УДК 622.276.56

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОДНОВРЕМЕННО-РАЗДЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА НЕФТЯНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ РАВНИНЫ

ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF USING SIMULTANEOUS-SEPARATE EXPLOITATION TECHNOLOGY IN AN OIL FIELD IN THE CENTRAL PART OF THE WEST SIBERIAN PLAIN

Шаблий Илья Игоревич
аспирант,
Кубанский государственный технологический университет
ilyashabliy0209@gmail.com

Аннотация. Сегодня техника и технологии одновременно-раздельной эксплуатации (ОРЭ) нескольких пластов и одновременно-раздельной закачки (ОРЗ) жидкостей и газов в пласты, а также, в первую очередь, обеспечение этих процессов информационными технологиями переживают второе рождение. Системы ОРЭ и ОРЗ появились достаточно давно, но по-настоящему востребованными оказались только теперь. Конечно, это связано, прежде всего, с существенным изменением цен на нефть, равно как и на услуги, и оборудование для подъёма и подготовки нефти. Надо отметить, что нефтяные компании уже не говорят о том, что нужно уменьшать затраты при закупке оборудования – возникло понимание необходимости рассматривать весь комплекс показателей оборудования и технологий, заботясь не только о сокращении капитальных, но и эксплуатационных затрат. Этот подход заставил многие нефтяные компании вспомнить о тех технологиях, которые были известны достаточно давно. Расширенное внедрение технологий ОРЭ и ОРЗ позволяет решать очень многие проблемы и ставить новые задачи перед теми, кто занимается разработкой этих технологий и техники и их внедрением.

Ключевые слова: одновременно-раздельная эксплуатация; одновременно-раздельная закачка; одновременно-раздельная разработка нескольких эксплуатационных объектов; система мониторинга одновременно-раздельной эксплуатации пластов; организация и результаты мониторинга добывающих скважин; организация и результаты мониторинга нагнетательных скважин; этапы развития систем совместной эксплуатации.

Shabliy Ilya Igorevich
Graduate Student,
Kuban State Technological University
ilyashabliy0209@gmail.com

Annotation. Today, the techniques and technologies for simultaneous-separate exploitation of several formations and simultaneous-separate injection of liquids and gases into formations, as well as, first of all, the provision of these processes with information technologies are experiencing a rebirth. Simultaneous-separate exploitation and simultaneous-separate injection systems appeared quite a long time ago, but they have only become truly in demand now. Of course, this is due, first of all, to a significant change in oil prices, as well as for services and equipment for lifting and treating oil. It should be noted that oil companies no longer talk about the need to reduce costs when purchasing equipment - there is an understanding of the need to consider the entire range of equipment and technology indicators, taking care not only of reducing capital, but also operating costs. This approach forced many oil companies to remember those technologies that had been known for quite a long time. The expanded implementation of technologies for simultaneous-separate operation and simultaneous-separate injection makes it possible to solve many problems and pose new challenges for those involved in the development of these technologies and equipment and their implementation.

Keywords: simultaneous-separate exploitation; simultaneous-separate injection; simultaneous and separate development of several operational facilities; monitoring system for simultaneous-separate reservoir exploitation; organization and results of monitoring of production wells; organization and results of monitoring of injection wells; stages of development of joint operation systems.

Общие сведения о месторождении

Рассматриваемое нефтяное месторождение находится в центральной части Западно-Сибирской равнины. В административном отношении месторождение расположено на территории Ханты-Мансийского автономного округа Тюменской области. Месторождение открыто в 1982 году, в промышленную эксплуатацию введено в 1999 году.

Геологический разрез южной части месторождения имеет клиноформное строение, представленное переслаиванием линз коллекторов со сложной геометрией распространения. Выделяются зоны залегания коллекторов ундаформного, клиноформного и фондаформного строения.

Основные скопления нефти приурочены к горизонтам $АС_{10}$ и $АС_{12}$, основными пластами в которых являются $АС^{1}_{10}$ и $АС^{0}_{11}$, $АС^{1}_{11}$, $АС^{1\text{-}2}_{12}$, $АС^{3\text{-}4}_{12}$ соответственно.

Продуктивные пласты залегают на следующих средних глубинах:

- пласт $АС_{10}^{1}$ на глубине 2484 м;
- пласт $АС_{11}^{0}$ на глубине 2497 м;
- пласт $АС_{11}^{1}$ на глубине 2586 м;
- пласт $АС_{12}^{1\text{-}2}$ на глубине 2648 м;
- пласт $АС_{12}^{3\text{-}4}$ на глубине 2657 м.

Пласты $АС_{10}$, $АС_{11}$ и $АС_{12}$ объединены в один эксплуатационный объект.

На широте скважин № 472–475 происходит резкое увеличение (примерно на 50 м) глубины залегания кровли пластов в южной части рассматриваемой площади по сравнению с северной.

Границами залежи являются линии литологического замещения коллекторов непродуктивными породами.

Для нефтей продуктивных пластов характерны следующие свойства:

- малая вязкость пластовой нефти (1,38–1,77 мПа · с);
- среднее газосодержание (55–60 $м^3$/т);
- нефти средней плотности (818–834 кг/$м^3$);
- достаточно высокое содержание серы (1,2–1,3 %);
- относительно небольшое количество парафинов (2,2–2,8 %);
- среднее содержание смол (6,6–8,1 %) и асфальтенов (2,0–2,5 %).

Запасы нефти и растворённого газа утверждены ГКЗ РФ и поставлены на баланс РГФ по продуктивным горизонтам $АС_{10}$ и $АС_{12}$ в количестве:

- по категории $С_1$ 941,436 млн тонн – балансовых запасов;
- 180,902 млн тонн – извлекаемых запасов;
- КИН – 0,198;
- по категории $С_2$ 261,176 млн тонн – балансовых запасов;
- 36,565 млн тонн – извлекаемых запасов;
- КИН – 0,140.

Доля запасов категории $С_2$ составляет 22 %.

Таким образом, основной объём запасов нефти содержится в низкопроницаемом горизонте $АС_{12}$: балансовых 85 % и извлекаемых 79 %. В продуктивном горизонте $АС_{10}$ с небольшой нефтенасыщенной толщиной (5,52 м) и занимающим около 30 % площади месторождения содержится 15 % балансовых и 19 % извлекаемых запасов нефти. Необходима доразведка месторождения, так как доля запасов категории С2 составляет 22 %.

Геотехнология одновременно-раздельной разработки нескольких эксплуатационных объектов (ОРРНЭО)

Для многопластовых месторождений с целью сокращения капитальных вложений на бурение скважин (отдельной сетки на каждый из эксплуатационных объектов), а также эксплуатационных расходов и срока освоения месторождения идут на укрупнение эксплуатационных объектов путём дострела новых пластов на существующих скважинах. При этом, как правило, не удаётся достигнуть заданного коэффициента извлечения нефти (КИН) и суммы потенциальных возможностей каждого из эксплуатационного объекта и суммарное значение дебитов значительно меньше (на 20–40 %).

