DOI: 10.25515/PMI.2017.6.695

Нефтегазовое дело

УДК 550.8

ИЗУЧЕНИЕ ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫХ И НЕТРАДИЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ СОГЛАСНО ПРИНЦИПУ «ФАБРИКА КОЛЛЕКТОРА В ПЛАСТЕ»

А.Д.АЛЕКСЕЕВ[1], В.В.ЖУКОВ[1], К.В.СТРИЖНЕВ[2], С.А.ЧЕРЕВКО[3]
[1] *ООО «Газпромнефть НТЦ», Санкт-Петербург, Россия*
[2] *ООО «Газпромнефть-Ангара», Санкт-Петербург, Россия*
[3] *ООО «Газпромнефть-Хантос», г. Ханты-Мансийск, Россия*

В настоящее время в России и мире из-за истощенности старых высокопродуктивных месторождений все больше возрастает роль трудноизвлекаемых и нетрадиционных углеводородов. Благодаря научно-техническому прогрессу появилась возможность вовлекать в разработку пласты с очень низкой проницаемостью и даже синтезировать нефть и газ в пластовых условиях. Сегодня скважины служат не только для добычи углеводородов, но и являются важными элементами технологии стимуляции, через которые осуществляется техногенное воздействие на пласт с целью интенсификации из него притоков. В таком контексте сам пласт можно рассматривать как сырье для применения технологий стимуляции, а совокупность скважин, через которые на него осуществляется техногенное воздействие, – как завод или фабрику, промежуточным продуктом которого является стимулированная зона пласта, а конечным – пластовые углеводороды.

Устоявшиеся методы изучения залежей углеводородов ограничиваются определением стандартных геологических параметров, которые принято называть подсчетными (эффективная толщина, пористость, проницаемость, коэффициент нефтегазонасыщенности, площадь), но их явно недостаточно, чтобы охарактеризовать возможности разработки с применением современных технологий стимуляции. К изучению объектов, перспективных для добычи углеводородов, необходимо развивать принципиально новые подходы, позволяющие оценивать доступность ресурсов в зависимости от применяемых технологий, а также совершенствовать методы прогноза и оценки свойств стимулированной зоны пласта.

«Фабрика в пласте» – это собирательный термин, который объединяет совокупность технологий, исследований и методических подходов, нацеленных на создание и оценку стимулированной зоны пласта посредством применения современных способов техногенного воздействия на объекты, содержащие трудноизвлекаемые и «нетрадиционные» углеводороды, для интенсификации из них притоков углеводородов. В 2015 г. в компании ПАО «Газпром нефть» принят корпоративный стандарт, регламентирующий комплекс исследований в идеологии «фабрика коллектора в пласте» для методического сопровождения проектов опытно-промышленных работ по добыче нефти из низкопроницаемых пород баженовской свиты путем создания в ней зон искусственной проницаемости посредством горизонтальных скважин с многостадийными гидроразрывами. В 2016 г. построены и введены в эксплуатацию первые скважины, результаты работ подтвердили целесообразность перехода на новую методическую основу. По прошествии двух лет можно с уверенностью констатировать, что новые подходы доказали свою эффективность.

***Ключевые слова*:** сланцевая нефть, баженовская свита, трудноизвлекаемые запасы, гидроразрыв пласта, мультистадийный гидроразрыв пласта в горизонтальных скважинах

***Как цитировать эту статью*:** Алексеев А.Д. Изучение трудноизвлекаемых и нетрадиционных объектов согласно принципу «фабрика коллектора в пласте» / А.Д.Алексеев, В.В.Жуков, К.В.Стрижнев, С.А.Черевко // Записки Горного института. 2017. Т. 228. С. 695-704. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.695

