

УДК 549.6:552.512/551.733(234.851)

Возможности промыслово-геофизического метода для открытия новых залежей, прироста запасов и обоснования эксплуатационного бурения

А.Д. Крючатов

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614068, Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: andreykryuchatov@gmail.com

(Статья поступила в редакцию 20 сентября 2023 г.)

Изучена возможность применения дивергентного наноэлектрического каротажа (НЭК) для обнаружения и оценки пропущенных и неразработанных нефтенасыщенных пластов. Приведены примеры успешного решения данной задачи, в том числе и для открытия новых залежей, прироста запасов и обоснования эксплуатационного бурения.

Ключевые слова: *дивергентный наноэлектрический каротаж*.

DOI: 10.17072/psu.geol.23.1.76

Введение

Значительная часть крупных нефтяных месторождений Западной Сибири вступила в позднюю стадию разработки, новые же месторождения характеризуются наличием залежей с трудноизвлекаемыми запасами.

Перед недропользователями стоит ответственная задача – максимальное повышение коэффициента нефтеизвлечения, вовлечение в разработку невыработанных запасов.

При уплотнении сетки скважин, разукрупнении эксплуатационных объектов весьма актуально исследование имеющегося фонда скважин на действующих месторождениях для выявления оставшихся невыработанных нефтенасыщенных интервалов. Оценка этих запасов, создание постоянно действующих геолого-технологических моделей позволяют вести оптимальную разработку невыработанных оставшихся запасов нефти. Решение проблемы невозможно без привлечения новых методов и технологий скважинных геофизических исследований. Разработанные и усовершенствованные в течение последних лет методики и технологии позволяют получить информацию о текущем насыщении коллекторов на количественном уровне.

Для решения задач контроля за состоянием выработки, определения текущей нефтенасыщенности, определения интервалов

заводнения и контроля за текущим положением ВНК всё большую перспективу и актуальность приобретает метод дивергентного электрического каротажа обсаженных скважин. В настоящее время на месторождениях Западной Сибири для исследования действующих нефтяных скважин применяется технология дивергентного наноэлектрического каротажа (НЭК).

Физические основы, принцип действия и область применения метода НЭК

Основным геофизическим методом определения насыщенности является электрический каротаж, различающий нефтеносные и водоносные пласты по их электрическому сопротивлению. С целью определения текущей нефтенасыщенности в скважинах, обсаженных стальными трубами на действующих месторождениях, российскими учеными разработаны и запатентованы аппаратно-программный комплекс наноэлектрических исследований обсаженных металлической колонной скважин метод-НЭК (Кашик, 2004; Степанов, 2013; Кривонос и др., 2002; Кривонос и др., 2008; Крючатов и др., 2008; Хусид и др., 2014).

Аппаратурно-программный комплекс позволяет измерять удельное электрическое

сопротивление горных пород через металлическую обсадную колонну труб. В процессе проведения исследования прибор НЭК создает в обсадной колонне ток, распространяющийся вверх и вниз по колонне, возвращаясь к поверхностному электроду. Основная составляющая тока протекает по колонне, в то время как небольшая часть отходит в породу – именно эту компоненту измеряет прибор.

Для обеспечения измерений в скважине прибором НЭК совместно с каротажной системой на металлическую колонну подают ток от дополнительного программно-управляемого источника питания необходимой мощности (Паспорт, 2009).

Измерения выполняются путем регистрации соответствующих сигналов от двух токов, поочередно подаваемых на колонну выше и ниже измерительных электродов. Регистрируют первую разность потенциалов электрического поля на участке колонны между контактами с ней двух крайних измерительных электродов и вторую разность потенциалов электрического поля на участке колонны между контактами с ней всех трех измерительных электродов зонда при подаче токов в верхний и нижний токовые электроды зонда соответственно. Таким образом, измерения на каждой точке при стоянке прибора проводятся дважды. Импульсы тока подаются поочередно на верхний и нижний электроды с периодом 20 с. Проводятся цифровая фильтрация, обработка измеренных сигналов и вычисления значения удельного сопротивления горных пород.

Определение качества измерений

Для оперативной оценки качества выполненного измерения разработаны специальные программные средства. По характеру сигнала можно косвенно определить качество прижима электродов. При хорошем контакте всех электродов форма сигнала должна быть стабильна по амплитуде и с ровными краями. Размах второго сигнала должен быть в два раза меньше первого. Отклонение величин, полученных при измерении, свидетельствует о плохом контакте измерительных электродов в точке. В этом случае следует повторить прижим и измерения. Если после трех

попыток не удастся получить качественный сигнал, прибор перемещают в другую точку.