При разработке неоднородных по проницаемости и нефтенасыщенности продуктивных горизонтов происходит опережающее обводнение высокопроницаемых и водонасыщенных нефтяных пластов (прослоев) и участков эксплуатационного объекта и частичное или полное «отключение» из процесса выработки средне- и низкопроницаемых прослоев. Вероятность «отключения» прослоев тем выше, чем ниже гидродинамическая связь между высокопроницаемыми и низкопроницаемыми пластами на площади залежи, выше разница в проницаемости слагающих разрез пластов, меньше песчанистость разреза, а также эффективная толщина низкопроницаемых тонкослоистых прослоев. На залежах с такими продуктивными горизонтами имеется необходимость в массовом применении предлагаемой технологии ОРРНЭО с целью выравнивания профиля приёмистости нагнетательных скважин и профиля притока в добывающих скважинах (интенсификации процесса выработки запасов нефти из низкопроницаемых пластов).

Геотехнология ОРРНЭО позволяет обеспечить дифференцированное воздействие (от частичного ограничения режима до полного отключения, по меньшей мере, одного пласта) на различные эксплуатационные объекты (интервалы и/или участки пласта) в зависимости от их конкретного геологического строения и состояния разработки участка.

На рисунке 1 представлена общая схема одновременно-раздельной добычи (ОРД) и одновременно-раздельной закачки (ОРЗ).

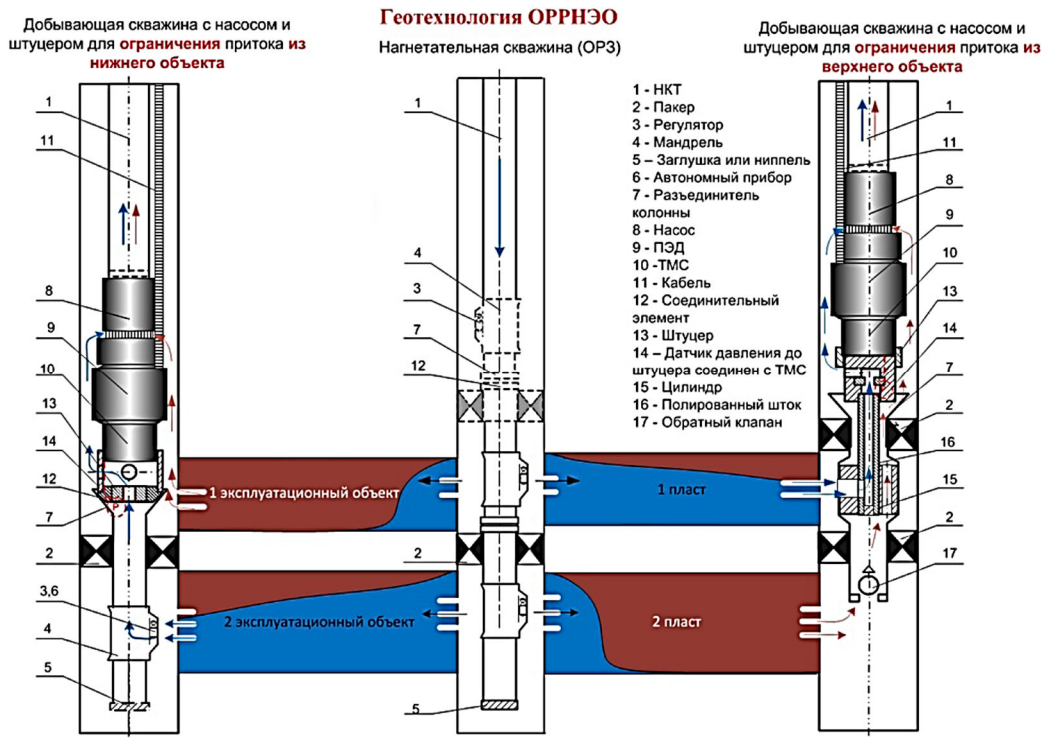


Рисунок 1 – Схема установок ОРРНЭО

Кроме этого, данная технология позволит проводить совместную разработку нефтяной оторочки и газовой шапки, предупредить образование газовых и водяных конусов, регулировать отбор из разных участков горизонтальной и разветвлённой скважин.

Большинство скважин (нижележащих горизонтов) не до конца выполнили своё назначение, и хотя эксплуатация многих из них из-за высокой обводнённости или прорыва свободного газа является низкорентабельной, для достижения проектных значений КИН их необходимо продолжать эксплуатировать, причём на максимально возможных режимах. Организация форсированных отборов возможна за счёт применения газлифта, позволяющего значительно интенсифицировать добычу нефти. Однако для повышения рентабельности скважины с одновременным использованием энергетического потенциала, в том числе для минимизации влияния осложняющих условий (АСПО, гидратопарафиновые образования, высоковязкая нефть и др.), целесообразно подключить к ней менее продуктивные, но и менее обводнённые интервалы.

Технология одновременно-раздельной разработки нескольких эксплуатационных объектов одной скважиной эффективно внедряется на различных категориях скважин различных месторождений. В настоящее время технология ОРРНЭО успешно используется на Южно-Приобском, Ван-Ёганском, Ай-Ёганском, Тарасовском, Барсуковском и других месторождениях.

Технология ОРРНЭО уже внедрена на следующих категориях скважин:

- нагнетательные скважины;
- скважины, эксплуатируемые бескомпрессорным газлифтом;
- скважины, эксплуатируемые электроцентробежным насосом;
- фонтанные скважины;
- газодобывающие;
- добывающие нефть из нефтяной оторочки;
- добывающе-нагнетательная скважина, используемая одновременно для добычи нефти и закачки агента;
- скважина, используемая одновременно для нагнетания и утилизации воды;
- скважина, используемая для водогазового воздействия, путём перепуска газа из нижнего пласта и закачкой воды с поверхности.

На многопластовых месторождениях в отличие от традиционной схемы «снизу – вверх» с помощью технологии ОРРНЭО можно проводить эксплуатацию объектов по индивидуальной наиболее рентабельной схеме. При этом в начальный период эксплуатации обеспечивается фонтанирование скважины, используя энергию пласта и дополнительную энергию газовых залежей, а в поздний период при механизированном способе последовательность разработки объектов выбирается с учётом их продуктивности и обводнённости. Скважины, законченные в нескольких продуктивных пластах, изолируют их друг от друга при помощи пакеров.

Технологии и варианты одновременно-раздельной эксплуатации

К основным технологиям ОРЭ двух пластов одной скважиной относятся: фонтан – фонтан; фонтан – УЭЦН; фонтан – ГПНУ; фонтан – УСШН; УЭЦН – УЭЦН; УЭЦН – УЭВН; УЭЦН – ГПНУ; УЭЦН – УСШН; УСШН – УСШН. Одновременно-раздельная закачка может осуществляться по двум, трём и т.д. пластам. Одновременно-раздельная закачка и добыча применяется в двух основных вариантах: добыча «наверх» – закачка «сверху»; добыча – закачка с внутрискважинной сепарацией пластового флюида.

Среди основных причин перехода к технологии ОРЭ при вскрытии нескольких продуктивных пластов можно назвать:

- недостаточная продуктивность планируемого к разработке пласта;
- различные параметры вскрытых пластов (обводнённость продукции, пластовое давление, ФЕС, свойства пластового флюида), исключающие возможность их эксплуатации одним видом оборудования;
- применение технологии бурения горизонтальных скважин и/или дополнительных боковых стволов, в результате чего вскрываются разные по характеристикам пласты и пропластки;
- технико-экономические показатели, определяющие возможность применения технологии ОРЭ, которая может применяться как на одноствольных, так и на многоствольных скважинах (рис. 2).

Рассмотрим варианты одновременно-раздельной добычи и одновременно-раздельной закачки.