Введение. Современным трендом в области восполнения ресурсов углеводородного сырья, вне сомнения, становится смещение акцентов от поиска «легкоизвлекаемых» запасов в сторону обеспечения рентабельности разработки «трудноизвлекаемых». Такая ситуация является вполне закономерной ввиду ухудшения качества ресурсной базы при растущем спросе на энергоносители, что способствует развитию технологий стимуляции притоков в скважинах. Влияние этого тренда ощущается по всему миру, в том числе и в России. Агентство Bloomberg вопреки мрачным прогнозам констатирует, что суточная добыча нефти в РФ продолжает расти и вплотную приближается к советскому рекорду 1987 г. в 11,4 млн баррелей в сутки, а в 2018 г. имеются все шансы превзойти этот уровень [7]. Такие результаты не только обусловлены вводом новых месторождений, но и во многом обязаны совершенствованию методов добычи. Так, в отдельно взятой компании ПАО «Газпром нефть» (далее Компания) есть месторождения, на которых практически 100 % фонда новых добывающих скважин вводятся в разработку после интенсификации притоков путем гидравлического разрыва пласта (ГРП). Например, один из основных активов Компании – южные лицензионные территории (ЮЛТ) Приобского месторождения, где активно разрабатываются залежи нефти в низкопроницаемых коллекторах, которые еще несколько лет

DOI: 10.25515/PMI.2017.6.695

назад было невозможно вовлечь в разработку из-за нерентабельных дебитов. Применение многостадийных ГРП в горизонтальных скважинах (МГРП ГС) позволяет создать серию искусственных трещин, благодаря которым фильтрационные свойства пласта значительно улучшаются и дебиты скважин многократно увеличиваются.

Передовые технологии стимуляции притоков в скважинах не только помогают значительно улучшить фильтрационные свойства пород, но и могут сформировать их «с нуля» в геологических телах, которые в естественных условиях залегания практически непроницаемы для пластовых флюидов. Пожалуй, наиболее ярким примером является разработка сланцевых формаций в США, которые в своем исходном состоянии проницаемости практически не имеют, но после стимуляции посредством МГРП ГС обеспечивают рентабельные дебиты нефти и газа. 20 октября 2016 г. то же агентство Bloomberg выпустило статью «Chesapeake Energy Declared «Propageddon» ...», в которой приведен пример, характеризующий возможности современных технологий по созданию искусственного коллектора в пласте [8]. Речь идет об одном из лидеров сланцевой индустрии США компании Chesapeake Energy, которая осуществила супергигантский ГРП на газоносных сланцах Хейнсвилла (Haynesville). Эта история получила развитие в сентябре 2016 г., когда Chesapeake на этих же сланцах провела ГРП с объемом песка в 14 тыс.т, после чего представители компании заявили, что на этом не остановятся. В середине октября 2016 г. вице-президент Chesapeake Джейсон Пиготт объявил, что компания поставила абсолютный рекорд – в газовую скважину с длиной горизонтального ствола ~3 км закачано 25 тыс.т песка! Таких объемов закачки расклинивающего агента (проппанта) не достигал никто за всю историю американского сланцевого бума, отмечает Bloomberg. Именно эту операцию в Chesapeake Energy назвали «пропагеддоном», объединив два слова («проппант» и «Армагеддон») в одно. По словам самого Пиготта, в результате проведенных работ продуктивность скважины выросла на 70 %. Вообще говоря, увеличение длины горизонтального ствола и объемов проппанта является актуальным трендом в разработке сланцевых формаций США. По сравнению с 2014 г. среднее количество расклинивающего агента удвоилось, а длина горизонтальных секций выросла на 50 %. По-видимому, таким образом американские сланцевые компании пытаются выживать в условиях низких цен на углеводородное сырье.

Если подойти к рассмотрению процесса добычи углеводородов (УВ) с применением техногенной стимуляции в обобщенных терминах, то весь производственный цикл можно ассоциировать с работой завода или фабрики, где сырьем выступает пласт, его стимуляция играет роль технологической линии по подготовке сырья к обработке, а конечным продуктом являются пластовые УВ. Благодаря научно-техническому прогрессу в области создания искусственной проницаемости требования к «сырью» значительно снизились, а роль «технологической линии» по его подготовке существенно возросла. В случае несоответствия «сырья» параметрам «технологической линии» выпуск конечного продукта будет ограничен или вовсе невозможен.