Методика интерпретации

Для сравнения удельных сопротивлений рассматриваются результаты, полученные по измерениям НЭК, и данные исследований открытого ствола, полученные методами индукционного (ИК), бокового (БК) каротажей, а также результаты обработки комплексных палеток ИК-БК-БКЗ (боковое каротажное зондирование). В процессе бурения повышающее проникновение бурового раствора оказывает влияние на показания БК, поэтому значения удельного электрического сопротивления в коллекторах завышены. Для показаний ИК повышающее проникновение более благоприятно, однако ИК имеет меньшую вертикальную разрешающую способность. БКЗ в свою очередь имеет набор разноглубинных зондов, однако имеет место влияние вмещающих пород и скважины. Исходя из этих соображений, рекомендуется сравнивать данные НЭК с удельным сопротивлением, полученным как по фокусированным методам, так и по результатам обработки комплексных палеток (Руководство, 2009).

Преимущества и недостатки применения технологии НЭК

Аппаратурно-программный комплекс нанозлектрических исследований позволяет измерять электрическое сопротивление горных пород через металлическую обсадную колонну. Метод применяется в вертикальных и наклонных скважинах, обсаженных пяти- и шестидюймовыми стальными колоннами, заполненными любым токопроводящим типом раствора или сухих. Влияние обсадной колонны и промывочной жидкости на показания метода отсутствует. Необходимым требованием для проведения каротажа, при котором он дает наилучший эффект, является высокая проводимость ствола скважины.

Метод применяется для решения следующих задач.

При исследовании старых скважин: обнаружение и оценка пропущенных и неразработанных пластов, проведение повторной

оценки продуктивности после многолетней эксплуатации.

При исследовании новых скважин: измерения в скважинах высокой аварийной опасности, в которой нельзя проводить исследования в открытом стволе из-за осложнённых скважинных условий.

При контроле за выработкой пласта: оценка изменений в зоне водонефтяного контакта, оценка изменений текущего коэффициента насыщения.

Недостатками метода являются длительность наблюдений, влияние высокоомных пропластков и неполное устранение помех. Для получения достоверных результатов данных рекомендуется перед спуском прибора произвести силами заказчика очистку

скважины, промывку технической водой и шаблонирование (Методические, 2006).

Рассмотрим на примере одного из месторождений Западной Сибири решение задачи контроля за состоянием выработки, определения текущей нефтенасыщенности и приведем пример успешного решения данной задачи, в том числе и для открытия новых залежей.

Месторождение имеет сложное геологическое строение, характеризуется низкими фильтрационно-емкостными свойствами, невыдержанными по площади и разрезу, что крайне негативно влияет на выработку запасов (рис. 1).

В административном отношении месторождение расположено на территории Сургутского района Ханты-Мансийского автономного округа – Югры.