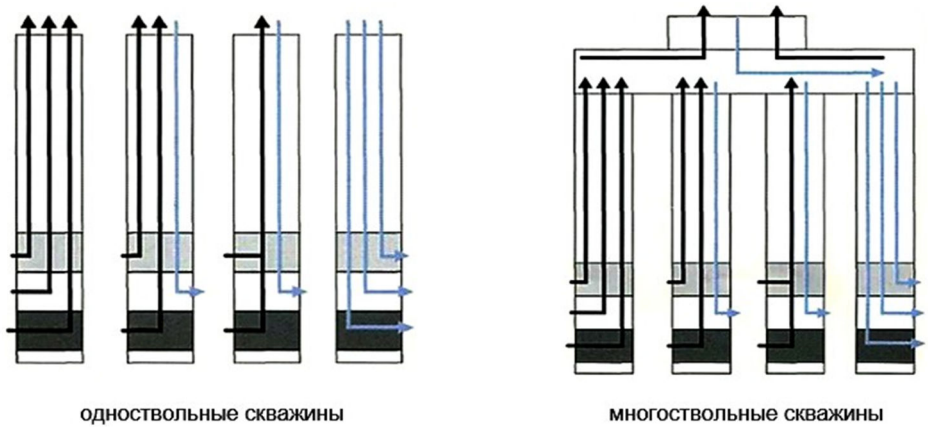


Рисунок 2 – Примеры вариантов ОРЭ на одноствольных и многоствольных скважинах

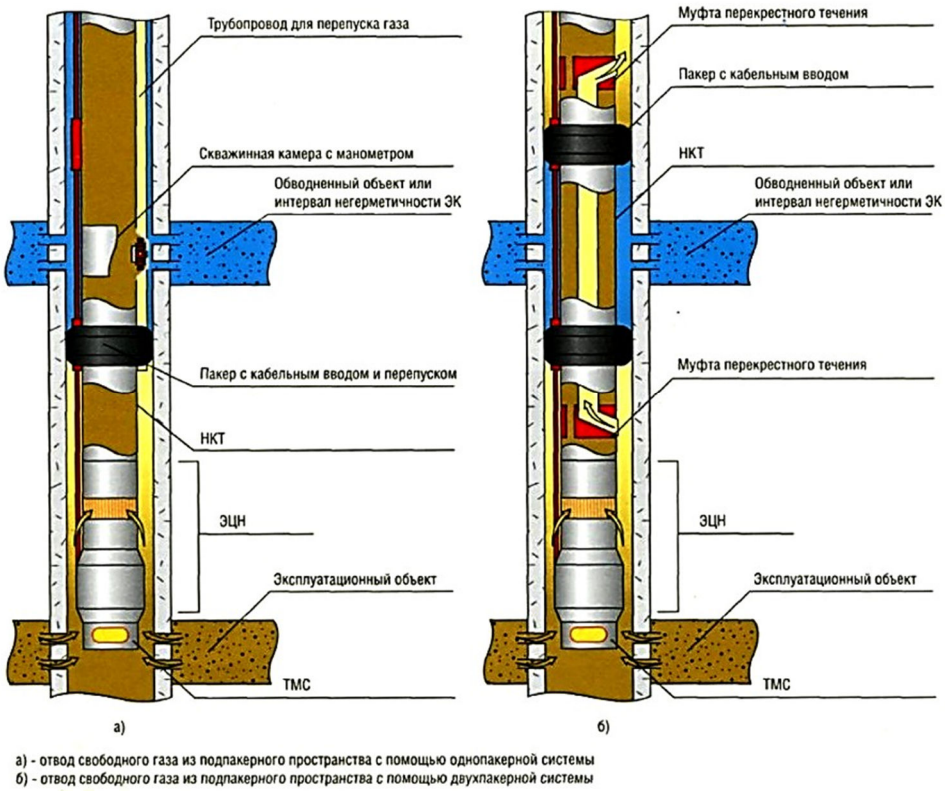
Пример представляет собой схему ОРД с разными вариантами отвода свободного газа из подпакерного пространства: с помощью однопакерной и двухпакерной систем (рис. 3). Отбор жидкости осуществляется посредством ЭЦН из двух пластов с помощью двух систем подъёма жидкости на поверхность, а также с помощью перепуска газа, который может собираться под одним из пакеров в затрубное пространство, расположенное выше пакерных систем.

В случае ОРЗ могут применяться системы скважинных камер, в которых устанавливаются измерительные приборы и регуляторы давления и расхода жидкости (рис. 4). Эти системы дают возможность изменять параметры закачки без спускоподъемных операций всего скважинного оборудования. ОРЗ в данном случае может обеспечивать утилизацию пластовой или попутной воды, или работу системы ППД.

Этапы развития систем совместной и одновременно-раздельной эксплуатации на рассматриваемом месторождении

Для достижения заданной цели по управлению и контролю добычи из каждого объекта эксплуатации внедрение систем совместной и одновременно-раздельной эксплуатации проводится поэтапно. На рисунке 5 представлены этапы развития подобных систем, которые уже пройдены, а также следующие этапы, в рамках которых проводятся и будут проводиться в дальнейшем испытания по нахождению оптимальной схемы размещения подсистемы контроля и мониторинга многопластовых скважин. Данные работы являются частью комплексного проекта интеллектуализации и автоматизации рассматриваемого месторождения.

Первоначально на месторождении не предусматривалось использование систем раздельной добычи. Основой долговременного мониторинга совместной работы пластов являлись стационарные датчики давления и температуры на приёме насоса (ТМС), которые дают информацию об интегральных свойствах пластов (рис. 5, этап 1). Подобные датчики являются эффективным средством оперативного контроля режима работы скважины, они широко применяются и в настоящее время.



а) - отвод свободного газа из подпакерного пространства с помощью однопакерной системы
б) - отвод свободного газа из подпакерного пространства с помощью двухпакерной системы

Рисунок 3 – Схема одновременно-раздельной добычи
с разными вариантами отвода свободного газа из подпакерного пространства