Постановка проблемы. Традиционно изучение залежей нефти ограничивается определением стандартных геологических параметров, которые принято называть подсчетными (эффективная толщина, пористость, проницаемость, коэффициент нефтегазонасыщенности, площадь и т.д.), но их явно недостаточно, чтобы охарактеризовать возможности разработки с применением передовых современных технологий стимуляции. Другими словами, в настоящее время не сформированы общепринятые подходы, позволяющие изучить содержащий УВ пласт как «сырье» для стимуляции из него притоков. Например, песчаники мощностью 2 м, пористостью 12 %, проницаемостью 0,2 мД ($2 \cdot 10^{-16}$ м^2) в обычном смысле мало перспективны для разработки, но если они расположены в чисто нефтяной зоне залежи, ограничены надежными барьерами от ближайших водоносных горизонтов и выдержаны по площади, то их разработка при помощи МГРП ГС может показать весьма впечатляющие результаты.

Программу исследований с целью эффективного изучения объектов с трудноизвлекаемыми и нетрадиционными запасами необходимо организовывать таким образом, чтобы не только охарактеризовать их с позиций оценки геологических запасов, но и определить параметры, контролирующие восприимчивость к современным технологиям стимуляции пласта. Перед специалистами встает абсолютно новая задача в планировании, строительстве и управлении «технологическими линиями фабрики в пласте», чтобы обрабатываемое ими «сырье» обеспечивало

DOI: 10.25515/PMI.2017.6.695

«рентабельный выпуск продукции». Эти вопросы особенно актуальны для разработки ресурсов УВ, содержащихся в отложениях, которые принято называть «сланцевыми формациями». Их главное отличие от традиционных объектов разработки заключается не только в почти полном отсутствии естественной проницаемости, но и в многообразии ресурсного потенциала, который может быть представлен газообразными, жидкими и твердыми углеводородами, а также твердым органическим веществом (керогеном), не реализовавшим свой генерационный потенциал. В этой связи «фабрики в пласте» могут отличаться типом «потребляемого сырья» и технологиями его подготовки для целей добычи УВ.

Сегодня добывающие компании нацелены на извлечение УВ посредством горизонтальных скважин с МГРП, благодаря которым в пласте формируется сеть техногенных трещин, образующих некое подобие искусственного коллектора. При этом в «сланцевых» формациях в разработку вовлекается только часть углеводородного потенциала, а именно нефть или газ, образованные естественным образом. В данном случае технологии разработки трудноизвлекаемых и нетрадиционных объектов очень похожи. В обоих случаях главная задача состоит в увеличении проницаемости пласта путем техногенной стимуляции. Однако нетрадиционные объекты гораздо требовательнее к густоте сети трещин и их эффективная разработка возможна только при условии создания стимулированного объема, а не серии планарных трещин [1]. Кроме того, в нетрадиционных объектах, приуроченных к высокоуглеродистым формациям, значительная часть подвижной легкой нефти сорбирована более тяжелыми УВ и твердым органическим веществом (керогеном). Такую нефть можно вовлечь в разработку только, если каким-то образом преодолеть действие сил, удерживающих легкие УВ на поверхности и внутри органических компонент породы.

Еще одним важным отличием является то, что при полном извлечении нефти разработка трудноизвлекаемых объектов завершится, а у нетрадиционных еще останется значительный резерв. Нетрадиционные объекты, главным образом высокоуглеродистые породы, кроме газа и легкой нефти имеют огромный добычной потенциал, связанный с твердыми углеводородами и керогеном. В этом случае на смену «фабрикам коллектора в пласте» придут «фабрики по производству искусственных УВ в пласте», которые станут перерабатывать тяжелые УВ и кероген в синтетические нефть или газ.