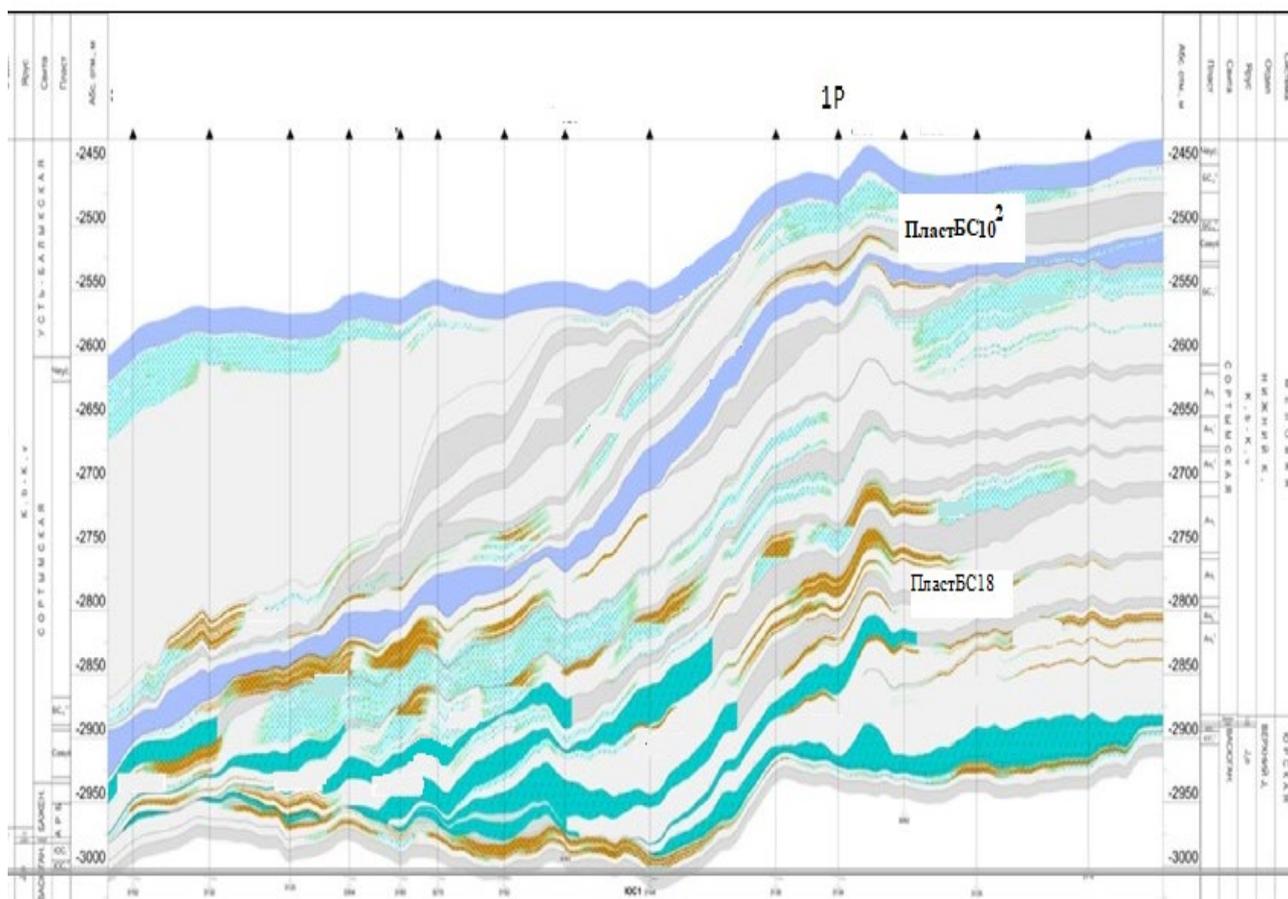


Рис. 1. Геологический разрез через месторождение

Результаты исследований по контролю за текущим состоянием нефтенасыщенности пластов

Для решения задачи контроля за состоянием выработки, определения текущей нефтенасыщенности, определения интервалов заводнения и контроля за текущим положением ВНК проведены скважинные геофизические исследования с применением технологии электрического каротажа обсаженной скважины НЭК.

Результаты интерпретации по разведочной скв. 1Р, пласт БС₁₀²

Скв. 1Р, категория – разведочная, построена в 1988 г. Для решения задачи контроля

текущей нефтенасыщенности коллекторов была использована технология нанозлектрического каротажа обсаженной скважины (НЭК).

Исследование методом электрического каротажа обсаженной скважины (НЭК) проведено в 2012 г. в интервале 2634–2640 м. Для сравнения удельных электрических сопротивлений рассматривались результаты измерений НЭК и исторические данные исследований открытого ствола методами индукционного (ИК), бокового (БК) каротажей и результатов обработки комплексных палеток ИК-БК-БКЗ (боковое каротажное зондирование) (рис. 2).