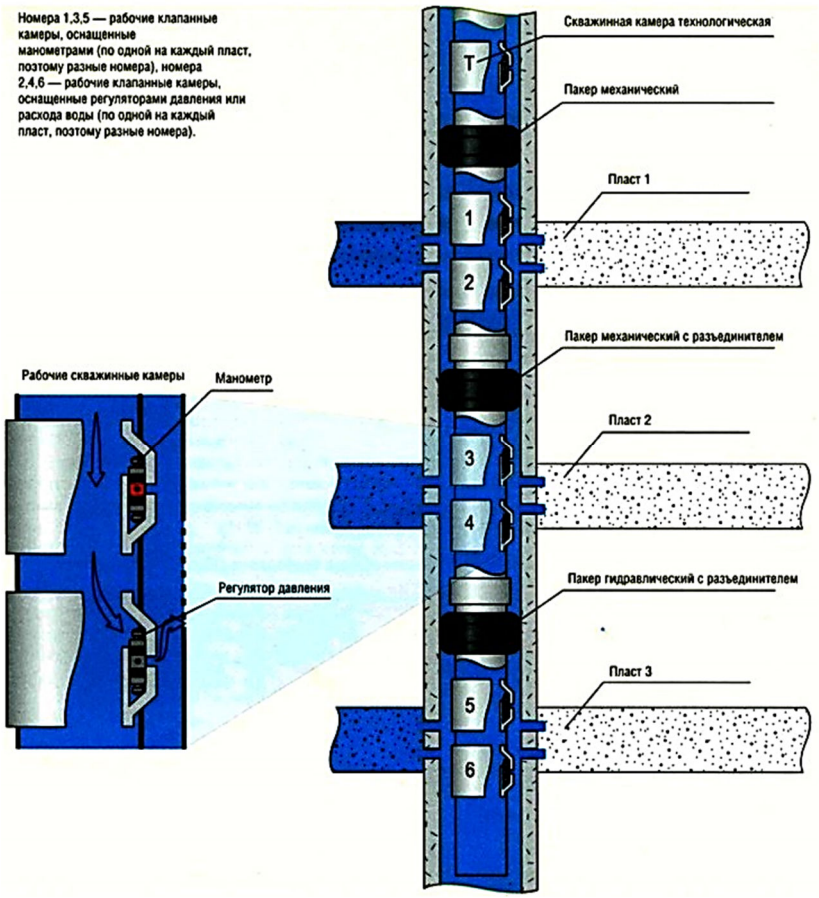


Рисунок 4 – Схема одновременно-раздельной закачки с помощью многопакерной компоновки

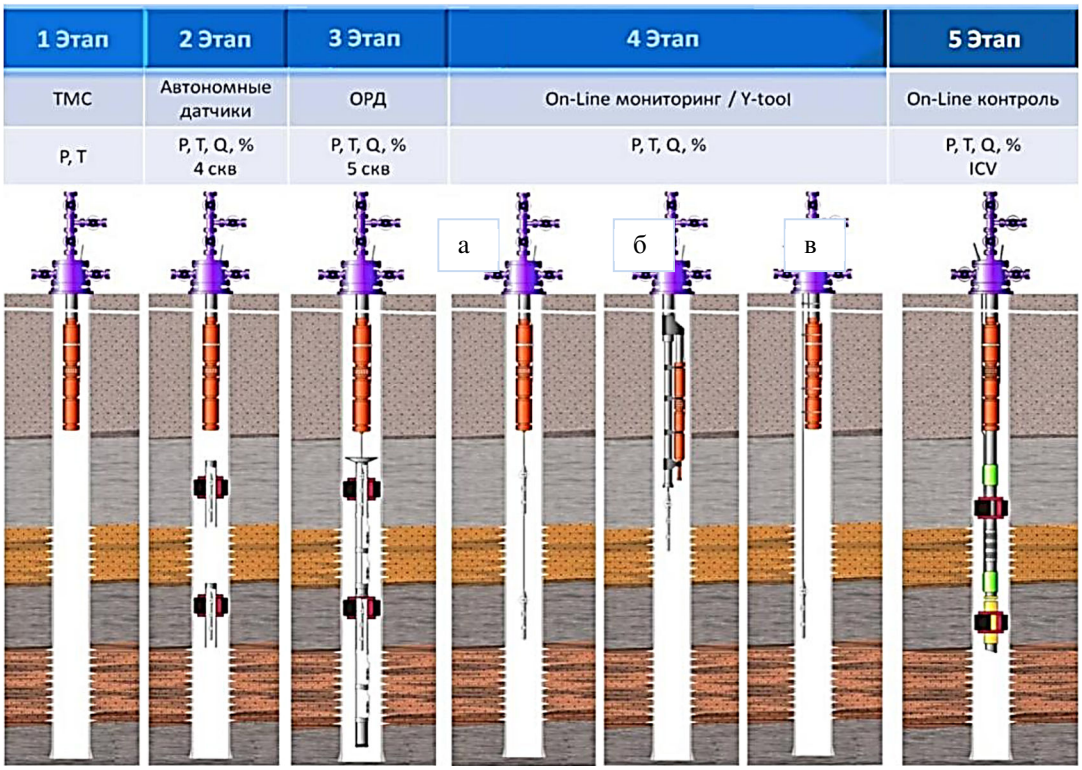


Рисунок 5 – Этапы развития систем совместной эксплуатации

Впоследствии наряду с ТМС начали применяться скважинные интеллектуальные измерительные системы (СИИС) на базе автономных измерительных комплексов, устанавливаемых под насосом (ЭЦН) в кровле каждого пласта (на якорях с помощью автоотцепов). Это позволило проводить измерение температуры, давления, расхода и влагосодержания в стволе, обеспечивая индивидуальный контроль каждого из совместно вскрытых пластов (рис. 5, этап 2). Однако подобные системы имеют существенный недостаток – они не обеспечивают дистанционную непрерывную регистрацию забойных параметров.

На третьем этапе началось внедрение систем одновременно-раздельной эксплуатации (ОРЭ) как в добывающих (ОРД), так и в нагнетательных скважинах (ОРЗ). В связи с этим появилась возможность не только выявлять индивидуальные особенности работы каждого пласта, но и управлять этим процессом. Внедрение данных систем позволило организовать эффективный контроль мониторинга эксплуатационных параметров пластов.

В частности, на данном этапе стали использоваться компоновки ОРД с датчиками, спущенными над кровлей интервалов перфораций и закреплёнными кабелем на ЭЦН наряду с системой пакеров и мандрелей.

Основой контроля совместной закачки (в скважинах, оборудованных ОРЗ) стали стандартные промыслово-геофизические исследования при перемещении прибора по НКТ и гидродинамические исследования. Причём размещение скважинного манометра в мандрели за НКТ с изоляцией заколонного пространства позволяет на время проведения исследований изолировать пласты друг от друга, обеспечивая высокое качество получаемых результатов. Описанные технологии и технические средства являются основой современной системы контроля работы эксплуатационных скважин на рассматриваемом месторождении.

Затем начались опытные работы четвёртого этапа, в рамках которого предусматривается дополнительное использование наряду с системами ОРЭ трёх видов систем мониторинга:

1) с размещением приборов на кабеле под ЭЦН без системы пакеров и мандрелей ОРД (рис. 5, этап 4, а);

2) с использованием системы Y-tool, позволяющей проводить промыслово-геофизические исследования в многопластовой скважине при работающем ЭЦН посредством спуска прибора в байпасную линию (рис. 5, этап 4, б);

3) на основе предварительного спуска приборов под ЭЦН через межтрубное пространство (рис. 5, этап 4, в).

Последняя из названных технологий предоставляет возможность производить геофизические работы в скважинах, оборудованных ЭЦН, зенитные углы в которых в интервале от устья до глубины подвески насоса достигают 36°. Основными особенностями технологии являются оборудование устья скважины эксцентричной планшайбой с установленным на ней дополнительным сальниковым вводом

для герметизации геофизического кабеля и смещения компоновки насоса и насосно-компрессорных труб к стенке обсадной колонны. Смещение производится при помощи установки на НКТ специальных децентраторов, обеспечивающих защиту геофизического кабеля от механических повреждений и свободное перемещение глубинного измерительного прибора от забоя до приёма насоса.

В будущем планируется совершенствование системы контроля работы пластов при ОРЭ (5 этап), которое включает в себя использование управляемых с поверхности клапанов для индивидуальной регулировки дебита определённого интервала.

Система мониторинга одновременно-раздельной эксплуатации пластов (3 этап)

Далее остановимся более подробно на внедряемой в настоящее время на рассматриваемом месторождении технологии одновременно-раздельной эксплуатации пластов (ОРЭ), которая основана на использовании в скважине специального оборудования с многопакерно-секционной компоновкой. Компоновка включает несколько изолированных секций (по числу совместно разрабатываемых пластов), отделённых друг от друга пакерами. Каждая секция оснащена оборудованием для регулировки расхода.