В пользу обозначенного выше пути развития технологий добычи свидетельствует реальная активность компаний по добыче «сланцевых» УВ и опытно-промышленные работы (ОПР) крупных мировых компаний, которые нацелены на оценку возможностей внутрипластового синтеза нефти из керогена [2]. Таким образом, при текущем уровне развития технологий разработка трудноизвлекаемых и нетрадиционных УВ имеет схожие задачи, методы решения которых можно заключить в собирательный термин «фабрика коллектора в пласте».

Ярким примером высокотехнологичных скважин в Западной Сибири, идейно наиболее близким к «фабрике коллектора в пласте», являются горизонтальные скважины с МГРП, построенные на баженовскую свиту, которая является самой большой «сланцевой формацией» в мире. При средней толщине 30-40 м она распространена на площади около 1 млн 200 тыс.км^2. Баженовскую свиту принято считать аналогом сланцевых формаций в США, для которого пока еще не подобран ключ к разработке. В отличие от американских сланцев в ряде случае баженовская свита характеризуется весьма значительными притоками нефти, полученными в вертикальных скважинах без применения каких-либо способов стимуляции притоков. Это обстоятельство до сих пор определяет основной вектор ее изучения – разработку методик поиска в ней высокопродуктивных зон. При этом вопросам изучения эффективности техногенного воздействия на породы баженовской свиты с целью интенсификации притоков до недавнего времени уделялось недостаточно внимания.

Методология. Компания ПАО «Газпром нефть» стала активно заниматься опытно-промышленной разработкой баженовской свиты в 2013 г. На первых стадиях реализации проектов изучение шло по типичному в этом случае сценарию. В первой же скважине, пробуренной на Пальяновской площади Красноленинского месторождения, из баженовско-абалакского комплекса (БАК) получен фонтанирующий приток нефти в 80 т/сут, и последующие программы геологоразведочных работ (ГРР) были нацелены на выявление высокопродуктивных зон методами сейсморазведки и потенциальных полей (грави- и магниторазведка). После получения первых резуль-

DOI: 10.25515/PMI.2017.6.695

татов площадных прогнозов в наиболее перспективных зонах с отбором керна и расширенным комплексом геофизических исследований пробурено еще пять новых наклонно-направленных скважин, а затем еще две пологие скважины с зенитными углами около 70°. Во всех скважинах получен приток, но ни в одной из них подобного уровня дебитов достичь не удалось даже после ГРП. Более того, хоть сколько-нибудь близкого успеха не получилось достичь и на следующих проектах ОПР, которые были инициированы на других площадях.

После проведенных достаточно масштабных работ пришло осознание, что исключительное внимание к поиску высокопродуктивных зон – это тупиковый путь. Если даже удастся разработать самую совершенную технологию поиска, то несколько скважин, пробуренных в высокопродуктивных зонах баженовской свиты, не смогут обеспечить поддержание объемов добычи нефти в Западной Сибири. Между тем баженовская свита вполне подходит для этой роли, она по всему разрезу и почти на всей своей огромной площади залегания содержит легкую нефть, а свободная пластовая вода в ней практически отсутствует [2].

В 2015 г. в Компании по отношению к баженовской свите изменили принципы изучения. На смену поиску высокопродуктивных зон пришла идея создания искусственного коллектора, в рамках которой нефтесодержащие отложения стали изучать как «сырье» для самых современных способов стимуляции притоков при помощи ГС с МГРП. Принципиально новые подходы в изучении баженовской свиты стали развиваться в широком кругу специалистов Компании, ее дочерних обществ, консорциума научных организаций с привлечением сторонних сервисных компаний. Работу по организации проектов ОПР взял на себя проектный офис «Бажен», входящий в состав ООО «Газпромнефть-Ангара», а методологическая проработка поручена управлению нетрадиционных запасов «Газпромнефть НТЦ».