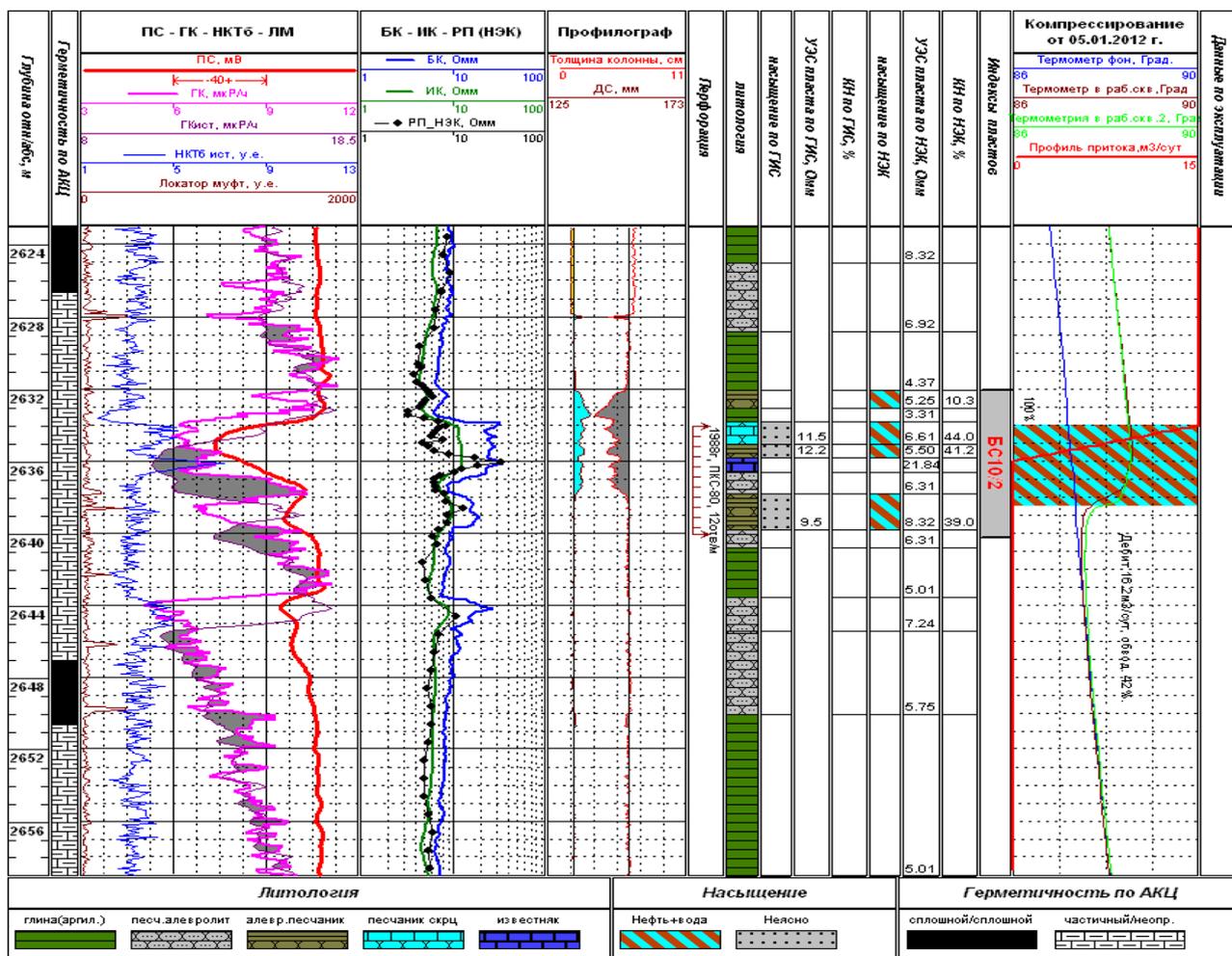


Рис. 2. Сопоставление результатов измерений дивергентного нанозлектрического каротажа (НЭК) с данными ГИС в открытом стволе и ПГИ скважина 1Р, пласт БС₁₀²

Выводы по интерпретации данных ГИС следующие: по данным метода НЭК от 2012 г. характер текущего насыщения пласта БС10² оценивается как нефть с водой; при компрессировании дебит жидкости составил 16.2 м³/сут, обводненность – 42 %, дебит нефти – 8.1 т/сут; выделены работающие интервалы: по термометрии (ТМ) –2636–2638.4 м; по профилю притока 2634–2636 м; Характер притекающего флюида – «нефть с водой»; достоверность показаний метода НЭК подтверждается.

По результатам испытания скв. 1Р и в последующем по данным бурения 2014–2015 г. новых скважин в пласте БС10² открыта новая залежь в районе скв. 1Р. Выкопировка подсчетного плана приведена на рис. 3.

Промышленная продуктивность залежи была доказана опробованием скв. 1Р (Q_н = 9,4 м³/сут, Q_в = 6,8 м³/сут) и эксплуатацией скв. 2 (Q_н = 16,7 м³/сут, Q_в = 0,8 м³/сут). Прирост запасов составил 2400/740 тыс. т.

Впервые запасы нефти месторождения были оперативно подсчитаны в 1988 г., после чего запасы нефти и растворенного газа неоднократно корректировались в оперативном порядке. В промышленном подсчете запасов 2017 г. на основе проведенных работ по доизучению месторождения сделана более детальная геологическая модель по сравнению с ранее представленной.

На рис. 3 представлен подсчетный план и карта эффективных нефтенасыщенных толщин пласта БС10², выполненные в рамках промышленного подсчета запасов в 2017 г.