Предусмотрена возможность непрерывного контроля одновременно-раздельной добычи пластов параллельно с измерением в реальном времени технологических параметров работы ЭЦН с помощью дистанционных глубинных приборов и передачи результатов в online режиме по геофизическому кабелю или силовому кабелю ЭЦН.

Рассмотрим вопросы организации мониторинга добывающих и нагнетательных скважин с использованием технологии ОРЭ, а также наиболее представительные результаты мониторинга в скважинах рассматриваемого месторождения.

Организация и результаты мониторинга добывающих скважин (системы ОРД)

На рисунке 6 представлена схема компоновки ОРД для одной из скважин, дренирующей два пласта. Скважина оборудована электроцентробежным насосом УЭЦН-2ВННП5А-159-2100, установленным выше продуктивной толщи на НКТ 73 мм. В интервал нефтяных пластов спущен хвостовик НКТ 73 мм с мандрелями КТ1-73Б-210 на глубинах пласта и с нижней заглушкой. В межколонном пространстве за НКТ расположены: гидравлический пакер FHH-47 (в кровле пластов) и механический пакер осевой установки 2ПОМ-140-700 (между пластами). С помощью пакеров достигается разобщение межколонного пространства. Каждый из пластов работает через свою систему мандрелей. Соотношение дебитов между пластами регулируется подбором соотношения диаметров клапанов (гидравлических сопротивлений) мандрелей.

С целью непрерывного мониторинга работы пластов под приём насоса на геофизическом кабеле спущена компоновка из двух комплексных геофизических приборов САКМАР-4Д, включающая датчики расхода, давления, температуры и влажности, а также способная к непрерывной эксплуатации в течение не менее 730 сут. Один из приборов спущен в кровлю продуктивной толщи, другой – на глубину между продуктивными пластами.

При внедрении описанной компоновки выявлен ряд проблем, обусловленных геологическим строением коллекторов. При запуске первой скважины с компоновкой ОРД (№ 11311) по истечении 89 сут. скважина остановлена. Затем компоновка ОРД извлечена, и скважина переведена в нагнетательный фонд. Причиной остановки явилось то, что мандрели нижнего пласта забиты глиной. При распределении депрессии в процессе эксплуатации ОРД нижний пласт начал отрабатываться, однако все рабочие диаметры мандрели забились грязью из призабойной зоны и приток из пласта был самоизолирован.

За время работы скважины зафиксированы некоторые данные, поступающие с датчиков на забое. Несмотря на проблемы при проведении исследований (сильные флуктуации верхнего расходомера на начальном участке, отказ нижнего расходомера), удалось показать, что данная технология позволяет получить качественные данные о текущем режиме работы скважины и оценить его динамику.

В ходе последующих работ на основе накопленного опыта по подготовке скважин удалось провести удачные испытания оборудования ОРД. Ниже приведены результаты одного из успешных и представительных испытаний в скважине № 15560 рассматриваемого месторождения.

Данной работе предшествовали долговременные измерения давления стационарным датчиком на приёме насоса, сопровождаемые стандартным (ежесуточным) контролем дебита добываемой жидкости. Они продолжались в течение трёх лет с момента ввода скважины в эксплуатацию. По этим данным оценена фактическая продуктивность (начальная): 0.5 $м^3$/сут. × атм. и общие для пластовой системы фильтрационные свойства: средняя проводимость 30,8 мД·м, проницаемость 1,4 мД и интегральный скин-фактор – 5,6.

В процессе испытаний оборудования ОРД в скважине проводился непрерывный мониторинг эксплуатационных параметров (расхода, давления, температуры и содержания воды) описанным выше комплексом.

Приближённая оценка продуктивностей и пластовых давлений может быть выполнена путём сопоставления установившихся значений дебита и забойного давления при нескольких стабильных режимах работы скважин (метод индикаторной диаграммы). В рассматриваемом случае скважина исследована на двух режимах отбора – технологическом и при пониженной депрессии. Непосредственно перед снижением депрессии значения давления и расхода составляли 69,4 атм. и 62,4 $м^3$/сут. для

нижнего пласта и 55,7 атм. и 134,6 м^3/сут. для верхнего. После снижения депрессии скважина выходит на стабильный режим отбора, характеризуемый значениями расхода 27,3 м3/сут. и 116,8 м^3/сут., и давления в 87,9 атм. и 71,8 атм. для нижнего и верхнего пластов соответственно. По полученным данным возможна приближённая оценка энергетических характеристик верхнего и нижнего пластов: пластовые давления 173 и 102 атм., продуктивности 1,15 и 1,9 м^3/сут. · атм.

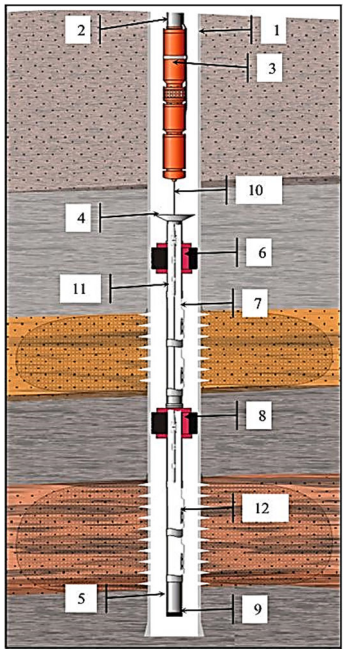


Рисунок 6 – Компоновка ОРД, применяемая в скважинах рассматриваемого месторождения:
1 – эксплуатационная колонна; 2 – НКТ; 3 – насос; 4 – воронка; 5 – хвостовик;
6 – пакер гидравлический; 7 – мандрели; 8 – пакер механический; 9 – заглушка;
10 – кабель; 11 – геофизические приборы; 12 – обратный клапан

Данные результаты подтверждают более высокую продуктивность и пластовое давление верхнего интервала. Продуктивности по пластам составляют 0,87 и 0,52 м^3/сут. · атм. Следует отметить, что суммарная продуктивность совместно эксплуатируемых пластов существенно больше общей, оценённой на начальном этапе исследований (по ГДИС). Основная причина несоответствия продуктивностей – влияние в последнем случае на результаты оценки дебита выделяющегося из нефти газа (вследствие снижения давления ниже давления насыщения).

К сожалению, конструктивные особенности используемой компоновки ОРД таковы, что исследуемые пласты всегда гидродинамически связаны между собой. Это не позволяет выполнить раздельную оценку фильтрационных свойств и характеристик совершенства вскрытия пластов с помощью нестационарных гидродинамических методов.

Фильтрационные свойства могут быть оценены лишь приближённо. В частности, если предположить, что скин-факторы в пластах близки, то на основе полученных коэффициентов продуктивности и определённой по ГДИС интегральной проводимости (30,8 мД·м) можно оценить гидропроводности каждого из пластов. В первом приближении, не учитывая влияние обводнённости пластов, на основе этих данных можно рассчитать также проводимости. При названных условиях проводимость распределится по пластам пропорционально их продуктивностям и составит 11,5 и 8,4 мД·м. С учётом эффективных работающих мощностей пластов (6,4 и 5,6 м) проницаемости пластов составят 1,8 и 0,5 мД.