В первую очередь предстояло определить главное свойство, которое контролирует продуктивность пласта в условиях искусственно созданной проницаемости. Теоретически технологии стимуляции могут развиться до такого уровня, что позволят создавать искусственную проницаемость сколь угодно большого значения в любых геологических условиях, но техническая возможность сделать пласт высокопроницаемым вовсе не означает, что из него можно будет добыть нефть. Для этого объект стимуляции должен ее содержать, и она должна иметь возможность перемещаться по системе искусственных трещин, т.е. быть подвижной в условиях наведенной проницаемости и технически достижимого перепада давлений (депрессии в скважине). Само понятие «подвижность пластовой жидкости» до сих пор строго не определено, но относительно способности легких углеводородов баженовской свиты перемещаться под действием перепада давления в условиях искусственной проницаемости есть важное обстоятельство, которое значительно ограничивает объемы, вовлекаемые в разработку.

Легкие нефтяные УВ могут удерживаться в связанном состоянии как органическими, так и минеральными компонентами породы. Адсорбция нефти на поверхностях минеральных зерен породы является обычным явлением, с которым сталкиваются при разработке традиционных месторождений. Явление сорбции легких УВ более тяжелыми и керогеном – характерная особенность нефтематеринских пород [3]. Таким образом, подвижные УВ прежде всего должны быть несвязанными (свободными) и обладать положительной мобильностью (мобильность – отношение проницаемости пласта к вязкости фильтрующейся жидкости) в условиях естественной и наведенной ГРП проницаемости. При этом подвижные УВ могут содержаться как в сообщающихся пустотах, так и в изолированных (или слабосвязанных). Формальные критерии, позволяющие оценить их объем, специально разработаны в рамках научно-технического сопровождения проектов ОПР «Газпром нефти» и описаны в статье [2].

Доля подвижных УВ является фундаментальным свойством пласта, не зависящим от техногенных факторов (например, таких, как конфигурация простимулированной зоны). Этот параметр отвечает за объем, который можно потенциально вовлечь в разработку в условиях идеальной стимуляции пласта, но он никак не характеризует условия, в которых предстоит ее проводить. Возможности по созданию искусственной проницаемости обусловлены свойствами другой природы, определяющими восприимчивость пород, слагающих пласт, к данному типу техногенного воздействия. Для солянокислотной обработки важно количество карбонатного материала и характер его распределения в пласте, для технологии ГРП – геомеханические характеристики

DOI: 10.25515/PMI.2017.6.695

пласта, от которых зависит геометрия простимулированной зоны, т.е. эффективность охвата породы, содержащей подвижные УВ. Теоретически можно представить ситуацию, когда наибольшая эффективность стимуляции будет достигаться при инициации из интервала, в котором вообще нет подвижных запасов, или он находится вне границ объекта разработки. Следовательно, в случае стимуляции пласта при помощи ГРП геомеханические параметры также являются независимыми фундаментальными характеристиками пласта, которые необходимо изучать.

Чтобы охарактеризовать нефтесодержащий пласт как «сырье» для добычи нефти при помощи ГРП согласно принципам «фабрики коллектора в пласте», необходимо построить профили подвижности пластовых УВ и минимальных горизонтальных напряжений (или хрупкости) [2]. Интервалы с подвижными УВ в области пониженных горизонтальных напряжений (повышенной хрупкости) являются основными объектами, наиболее восприимчивыми к стимуляции при помощи ГРП.

Разработанные подходы к оценке перспективности нефтесодержащего разреза несколько отличаются от общепринятых. Чтобы их максимально интегрировать в действующие нормативные документы, регламентирующие подсчет запасов и разработку месторождений УВ, предложен дифференцированный метод, который внедрен как корпоративный стандарт Компании при работе с нетрадиционными объектами. Суть его состоит в следующем. По отношению к любой технологии стимуляции притоков в скважинах можно выделить, как минимум, три типа пород: *естественные коллекторы*, *технологически стимулируемые породы*, *технологически нестимулируемые породы*. Естественные коллекторы способны отдавать пластовый флюид без стимуляции, при этом их продуктивность в данном случае не имеет значения. Технологически стимулируемые породы могут отдавать пластовый флюид только после стимуляции. Технологически нестимулируемые породы не восприимчивы к выбранному виду технологического воздействия и пластовый флюид не отдают ни до, ни после стимуляции. Очевидно, что за таким делением должны стоять формализованные критерии, позволяющие один тип пород отделять от другого [2].