Подсчетный план и карта эффективных нефтенасыщенных толщин

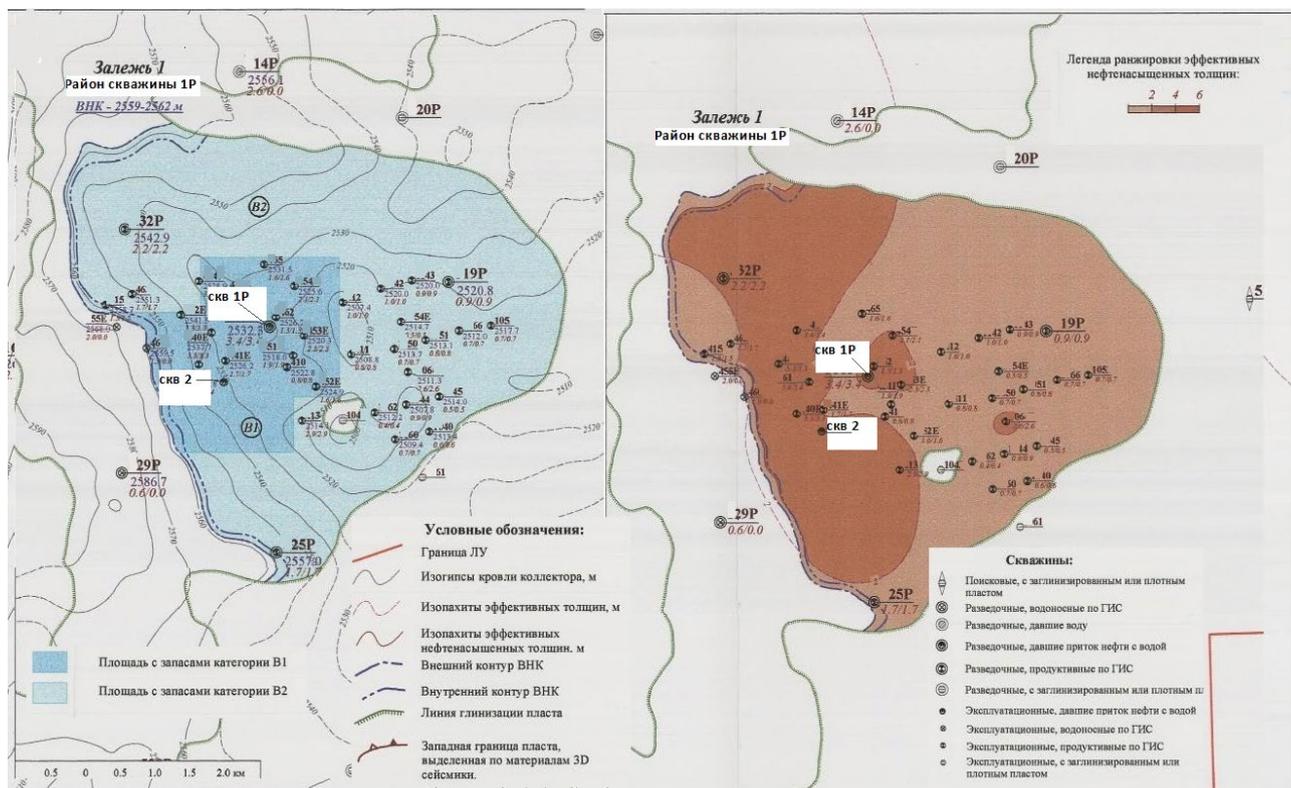


Рис. 3. Подсчетный план и карта нефтенасыщенных толщин пласта БС10²

На залежи (район 1Р) ведется разработка с 2015 г. системой горизонтальных и наклонно-направленных скважин.

Объект БС10² характеризуется небольшой нефтенасыщенной мощностью с

подстилаемой подошвенной водой, в силу чего рекомендуется применение адаптивных технологий ГРП, направленных на ограничение высоты трещины.

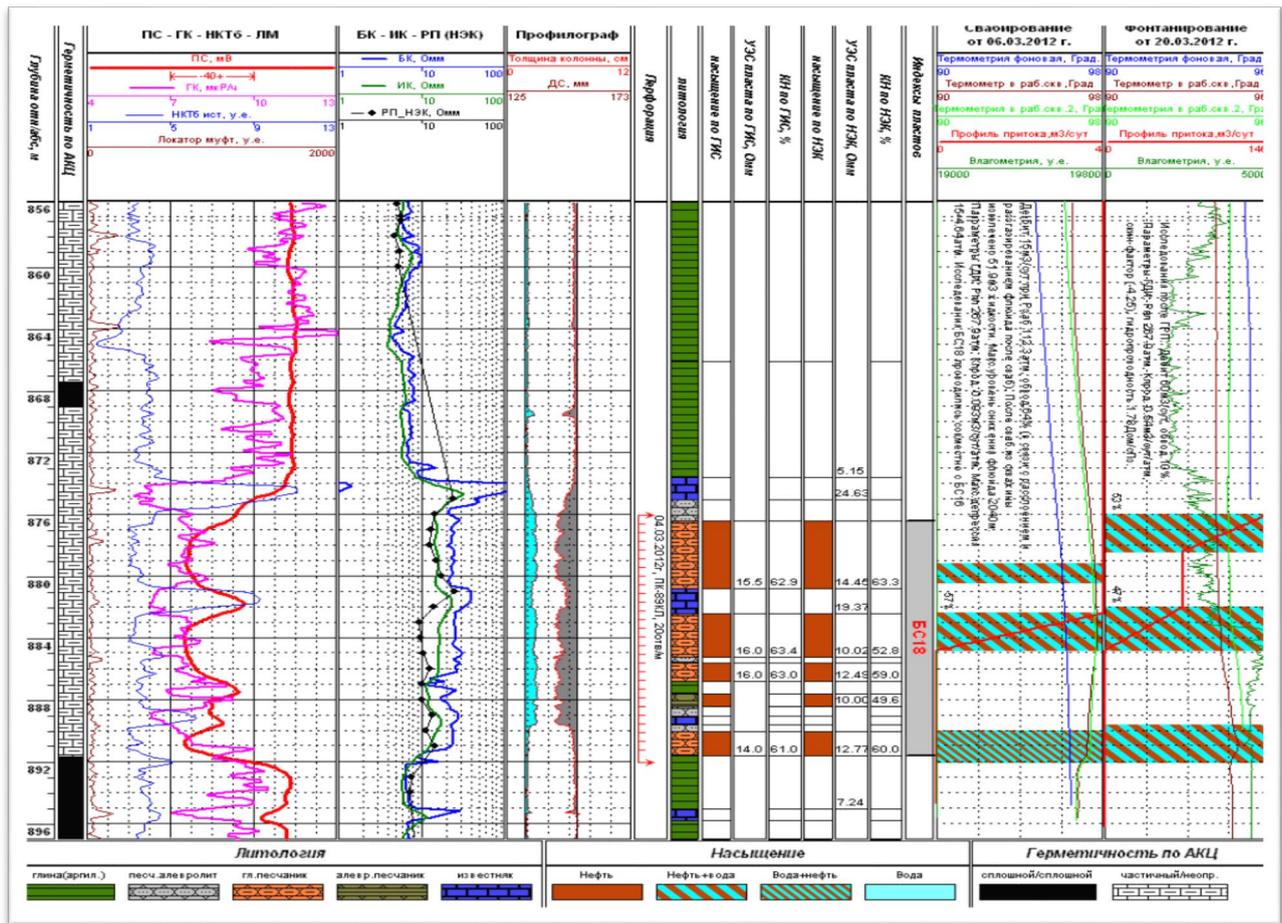


Рис. 4. Сопоставление результатов измерений дивергентного нанозлектрического каротажа (НЭК) с данными ГИС в открытом стволе от 1988 г. и ПГИ скважина 1Р, пласт BC18

По результатам интерпретации данных НЭК и ГИС по скважине 1Р, пласт BC18 можно сделать следующие выводы.