Организация и результаты мониторинга нагнетательных скважин (системы ОРЗ)

Технология одновременно-раздельной закачки включает использование многопакерных компоновок для дифференциальной закачки в геологически разнородные эксплуатационные объекты. Реализация технологии подразумевает посекционную установку в нагнетательных скважинах специального оборудования. Каждая секция устанавливается напротив продуктивного пласта (рис. 7) и включает пакер, две мандрели с эксцентричным расположением кармана для установки клапанов, клапаны, телескопический элемент и разъединитель колонны. Каждый последующий вышерасположенный пакер изолирует очередной пласт от вышележащих продуктивных интервалов. Пакер, устанавливаемый над интервалом перфорации верхнего продуктивного пласта, защищает эксплуатационную колонну от повышенного давления и прямого контакта с закачиваемой по НКТ водой. Отдельные секции соединяются друг с другом не жёстко через телескопический элемент и разъединитель колонн, что исключает избыточные продольные напряжения в колонне и позволяет разъединять секции для их поэтапного извлечения или промывки.

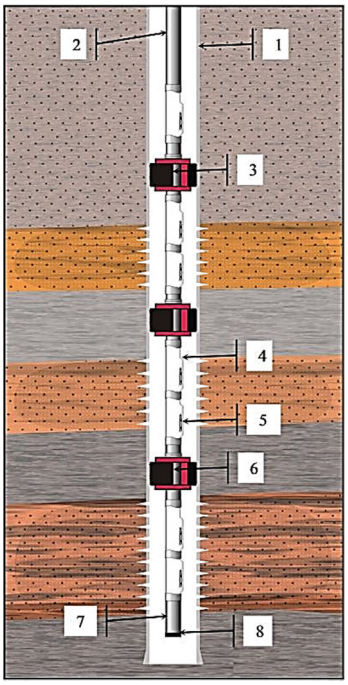


Рисунок 7 – Компоновка ОРЗ:
1 – эксплуатационная колонна; 2 – НКТ; 3 – пакер механический; 4 – мандрель;
5 – клапан со штуцером; 6 – пакер механический; 7 – хвостовик; 8 – заглушка

Скважинные мандрели предназначены для установки клапанов различного вида. Эксцентричная конструкция мандрелей обеспечивает беспрепятственный проход канатного инструмента и позволяет проводить соответствующие работы ниже по стволу скважины. Внутри каждого мандрельного клапана устанавливаются штуцеры различных диаметров, которые являются основным элементом регулирования расхода закачиваемой воды. После установки в скважину, при необходимости замены клапана (штуцера) для изменения расхода, работы по его извлечению и повторной установке выполняются с использованием канатного оборудования. Для обеспечения полной изоляции пласта вместо регулирующего клапана напротив него в скважинную камеру может быть установлена так называемая «глухая пробка». Эта технология также позволяет проводить качественные промыслово-геофизические и гидродинамические исследования каждого пласта по отдельности, в этом случае в скважинную мандрель устанавливаются манометры вместо стандартных клапанов.

В настоящее время 100 % многопластовых нагнетательных скважин рассматриваемого месторождения оборудованы системами ОРЗ. Сегодня ведутся работы по усовершенствованию технологии, а также испытания интеллектуальных систем для on-line мониторинга работы нагнетательных многопластовых скважин. Количество и характер компоновок представлены на рисунке 8.

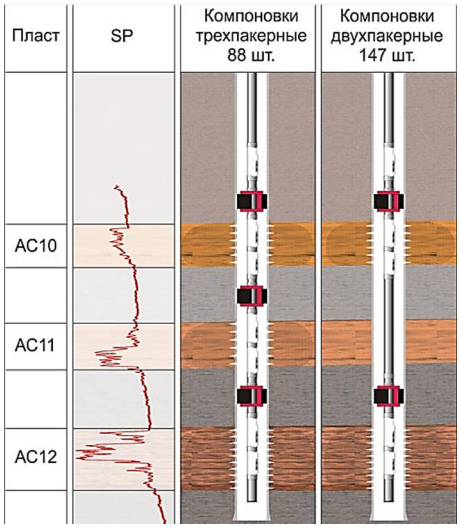


Рисунок 8 – Количество трёх- и двухпластовых компоновок
на рассматриваемом месторождении

Закачка воды ведётся в каждый пласт отдельно согласно технологическим режимам. При необходимости режимы закачки могут изменяться путём перераспределения воды по пластам, осуществляемого в результате смены забойных штуцеров.

Компоновка ОРЗ обеспечивает беспрепятственный спуск приборов для проведения промыслово-геофизических исследований и определения приёмистости скважины поинтервально с целью регулирования распределения закачки воды между пластами. Для этого используется расходомер «Сакмар 5», включающий датчики давления и температуры. В результате определяются приёмистости интервалов, в том числе при нескольких стабильных режимах закачки, для построения индикаторных диаграмм, либо регистрации кривых падения и стабилизации давления по каждому пласту раздельно.

Таким образом, применение многопакерной компоновки ОРЗ обеспечивает независимое регулирование расхода воды и позволяет проводить исследования нагнетательных скважин по каждому пласту.

Применяемая система ОРЗ имеет существенные недостатки. На данный момент смена штуцеров для контроля расхода в отдельные интервалы производится с привлечением канатной техники. Подбор нужного диаметра штуцера производится по результатам расходометрии. Для того чтобы осуществить подбор нужно спустить на забой глубинное оборудование и замерить дебиты пластов. После этого (при необходимости смены штуцеров вследствие не оптимального соотношения расхода) оборудование снова должно быть извлечено. То есть для оптимизации закачки требуется не менее двух циклов спускоподъёмных операций, что, конечно же, ведёт к возрастанию операционных затрат. Таким образом, следующим этапом развития системы ОРЗ является внедрение компоновки, позволяющей прогнозировать диаметр штуцера аналитически.

Для решения описанной задачи произведены опытные вычисления, основные результаты которых представлены ниже.

Для прогноза диаметра штуцера использовался аналитический поход к описанию однофазного потока через штуцер, на основе которого получено следующее расчётное соотношение для расчёта диаметра штуцера:

$$D_{шт} = \sqrt{\frac{Q}{C \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (P_1 - P_2) \cdot g}{\rho}}}},$$

где $D_{шт}$ – диаметр штуцера, необходимый для создания заданного перепада давления; Q – расход воды; P_1 и P_2 – давление в потоке до и после прохождения штуцера; g – ускорение свободного падения; μ – динамическая вязкость воды; ρ – плотность воды; C – константа, зависящая от используемой системы единиц.

Для проверки достоверности аналитических расчётов использовался узловой анализ, показавший удовлетворительное схождение расчётных и фактических приёмистостей. Этого достаточно для оценки адекватности методики подбора штуцера, но в то же время требуется дальнейшее совершенствование методики для уменьшения влияния неопределённостей.

Наибольшую неопределённость в аналитические расчёты вносит давление после прохождения штуцера (P_2), т.к. эта величина также рассчитана аналитически. Из анализа чувствительности (рис. 9) следует, что на расчётный диаметр штуцера значительное влияние оказывают следующие параметры: проницаемость, вязкость нагнетаемого флюида, пластовое давление и скин-фактор.

