтную и подземно-поверхностную системы разработки. Нефтеотдача при высокой обводненности и низкой производительности скважин достигает 50% [2].

Тепловые методы разработки нефтяных месторождений делятся на два принципиально различных вида.

Первый, основанный на внутрипластовых процессах горения, создаваемых путем инициирования горения коксовых остатков в призабойной зоне нагнетательных скважин с последующим перемещением фронта горения путем нагнетания воздуха (сухое горение) или воздуха и воды (влажное горение).

Второй вид, наиболее широко применяемый в России и за рубежом, основанный на нагнетании с поверхности теплоносителей в нефтяные пласты.

Методы нагнетания теплоносителя в нефтяные пласты имеют две принципиальные разновидности технологии. Первая – основана на вытеснении нефти теплоносителем и его оторочками. Такая разновидность получила в зависимости от вида используемого теплоносителя наименования: паротеплового воздействия на пласт (ПТВ) и воздействия горячей водой (ВГВ), вторая – на паротепловой обработке призабойной зоны добывающих скважин (ПТОС). В этом случае в качестве теплоносителя используется насыщенный водяной пар.

Для разработки месторождений высоковязкой нефти необходимы новейшие тепловые методы, превосходящие по эффективности уже традиционные технологии теплового воздействия [3].

На Ярегском и Усинском месторождениях высоковязкой нефти применяются уникальные инновационные технологии разработки. Технология термогравитационного дренирования пласта впервые была применена на Ярегском месторождении, а в дальнейшем совершенствовлась при применении на месторождениях высоковязкой нефти в Канаде и других странах.

Как показала практика, одним из самых эффективных способов разработки месторождений с аномально высокой вязкостью нефти является термошахтный метод. На Ярегском месторождении высоковязкой нефти (вязкость в пластовых условиях 12 000–16 000 МПа · с) средний коэффициент извлечения нефти (КИН) на отработанных площадях достиг 0,6. Такое нефтеизвлечение является очень высоким и для месторождений обычной (легкой) нефти, а на месторождениях с аномально высокой вязкостью нефти КИН редко превышает 0,2–0,3.

При тепловом воздействии на пласт не только повышается эффективность гидродинамического вытеснения нефти из высокопроницаемых зон, но и, благодаря теплопроводному прогреву низкопроницаемых коллекторов, месторождения вовлекаются в активную разработку за счет интенсификации следующих процессов нефтеизвлечения: капиллярной пропитки, термоупругого расширения и испарения пластовых жидкостей, вытеснения нефти газом, генерируемым в пласте при высоких температурах, диффузионных процессов [4].

С целью изучения возможности вовлечения в активную разработку низкопроницаемых коллекторов пермо-карбоновой залежи при реальных пластовых давлениях были впервые проведены уникальные исследования нефтеотдачи пласта за счет термоупругого расширения пластовых жидкостей при темпе-

ратурах до 320 °С. Эти исследования показали, что при температурах свыше 200 °С в пласте происходит генерация больших количеств газа, в основном углекислого, который эффективно вытесняет нефть. За счет термоупругого расширения пластовых жидкостей нефтеотдача повышается до 40–50% при увеличении температуры до 300 °С.

Для максимальной реализации тепловых механизмов необходимо применять следующие технологии:

• пароциклическая обработка горизонтальных скважин или радиальных отводов, пробуренных из существующих вертикальных скважин;

• пароциклическая обработка пробуренных вертикальных скважин через горизонтальные.

В мировой практике наиболее перспективной технологией в области разработки ресурсов высоковязких нефтей и природных битумов является технология термогравитационного дренирования (ТГДП) или Steam assisted gravity drainage (SAGD) (рис. 1). Эта технология впервые в мире была применена на Ярегском месторождении.

Средняя удельная дополнительная добыча нефти от проведения ПЦО на Усинском месторождении составляет около 1,8 тыс. т/скв., что характеризует ПЦО как одно из самых эффективных геолого-технологических мероприятий, проводимых на залежи.