По данным метода НЭК от 2012 г. коллектора пласта BC18 оцениваются как нефтенасыщенные. В марте 2012 г. была проведена перфорация пласта в интервале 2876–2892 м.

При свабировании дебит жидкости составил 15 м³/сут при P_{заб} – 112.3 атм, обводненность – 64 %. Выделены работающие интервалы: 2879.2–2880.5 м, 2882.4–2884.9 м с характером флюида – «нефть с водой» и 2890–2892 м – «вода с нефтью».

Исследования BC18 проводились совместно с пластом BC16 методами ПГИ от марта 2012 г. после ГРП. При фонтанировании дебит жидкости достиг 60 м³/сут, обводненность – 10 %. Выделены работающие интервалы: 2876–2878.4, 2882–2884.9 и 2889.5–2892 м, характер флюида – «нефть с водой».

Таким образом, достоверность показаний метода НЭК подтверждается.

Залежь пласта BC18 р-н. (открыта по результатам испытания скважин скв. 1Р и соседних разведочных скважин. Результаты, полученные в скважинах, позволяют отнести участки залежи в районе скв. 1Р к промышленной категории запасов.

В 2014–2015 гг. в районе скв. 1Р пробурено 26 эксплуатационных скважин. Большинство скважин подтвердили геологическую модель числящуюся на гос. балансе. Данные по бурению и эксплуатации скважин позволяют увеличить категорию запасов в западном направлении. В подсчете запасов 2017 г. на основе проведенных на месторождении работ по доизучению месторождения сделана более детальная геологическая модель месторождения по сравнению с ранее представленной (рис. 5).

Объект BC18 является одним из основных объектов разработки. На его долю приходится 23 % геологических запасов нефти месторождения. Всего геологические запасы по

объекту на 01.01.2021 г. составляют 100500 тыс. т (категории запасов А+В1 – 53500, В2 – 47000 тыс. т), накопленная добыча составляет 1400 тыс. т. Коллекторские свойства пласта низкие: пористость – 16 %, проницаемость – $1,03 \times 10^{-3}$ мкм², нефтенасыщенность – 56 %.

Проведены работы по повторному испытанию интервалов пласта БС18 в 11

разведочных скважин, пробуренных в 80–90 гг. прошлого столетия. Повторные испытания с применением методов интенсификации (ГРП) показывают кратное увеличение первоначально полученных дебитов нефти. Насыщение пласта подтверждается во всех скважинах.