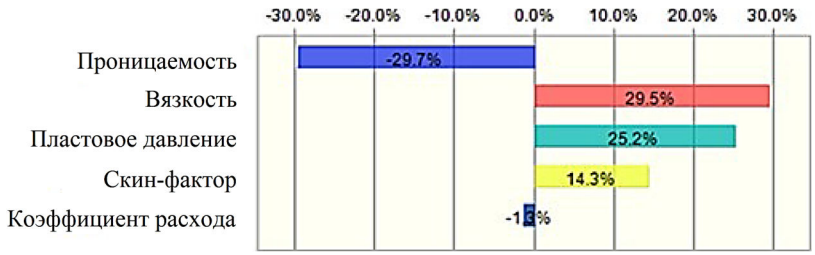


Рисунок 9 – Анализ чувствительности диаметра штуцера от вышеуказанных параметров при аналитических расчётах

Наиболее эффективным решением для исключения выше указанных неопределённостей является испытание системы ОРЗ с датчиками давления и температуры, установленными в затрубном пространстве напротив каждого пласта. Это позволит исключить основную неопределённость в наших расчётах – отсутствие данных о величине P_2.

Имея фактические данные, полученные с помощью таких датчиков в реальном времени, в последующем можно будет принять обоснованное решение по дальнейшему совершенствованию системы расчётов и осуществить непрерывный мониторинг приёмистости каждого пласта на основе расхода нагнетаемой воды, рассчитанного из перепада давления через штуцер.

Текущая эффективность и дальнейшее развитие систем ОРЭ

На данном этапе опытно-промышленных работ испытано 5 компоновок ОРД и 235 компоновок ОРЗ (147 двухпакерных и 88 трёхпакерных). Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что подземное оборудование для одновременно-раздельной эксплуатации обеспечивает не только эффективное управление, но и индивидуальный контроль работы совместно вскрытых пластов. Основой контроля является долговременный мониторинг расхода, давления, температуры и параметров состава в стволе скважины в кровле каждого из пластов. Для мониторинга используются технологии как промыслово-геофизических, так и гидродинамических исследований скважин.

Наиболее успешно компоновки ОРЭ решают свои задачи в нагнетательных скважинах. Этому способствует высокая надёжность подземного оборудования для одновременно-раздельной закачки, возможность использования полного арсенала технологий ГДИС и ПГИ, в том числе нестационарных технологий термических исследований и индивидуальное исследование каждого пласта методами ГДИС.

Эффективность ОРЗ должна резко повыситься с испытанием и внедрением компоновки с возможностью online мониторинга расхода нагнетаемой воды. Для повышения эффективности исследований необходима также разработка способов управления системой забойных штуцеров без подъёма поземной компоновки на поверхность, а также повышение надёжности работы глубинного оборудования.

Проблема повышения надёжности оборудования является также первоочередной для компоновок ОРД в добывающей скважине. Среди других задач, требующих серьёзного внимания конструкторов и исследований, следует назвать:

- повышение надёжности и информативности глубинных датчиков;
- внедрение более совершенных систем мониторинга геофизических и гидродинамических параметров (технологии долговременных измерений изменения параметров во времени на заданной глубине);
- разработка и внедрение оборудования и технологий, обеспечивающих регистрацию в скважине непрерывных кривых изменения геофизических параметров по глубине (в том числе с использованием байпасной системы Y-tool или путём спуска приборов под ЭЦН через межтрубное пространство);
- обеспечение проведения ГДИС совместно вскрытых пластов без гидродинамической связи между ними.

Одним из основных факторов снижения информативности мониторинга ОРД является нестабильность датчиков расхода при повышении газосодержания продукции скважины (при снижении давления ниже давления насыщения). В ближайшем будущем необходимы специализированные опытно-методические работы с целью детального изучения связи показаний расходомера с истинными и расходными содержаниями компонент многофазного потока.

Ещё одним важным этапом опытно-промышленных работ является расширение арсенала технических средств для контроля и мониторинга параметров режима работы добывающих скважин. Так, в настоящее время проходит испытание облегчённая компоновка подземного оборудования с размещением приборов на кабеле под ЭЦН без системы пакеров и мандрелей ОРД. Её предполагается использовать в ситуациях, когда отсутствует необходимость индивидуального вмешательства в работу каждого из совместно вскрытых пластов.

Описанные технологии являются существенным шагом на пути реализации проекта по интеллектуализации месторождения при совместном вскрытии скважинами нескольких эксплуатационных объектов. В результате должен быть создан единый комплекс дистанционного контроля и мониторинга параметров разработки в реальном времени. Данный комплекс должен стать основой для оптимизации разработки, снижения затрат на добычу нефти и увеличения коэффициента нефтеотдачи.

Направления дальнейшего развития ОРД и ОРЗ

Среди ближайших задач опытно-промышленных работ можно выделить, во-первых, апробацию методов поинтервальной оценки текущего пластового давления (циклические исследования на нескольких режимах работы скважины). Во-вторых, специальные работы по оценке информативности расходометрии при наличии газа в продукции скважины. В-третьих, апробацию альтернативных методов определения расхода, например, по потерям давления в мандрели. Среди задач на перспективу следует отметить повышение надёжности системы контроля промысловых параметров на основе ОРД (ОРЗ), а также внедрение новых датчиков для поинтервальной оценки текущего пластового давления совместно эксплуатируемых пластов (циклические исследования на нескольких режимах работы скважины).

Переход от третьего к четвёртому этапу развития систем ОРД (рис. 5) предполагал пробную эксплуатацию трёх видов систем: приборов на кабеле под ЭЦН без компоновки ОРД; байпасной системы Y-tool, а также спуск прибора вместе с насосом с возможностью движения или без. Примене-

ние системы Y-tool позволило проводить промыслово-геофизические испытания «приток – состав» при нормальном режиме работы скважины без подъёма ЭЦН. Немаловажно, что использование этой системы исключает необходимость применения компрессорных, бустерных, азотных установок для вызова притока из пласта. После реализации четвёртого этапа произошёл переход к внедрению компоновок с управляемыми on-line клапанами.

Одновременно-раздельная эксплуатация позволяет раздельно определять фильтрационно-емкостные свойства, скин-фактор и энергетические характеристики каждого из пластов, что в свою очередь позволяет раздельно управлять расходами, регулировать воздействие на каждый интервал. Также ОРЗ позволяет выполнять индивидуальные гидродинамические исследования каждого пласта путём закрытия его на забое. На данный момент весь фонд многопластовых нагнетательных скважин оборудован компоновками ОРЗ с применением как двух-, так и трёхпакерных систем. Начались работы по внедрению компоновки с online мониторингом давления и температуры в затрубном пространстве напротив каждого пласта. Это позволит рассчитывать расход аналитическим путём по перепаду давления в клапане, а также снизить количество канатных работ при промыслово-геофизических исследованиях. Переход к такой системе ОРЗ также даст возможность контролировать работу системы «скважина – пласт» в режиме реального времени и проводить мониторинг расхода жидкости по каждому пласту без проведения геофизических исследований. Совершенствование систем ОРД и ОРЗ позволит создать единую систему мониторинга на базе комплексного использования различных технических и методических решений. В частности, планируется создание системы контроля промысловых параметров на основе ОРД (ОРЗ), системы долговременных измерений технологических параметров режима работы скважин датчиками на приёме насоса, сети наблюдательных скважин, гидродинамических и промыслово-геофизических исследований.