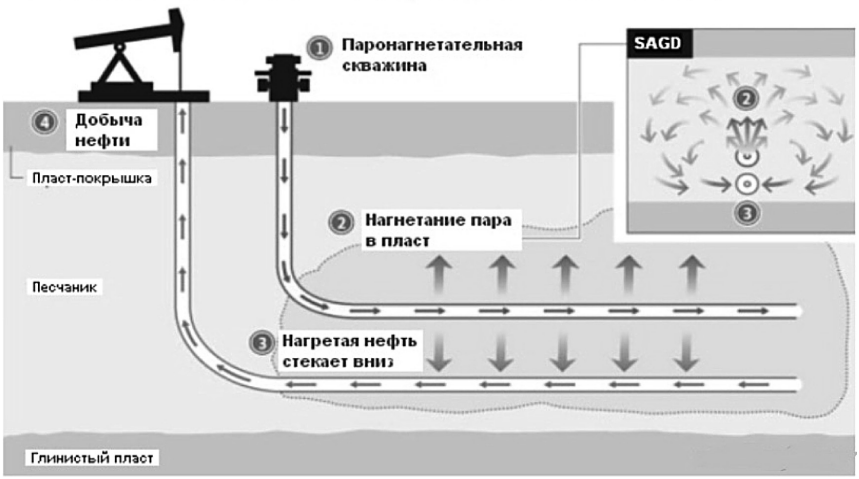

Рис. 1. Схема классической технологии термогравитационного дренирования пласта (ТГДП)

Эффективность ПЦО существенно зависит от базовых характеристик обрабатываемых скважин (их обводненности и продуктивности). В случае если базовая обводненность скважин оказывается больше 75%, а продуктивность – меньше 30 т/сут · МПа, на таких скважинах необходимо проводить дополнительные геолого-технические мероприятия (ГТМ), направленные на снижение обводненности или увеличение продуктивности обрабатываемых пластов [5].

В условиях залежи Усинского месторождения использование интеллектуального заканчивания в горизонтальных добывающих скважинах направлено на вовлечение в активную разработку матричной части ее разреза, как на естественном режиме, так и при тепловом воздействии на пласт. Учитывая геологические особенности залежи, интеллектуальным заканчиванием должны быть оборудованы преимущественно горизонтальные добывающие скважины, расположенные в тектонически-активных зонах.

С недавнего времени на скважинах с базовой обводненностью более 75% проводятся комбинированные ПЦО с закачкой гелеобразующей композиции «ГАЛКА-С».

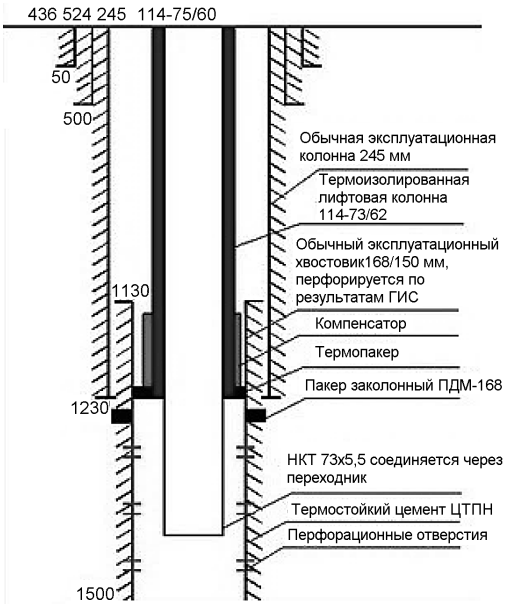

Рис. 2. Схема конструкции скважины пароциклической обработки на месторождении Бока де Харуко

В результате проведенного анализа работы скважин установлено (ОАО «Всероссийский нефтегазовый научно-исследовательский институт имени академика А.П. Крылова»), что эксплуатация добывающих скважин на месторождении Бока де Харуко (Республика Куба) осуществляется в осложненных условиях. Основными осложняющими факторами являются: высокая вязкость и плотность добываемой жидкости, высокая стойкость водонефтяных эмульсий, большая кривизна скважин и наличие сероводорода.