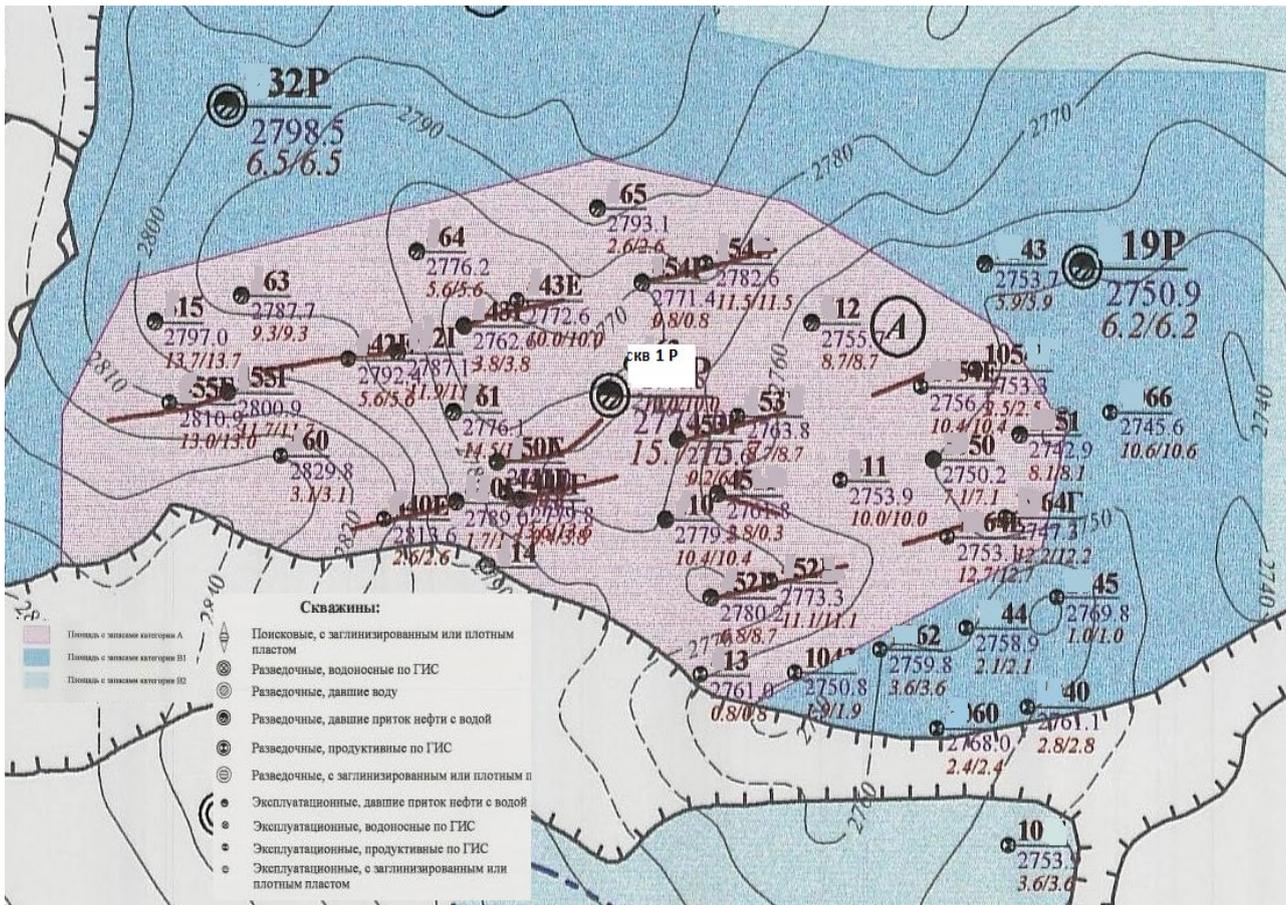


Рис. 5. Фрагмент подсчетного плана пласта БС18 2017 г. (залежь 1 район скв. 1Р)

Район скв. 1Р является основной залежью на месторождении (рис. 5), вскрытой 198 скважинами, из которых после 2019 г. пробурено 22 скважин.

Объект БС18 характеризуется низкими ФЕС, в связи с чем все новые скважины, а также скважины с невыработанными запасами вводятся в эксплуатацию с применением метода ГРП, в том числе с МГРП в горизонтальных скважинах.

Система разработки в этих условиях должна обеспечить минимизацию рисков быстрого прорыва воды от нагнетательных скважин к добывающим. Нагнетательные и

добывающие скважины не должны находиться друг напротив друга по направлению максимального стресса.

На современной стадии изученности объекта более высокую эффективность показывают горизонтальные скважины с проведением в них многозонных ГРП.

Учитывая низкую проницаемость и высокую расчлененность коллекторов пласта для увеличения площади фильтрации, необходимо создание системы перпендикулярных трещин ГРП.

Заключение

В работе рассматривалось месторождение, в котором первое разведочное бурение проводилось в 1988 г. с последующим вводом в эксплуатацию в 2014 г., находящееся в активной стадии разработки, где большой процент запасов относится к трудноизвлекаемым. Основными задачами для недропользователей при разработке данных месторождений являются максимальное повышение коэффициента нефтеизвлечения, поиск невыработанных горизонтов и контроль за состоянием извлечения запасов углеводородов. Основной целью работы являлся анализ эффективности современного геофизического метода по оценке текущей нефтенасыщенности.

Исследования были проведены как в перфорированных, так и в неперфорированных интервалах. Результаты исследования наглядно показывают степень соответствия геоэлектрической характеристики разреза по результатам измерений в открытом и обсаженном стволах скважин. Для решения задач по оценке текущей нефтенасыщенности пласта через колонну, мониторинга интервалов заводнения, контроля за изменением ВНК и выработкой запасов рекомендуется массово применять метод дивергентного наноэлектрического каротажа НЭК, зарекомендовавший себя как наиболее информативный и достоверный для месторождений Западной Сибири.

Комплексное исследование скважин технологией дивергентного наноэлектрического каротажа (НЭК) позволило недропользователю получить следующие результаты:

- исключить перфорацию «на воду»;
- выявить пропущенные интервалы и восстановить залежи;
- увеличить достоверность исходных данных при управлении разработкой месторождения;
- получить надежные данные о процессах разработки и обводнения месторождения;

- подтвердить и проверить актуальность геолого-гидродинамических моделей, от достоверности которых зависит эффективность проводимых геолого-технологических мероприятий;

- обеспечить точность подсчета запасов.

Библиографический список

Еникеева Ф.Х., Журавлев Б.К., Тропин А.Н., Черменский В.Г. Опыт промышленного применения С/О-каротажа. Проблема оценки достоверности получаемых данных // НТВ «Каротажник» № 100. Тверь: «АИС», 2002.

Кашик А.С., Рыхлинский Н.И., Книжнерман Л.А., Кривонос Р.И., Степанов А.С. К вопросу об электрическом каротаже скважин, обсаженных стальными колоннами, аппаратурой на кабеле // НТВ «Каротажник». № 3–4, выпуск 116–117. Тверь: «АИС», 2004.