Таким образом, эффект от стимуляции пласта определяется не только чисто технологическими параметрами, но и фундаментальными характеристиками слагающих его пород, которые необходимо изучать. Для формирования искусственной проницаемости в пласте путем ГРП, т.е. «фабрики коллектора в пласте», такими характеристиками являются объем подвижных УВ и геомеханические параметры. Изучив профиль напряжений и распределение интервалов с подвижными запасами в одном месте, не следует думать, что похожие характеристики сохранятся в другом, находящемся на некотором удалении. В условиях разработки при помощи ГС с МГРП для проводки горизонтальных стволов необходим инструмент прогнозирования разреза между опорными скважинами. В этой связи третьим «столпом» идеологии «фабрики коллектора в пласте» предложено считать *геологический концепт*, который характеризует законы вертикальной и латеральной изменчивости разреза, исходя из условий его формирования и тектонического развития территории.

Геологический концепт представляет собой удобный инструмент для планирования горизонтальных скважин и разработки месторождения в целом. В его рамках несколько видоизменяется роль площадных методов прогноза, результаты которых не только служат для ранжирования территории по продуктивности в условиях техногенного вмешательства, но и обеспечивают решение сугубо технических задач, связанных с проводкой горизонтальных стволов. В существующих условиях, когда передовые высокотехнологичные приборы каротажа во время бурения недоступны ввиду санкционных ограничений, роль надежных геологических представлений о латеральной и вертикальной изменчивости, формализованных в виде геологического концепта, значительно возрастает.

Применение на практике нового типа мышления в идеологии «фабрика коллектора в пласте» уже принесло первые плоды – построенные «Газпром нефтью» на Пальяновской площади две горизонтальные скважины с девятью стадиями ГРП показали промышленный приток нефти из баженовской свиты. Примечателен тот факт, что одна из скважин согласно площадным прогнозам, выполненным в логике традиционных подходов, пробурена в неперспективной зоне, при этом ее результат абсолютно закономерен в рамках новой идеологии, благодаря которой перспективная зона нефтеносности значительно расширилась. В этом нетрудно убедиться, если несколько углубиться в детали.