Список литературы:

1. Барышников А.В. Результативность долговременного мониторинга совместной разработки пластов системами одновременно-раздельной добычи на Приобском месторождении / А.В. Барышников, В.В. Сидоренко, М.И. Кременецкий // Нефтяное хозяйство. – 2010. – № 6. – С. 30–33.

2. Боровик О.В. Анализ эффективности работы УЭЦН на месторождениях Краснодарского края / О.В. Боровик, О.В. Савенок // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2017. – № 2. – С. 34–61.

3. Боровик О.В. Анализ применения системы байпасирования Y-tool для исследований под действующей УЭЦН на месторождениях Краснодарского края / О.В. Боровик, О.В. Савенок // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2017. – № 2. – С. 62–81.

4. Дроздов А.Н. Одновременно-раздельная эксплуатация и повышение нефтеотдачи нескольких продуктивных пластов одним погружным насосным агрегатом / А.Н. Дроздов, А.В. Трулев // Инженерная практика. – 2013. – № 6-7. – С. 102–104.

5. Ибрагимов Н.Г. Интерпретация длительных записей давления для скважин, оборудованных установками для одновременно-раздельной эксплуатации / Н.Г. Ибрагимов, В.А. Иктисанов // Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 7. – С. 50–53.

6. Иванова Т.Н. Технология одновременно-раздельной эксплуатации объектов как альтернативный рентабельный вариант добычи нефти / Т.Н. Иванова // Приоритеты стратегии научно-технологического развития России и обеспечение воспроизводства инновационного потенциала высшей школы: материалы Всероссийской научной конференции (27 февраля 2019 года, г. Ижевск). – Ижевск : Издательский дом «Удмуртский университет», 2019. – С. 61–65.

7. Иванова Т.Н. Анализ применения технологии одновременно-раздельной эксплуатации на многопластовых месторождениях Удмуртии / Т.Н. Иванова, Д.Н. Новокшонов // Булатовские чтения. – 2020. – Т. 2. – С. 225–227.

8. Эффективность применения геолого-технических мероприятий при разработке месторождений / М.В. Муравлева [и др.] // Research. Engineering. Extreme. 2021: материалы Международной научно-практической конференции (03 июня 2021 года, г. Краснодар). – Краснодар : ООО «Издательский Дом – Юг», 2021. – С. 175–181.

9. Никишов В.И. Одновременно-раздельная эксплуатация многопластовых скважин. Создание «интеллектуальной» скважины / В.И. Никишов, П.И. Сливка, Р.Р. Габдулов // Интервал. Передовые нефтегазовые технологии. – 2008. – № 6(125). – С. 50–55.

10. Устройство для увеличения межремонтного периода работы штангового насоса / О.В. Савенок [и др.] // Нефтепромысловое дело. – 2023. – № 7(655). – С. 64–66.

11. Шаблий И.И. Анализ работы штанговых скважинных насосных установок на примере нефтяного месторождения Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции / И.И. Шаблий // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2023. – № 4. – С. 251–264.

12. Шиян С.И. Устройство поддержания расчётного перепада давления в межтрубном пространстве путем перепуска затрубного газа в выкидной трубопровод / С.И. Шиян, И.И. Шаблий // Нефтепромысловое дело. – 2023. – № 3(651). – С. 56–58.

13. Шиян С.И., Шаблий И.И. Гидроударное устройство для очистки призабойной зоны скважины // Нефтепромысловое дело. – 2023. – № 5(653). – С. 69–71.

14. Шиян С.И., Шаблий И.И. Повышение надёжности работы всасывающего клапана штангового насоса // Нефтепромысловое дело. – 2023. – № 8(656). – С. 41–44.

15. Повышение эффективности эксплуатации нефтяных скважин путём разработки комплекса технических устройств / С.И. Шиян [и др.] // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2023. – № 10(370). – С. 59–68.

List of references:

1. Baryshnikov A.V. Long-term bottom-hole production monitoring efficiency in case of commingled production by down-hole equipment on Priobskoye oilfield / A.V. Baryshnikov, V.V. Sidorenko, M.I. Kremenetskiy // Oil industry. – 2010. – № 6. – P. 30–33.

2. Borovik O.V. Efficiency analysis of operation by installation of an electric centrifugal pump on the fields of the Krasnodar territory / O.V. Borovik, O.V. Savenok // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2017. – № 2. – P. 34–61.

3. Borovik O.V. Analysis of application of the Y-tool bypass system for investigation under the current installation of an electric centrifugal pump on the fields of the Krasnodar territory / O.V. Borovik, O.V. Savenok // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2017. – № 2. – P. 62–81.

4. Drozdov A.N. Simultaneous separate operation and increased oil recovery of several productive formations with one submersible pumping unit / A.N. Drozdov, A.V. Trulev // Engineering practice. – 2013. – № 6–7. – P. 102–104.

5. Ibragimov N.G. Interpretation of long-term pressure records for wells equipped with installations for simultaneous-separate operation / N.G. Ibragimov, V.A. Iktisanov // Oil industry. – 2009. – № 7. – P. 50–53.

6. Ivanova T.N. Technology of simultaneous-separate operation of objects as an alternative cost-effective option for oil production / T.N. Ivanova // Priorities of the strategy of scientific and technological development of Russia and ensuring the reproduction of the innovative potential of higher education: materials of the All-Russian scientific conference (27 February 2019, Izhevsk). – Izhevsk : Udmurt University Publishing House, 2019. – P. 61–65.

7. Ivanova T.N. Analysis of the use of technology simultaneously-separate operation of multilayer deposits on the Udmurt Republic / T.N. Ivanova, D.N. Novokshonov // Bulatov readings. – 2020. – Vol. 2. – P. 225–227.

8. Efficiency of the application of geological and technical measures in the development of deposits / M.V. Muravleva [et al.] // Research. Engineering. Extreme. 2021: materials of the International scientific and practical conference (03 June 2021, Krasnodar). – Krasnodar : «Publishing House – South» LLC, 2021. – P. 175–181.

9. Nikishov V.I. Simultaneous and separate operation of multilayer wells. Creation of an «intelligent» well / V.I. Nikishov, P.I. Slivka, P.P. Gabdulov // Interval. Advanced oil and gas technologies. – 2008. – № 6 (125). – P. 50–55.

10. A device for increasing the repair period of a sucker-rod pumping unit / O.V. Savenok [et al.] // Oilfield business. – 2023. – № 7(655). – P. 64–66.

11. Shabliy I.I. Analysis of the operation of sucker rod pumping units using the example of an oil field in the West Siberian oil and gas province / I.I. Shabliy // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2023. – № 4. – P. 251–264.

12. Shiyan S.I. A device for maintenaning the designed pressure drop in a well annulus by bypassing the annulus gas into the gas flow pipeline / S.I. Shiyan, I.I. Shabliy // Oilfield business. – 2023. – № 3(651). – P. 56–58.

13. Shiyan S.I. Hydraulic impact device for cleaning the well bottom zone / S.I. Shiyan, I.I. Shabliy // Oilfield business. – 2023. – № 5(653). – P. 69–71.

14. Shiyan S.I. Increasing the reliability of the suction valve of the sucker-rod pumping unit / S.I. Shiyan, I.I. Shabliy // Oilfield business. – 2023. – № 8(656). – P. 41–44.

15. Increase of oil wells operation efficiency by developing a complex of technical devices / S.I. Shiyan [et al.] // Construction of oil and gas wells on land and sea. – 2023. – № 10(370). P. 59–68.