Кривонос Р.И., Кашик А.С., Рыхлинский Н.И. Аппаратура для электрического каротажа обсаженной скважины НЭК-31 // Доклад на II Китайско-Российском научном симпозиуме по геофизическим исследованиям скважин. г. Шанхай, 2–5 ноября 2002 г.

Курушина Е.В. Методическое указание на тему «Обоснование рационального варианта разработки месторождения», 2003.

Методические рекомендации: «Технология ЭКОС-31-7 электрического каротажа скважины, обсаженной стальной колонной» // ГТ 1.006 РД. Разработан НППГТ «ГЕОФИЗИКА» 2006 г. Научный руководитель: к.г.-м.н Р.И. Кривонос. С. 4, 5.

Руководство по эксплуатации скважинного прибора электрического каротажа через металлические колонны «НЭК». Паспорт Б.416742.006РЭ. ООО «ИНТЕХ-Внедрение» 2009. С. 3, 4, 5, 12, 14, 18, 21.

Скважинный прибор электрического каротажа через металлические колонны «НЭК». Паспорт Б.416742.006ПС. ООО «ИНТЕХ-Внедрение» 2009. С. 1, 2.

Хаматдинов Р.Т., Велижанин В.А., Черменский В.Г. С/О-каротаж – перспективная основа современного геофизического мониторинга нефтяных месторождений // НТВ «Каротажник». № 12–13, выпуск 125–126. Тверь: «АИС», 2004.

New Feasibility of the Borehole Geophysical Method for Discovery of New Deposits, Extension Additions, and Justification of Production Drilling

A.D. Kryuchatov

Perm State University, 15 Bukireva Str., Perm 614068, Russia. E-mail: andreykryuchatov@gmail.com

The possibility of using a divergent nano-electric logging (NEL) to detect and evaluate missed and undeveloped oil-bearing formations is studied. Examples of successful solution of this problem are given, including the discovery of new deposits, extension additions, and justification of production drilling.

Key words: *zircon; metasediments; Alkesvoqe formation; SubPolar Urals.*

References

- Enikeeva F.Kh., Zhuravlev B.K., Tropin A.N., Chermensky V.G.* 2002. Opyt promyshlennogo primeneniya C/O karotazha. Problema otsenki dostovernosti poluchaemykh dannykh [Experience of industrial application of C/O logging. The problem of assessing the reliability of the obtained data]. NTV Karotazhnik. 100 AIS, Tver. (in Russian)
- Kashik A.S., Rykhlinitskiy N.I., Knizhnerman L.A., Krivonosov R.I., Stepanov A.S.* 2004. K voprosu ob elektricheskoy karotazhe skvazhin, obszhennykh stalnymi kolonnami, apparaturoy na kabele [On the issue of electrical logging of wells lined with steel columns by wireline equipment]. NTV Karotazhnik. 3-4:116-117. (in Russian)
- Khamatdinov R.T., Velizhanin V.A., Chermensky V.G.* 2004. C/O karotazhe – perspektivnaya osnova sovremennogo geofizicheskogo monitorinua neftyanykh mestorozhdeniy [C/O logging is a promising basis for modern geophysical monitoring of the oil fields]. NTV Karotazhnik. 12-13:125-126 (in Russian)
- Krivonosov R.I., Kashik A.S., Rykhlinitskiy N.I.* 2002. Apparatura dlya elektricheskogo karotazha obszhennykh skvazhin NEK-31 [Equipment for electrical logging of a case d well NEK-31]. In: Report at the II Chinese-Russian Scientific Symposium on Geophysical Well Research. Shanghai, November 2-5, 2002 (in Russian)
- Metodicheskie rekomendatsii: Tekhnologiya EKOS-31-7 elektricheskogo karotazha skvazhiny, obszhennykh stalnoy kolonnoy* [Methodological recommendations: Technology ECOS-31-7 for electrical logging of a well lined with a steel column]. GT 1.006 RD. Developed by NPPGT "GEOFI-ZIKA" 2006. Scientific supervisor, cand.geol.-min.sci. R.I. Krivonosov. (in Russian)
- Rukovodstvo po ekspluatatsii skvazhinnoy pribora elektricheskogo karotazha cherez metallicheskuyu kolonnu NEK* [Operating manual for downhole electrical logging tool through metal column "NEK". Passport B.416742.006RE. LLC "INTECH-Implementation" 2009 p.3, 4, 5, 12, 14, 18, 21.
- Skvazhinnyy pribor elektricheskogo karotazha cherez metallicheskuyu kolonnu NEK* [Downhole electrical logging tool through metal column "NEK"]. Passport B.416742.006PS. INTECH-Implementation LLC 2009 p.1,2.
- Metodicheskoe ukazanie na temu "Obosnovanie ratsionalnogo variant razrabotki mestorozhdeniya"* [Methodological instructions on the topic "Justification of a rational option for field development" 2003. Associate Professor Kurushina E.V.