Сущность паротепловой обработки призабойной зоны скважины (ПТОС) (рис. 2) заключается в следующем: пар, имеющий температуру насыщения и влажность около 70% (зависит, главным образом, от глубины пласта), поступает в течение 10–60 суток в пласт. Затем закачка прекращается, скважина в течение некоторого периода (период «пропитки») простаивает для перераспределения флюидов в призабойной зоне и снижения температуры до уровня приемлемого для работы глубинного насоса, после чего скважина переводится в режим добычи [6].

Основные параметры, характеризующие разработку месторождений высоковязкой нефти: Усинского, Бока де Харуко

Параметры	**Величины**	
	Бока де Харуко	**Усинское месторождение**
Тип коллектора	трещиновато-поровый	трещиновато-поровый
Характеристика породы	известняк	известняк
Средняя глубина залегания, м	1360	1260
Средняя нефтенасыщенная толщина пласта, м	90,6	51,3
Потенциально извлекаемые запасы, млн т	44,9	55
Средняя пористость, %	13,4	19
Пластовая температура, °С	50	23
Пластовое давление, МПа	17,8	14,03
Газосодержание, $м^3$/т	60,93	23,1
Плотность нефти в пластовых условиях, кг/$м^3$	901,35	933
Вязкость пластовой нефти, МПа*с	150	710

На рис. 2 показана схема конструкции скважины пароциклической обработки на месторождении Бока де Харуко.

В таблице приведены основные параметры, характеризующие разработку месторождений высоковязкой нефти: Усинского и Бока де Харуко.

Технологии, апробированные на Усинском месторождении, рекомендованы для разработки месторождения Бока де Харуко в связи со схожестью многих параметров, несмотря на региональные различия.

С учетом опыта разработки Усинского месторождения, для обоснования эффективной технологии повышения нефтеотдачи на месторождении Бока де Харуко, рассмотрены паротепловое воздействие и пароциклическая обработка при площадной закачке пара.

В России ресурсы сверхвязких и сверхтяжелых нефтей по разным оценкам составляют 30–75 млрд т. Подавляющая их часть (71%) сосредоточена в Волго-Уральском регионе (главным образом в Татарстане).

По проекту ТатНИПИнефти с 2006 г. на Ашальчинском месторождении начаты опытно-промышленные работы по испытанию технологии термокапиллярного гравитационного дренирования пласта с использованием двух горизонтальных скважин, у каждой из которых по 2 устья, т.е. скважины выходят на дневную поверхность. Разработка залежи СВН методом парогравитационного воздействия может увеличить коэффициент извлечения нефти (КИН) в 2 раза по сравнению с ранее применяемыми технологиями.

С 2006 г. по технологии термокапиллярогравитационного дренирования пласта начата разработка пилотного участка залежи сверхвязкой нефти СВН Ашальчинского поднятия Ашальчинского нефтяного месторождения. Результаты опытно-промышленной разработки залежи сверхвязких нефтей Ашальчинского месторождения с применением парогравитационного дренажа при помощи горизонтальных пар скважин показали, как по-разному повлияли на технологические показатели разработки геологические особенности строения участков эксплуатации. Одним из важнейших условий успешного применения технологии парогравитационного дренажа является строго параллельное размещение парных горизонтальных скважин, как относительно друг друга, так и условно принятой подошвы нефтенасыщенного пласта.

Для реализации SAGD бурят 2 параллельные горизонтальные скважины. Как только пар подан в верхнюю скважину, он

формирует прогретую паром область (паровую камеру). На сторонах камеры пар конденсируется, отдавая скрытую теплоту флюидам, и, таким образом, делает подвижным высоковязкую нефть и природные битумы путем значительного уменьшения их вязкости [7].

Далее начинает действовать сила тяжести, которая опускает сконденсированную воду и подвижные углеводороды к добывающей скважине, пробуренной в нижней части пласта.

Технологии с использованием прогрева пласта паром показали свою эффективность и применяются в различных вариациях и исполнениях. При закачке пара очень часто используются физико-химические методы, такие как закачка гелеобразующих составов, растворителей, ПАВ, щелочей и т.д. Технология парогравитационного воздействия на пласт способствует достижению конечного КИН, равного 0,7 для месторождений СВН вязкостью более 20 000 МПа*с, содержащих однородные песчаные коллекторы.

Применение технологии парогравитационного дренирования пласта с использованием горизонтальных скважин обеспечивает эффективное вытеснение в осложненных условиях, вызванных особенностями геологического строения.

Применение инновационных технологий разработки трудноизвлекаемой нефти месторождений позволяет увеличить нефтеотдачу, улучшить фильтрационно-емкостные свойства в продуктивных пластах и пролонгировать эффективное нефтеизвлечение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воробьев А. Е.*, *Малюков В. П.*, *Алибеков М. Э.* Инновационные технологии интенсификации добычи нефти из неоднородных пластов на месторождениях сверхвязких нефтей Татарстана // Вестник РУДН, серия «Инженерные исследования». – 2015. – № 3. – С. 83–85.

2. *Воробьев А. Е.*, *Малюков В. П.*, *Алпацкая М. С.* Инновационные технологии разработки залежей высоковязких нефтей Ярегского и Усинского месторождений / Материалы XII международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр» Москва (Россия) – Занджан (Иран). – М.: РУДН, 2013. – С. 185–187.

3. *Воробьев А. Е.*, *Малюков В. П.*, *Кельбедина Т. В.* Совершенствование термошахтной разработки Ярегского месторождения высоковязкой нефти / Материалы VII Международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр», Москва-Ереван, 2008. – М.: РУДН, 2008. – С. 96–98.

4. *Воробьев А. Е.*, *Малюков В. П.*, *Князева Э. А.* Применение тепловых методов воздействия на высоковязкую нефть для интенсификации добычи / Материалы VIII Международной конференции «Ресурсово-

спроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр». – М.: РУДН, 2009. – С. 152–155.

5. *Игнатова К. П.*, *Малюков В. П.* Инновационная технология термогазового воздействия на нетрадиционные углеводороды трудноизвлекаемых запасов Баженовской свиты: монография. – М.: РУДН, 2013. – 147 с.

6. *Мищенко И. Т.*, *Искрицкая Н. Н.*, *Богословский С. А.* Выбор способа эксплуатации скважин с трудноизвлекаемыми запасами. – М.: Изд-во «Нефть и газ», 2005. – 448 с.

7. Проблемы разработки и эксплуатации месторождений высоковязких нефтей и битумов: материалы межрегиональной научно-технической конференции (15–16 ноября 2012 г.) / Под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2013. – 199 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Малюков Валерий Павлович[1] – кандидат технических наук, доцент, e-mail: v.malyukov@mail.ru,
Буурулдай Ш. Э.[1] – магистр, e-mail: buurulday@mail.ru,
[1] Российский университет дружбы народов.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 12, pp. 260–269.

UDC 622.276.3

V.P. Malyukov, Sh.E. Buurulday

PHYSICAL PROCESSES OF CYCLIC STEAM STIMULATION FOR THE DEVELOPMENT OF HEAVY OIL FIELDS

The subject of article analyzed the impact of technology on thermal heavy oil deposits in different regions. The article consideres innovative domestic and foreign technology steam stimulation using horizontal wells. Application of technology thermocapillary gravity drainage using two horizontal wells can increase the recovery factor of oil in half as compared with the previously applied technologies.

Key words: heavy oil, thermal methods, Yaregskoe and Usinskoe oil fields, thermal mining development, in-situ burning, steam-heat treatment, horizontal wells, radial bends, thermodraining, Boca de Haruko oil field (Cuba), Ashalchinskoye (Tatarstan).

AUTHORS

Malyukov V. P.[1], Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: v.malyukov@mail.ru,
Buurulday Sh. E.[1], Magister, e-mail: buurulday@mail.ru,
[1] Peoples' Friendship University of Russia, 113093, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Vorob'ev A. E., Malyukov V. P., Alibekov M. E. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov, seriya «Inzhenernye issledovaniya»*. 2015, no 3, pp. 83–85.

2. Vorob'ev A. E., Malyukov V. P., Alpatskaya M. S. *Materialy XII mezhdunarodnoy konferentsii «Resursovosproizvodyashchie, malootkhodnye i prirodookhrannye tekhnologii osvoeniya nedr»* Moskva (Rossiya) Zandzhan (Iran) (Materials of the XII International Conference «Resursovosproizvodyaschie, low-waste and environmental technology de-

velopment of mineral resources», Moscow (Russia) – Zanjan (Iran)), Moscow, RUDN, 2013, pp. 185–187.

3. Vorob'ev A. E., Malyukov V. P., Kel'bedina T. V. *Materialy VII Mezhdunarodnoy konferentsii «Resursovosproizvodyashchie, malootkhodnye i prirodookhrannye tekhnologii osvoeniya nedr»*, Moskva-Erevan (Proceedings of the VII International Conference «Resursovosproizvodyaschie, low-waste and environmental technology development of mineral resources», Moscow – Erevan), Moscow, RUDN, 2008, pp. 96–98.

4. Vorob'ev A. E., Malyukov V. P., Knyazeva E. A. *Materialy VIII Mezhdunarodnoy konferentsii «Resursovosproizvodyashchie, malootkhodnye i prirodookhrannye tekhnologii osvoeniya nedr»* (Proceedings of the VIII International Conference «Resursovosproizvodyaschie, low-waste and environmental technology development of mineral resources»), Moscow, RUDN, 2009, pp. 152–155.

5. Ignatova K. P., Malyukov V. P. *Innovatsionnaya tekhnologiya termogazovogo vozdeystviya na netraditsionnye uglevodorody trudnoizvlekaemykh zapasov Bazhenovskoy svity*: monografiya (Innovative thermal gas impact on the nonconventional hydrocarbon reserves of Bazhenov formation, monograph), Moscow, RUDN, 2013, 147 p.

6. Mishchenko I. T., Iskritskaya N. N., Bogoslovskiy S. A. *Vybor sposoba ekspluatatsii skvazhin s trudnoizvlekaemymi zapasami* (The choice of operating wells with hard to recover reserves), Moscow, Izd-vo «Neft' i gaz», 2005, 448 p.

7. *Problemy razrabotki i ekspluatatsii mestorozhdeniy vysokovyazkikh neftey i bitumov: materialy mezhregional'noy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* (15–16 noyabrya 2012 g.). Pod red. N. D. Tskhadaya (Problems of development and exploitation of high-viscosity oils and bitumens: the materials inter-regional scientific conference, 15–16 November 2012), Ukhta: UGTU, 2013, 199 p.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ПРОБЛЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ ГЕОРЕСУРСОВ

Балек А.Е., Сашурин А.Д., Рассказов И.Ю. и др.

Сборник содержит материалы VI Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых «Проблемы комплексного освоения георесурсов» (г. Хабаровск, октябрь 2016 г.). Рассмотрен широкий круг актуальных вопросов, связанных с добычей и переработкой минерального сырья, ведением горных работ в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях, и намечены направления эффективного и безопасного освоения недр. Представлены новые результаты фундаментальных и прикладных исследований в области геотехнологии, глубокой переработки минерального сырья, геомеханики, геоэкологии и других разделов горных наук, играющих важную роль для эффективного и безопасного освоения недр.

Ключевые слова: георесурсы, минеральное сырье, геотехнологии, комплексное освоение недр, Дальний Восток.

PROBLEMS OF INTEGRATED DEVELOPMENT OF GEO-RESOURCES

Balek A.E., Sashurin A.D., Rasskazov I.Yu. and other

The collection contains materials of the VI all-Russian scientific conference with participation of foreign scientists "Problems of integrated development of geo-resources" (Khabarovsk, October 2016). They discussed a wide range of topical issues associated with the extraction and processing of mineral resources, mining in difficult geological and mining conditions and directions of effective and safe development of mineral resources. Presents new results of fundamental and applied research in the field of Geotechnology, deep processing of minerals, geomechanics, environmental Geology and other branches of mining Sciences that play an important role for the efficient and safe development of mineral resources.

Key words: in mineral resources, geotechnology, comprehensive development of mineral resources, Far East.