DOI: 10.25515/PMI.2017.6.695

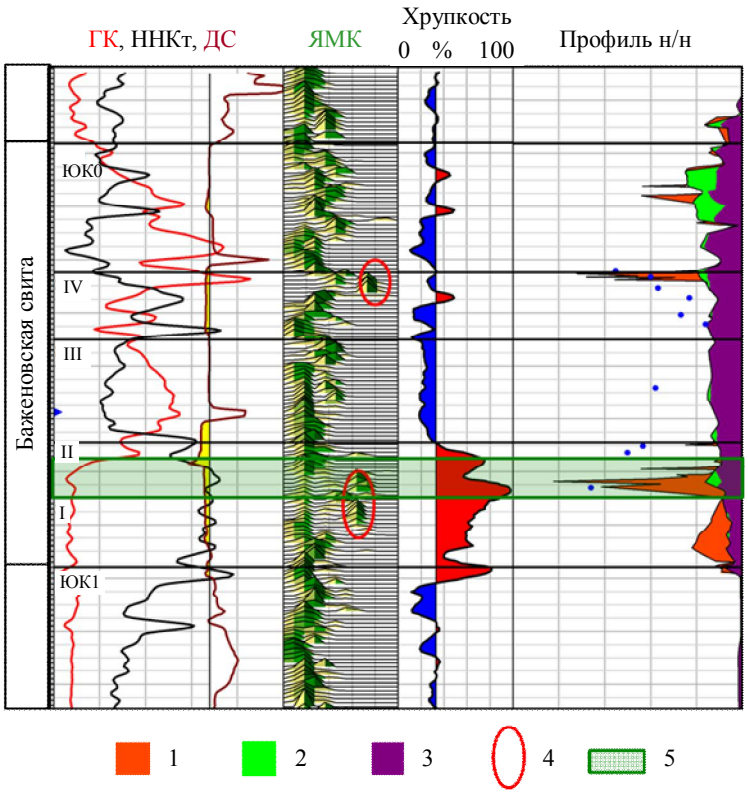


Рис.1. Планшет для анализа разреза с целью обоснования интервалов перфорации, мест инициации ГРП и проводки горизонтального ствола (1 ячейка – 1 метр)

ГК – гамма-каротаж; ННКт – нейтрон-нейтронный каротаж по тепловым нейтронам; ДС – диаметр скважины по данным кавернометрии; ЯМК – ядерно-магнитный каротаж; профиль н/н – профиль нефтенасыщенности в единицах относительного объема; ЮК0 – баженовская свита как объект разработки; ЮК1 – абалакская свита как объект разработки

1 – легкая подвижная нефть связанных пустот; 2 – легкая подвижная нефть изолированных (либо слабосвязанных) пустот; 3 – связанная легкая нефть; 4 – свободные УВ по данным ЯМК; римскими цифрами обозначен номер пачки; синими точками показаны определения пористости по керну, полученные по стандартной методике; 5 – интервал радиолярита

Обсуждение. Как уже отмечалось, в 2013 г. на Пальяновской площади Красноленинского месторождения из баженовско-абалакского комплекса получен фонтанирующий приток нефти в 80 т/сут, после чего сделан прогноз высокопродуктивных зон с помощью различных технологий обработки данных сейсморазведки 3D. По его результатам наибольшие перспективы связаны с разломными зонами, сосредоточенными в районах выступа доюрского комплекса, а депрессионная часть, приуроченная к его погруженным участкам, является неперспективной. Пробуренные в рамках ОПР скважины с отбором керна и расширенным комплексом геофизических исследований (ГИС) при помощи новых методик позволили выделить интервалы с подвижной нефтью и обеспечили возможность построения надежных геомеханических моделей.

На планшете по одной из таких скважин (рис.1) приведены кривые ГИС, профили баженовской свиты Пальяновской площади по относительной хрупкости и нефтенасыщенному объему, дифференцированному по степени подвижности легкой нефти. Следует обратить внимание на прослой пачки II, в котором выявлен максимальный объем подвижной нефти и наибольшая относительная хрупкость в разрезе.

Наибольшую эффективность стимуляции можно достичь, если провести ствол горизонтальной скважины по наиболее благоприятным с позиции охвата трещинами ГРП интервалам с подвижными запасами. Для этого необходимо иметь представления о вертикальной и латеральной изменчивости всего пласта, от которой зависит выдержанность каждого отдельного прослоя по толщине и площади. Можно «проводить разведку боем» при помощи дорогостоящих приборов каротажа во время бурения, а можно руководствоваться положениями геологического концепта, который описывает законы вертикальной и латеральной изменчивости. В этом случае при проводке горизонтального ствола можно использовать надежные и выдержанные реперные границы, которые характеризуются контрастным обликом в полях стандартных методов геонавигации: гамма-каротажа и удельных электрических сопротивлений. Вариант с использованием геологического концепта со всех позиций является более рациональным, но требует определенной проработки и геологических знаний об объекте.

Накопление отложений баженовского горизонта в пределах Красноленинского свода происходило в обширном эпиконтинентальном морском бассейне ниже волнового воздействия, преимущественно в анаэробной обстановке. Осадконакопление отличалось крайне низкой скоростью и не компенсировало прогибание бассейна, в котором биогенная седиментация преобладала над терригенной. Это определило высокую латеральную выдержанность толщи в целом. Границы циклитов баженовского горизонта довольно четкие, сформированные в условиях смены фонового терригенно-биогенного осадконакопления на чисто биогенное. Биогенные слои отвечают пе-

DOI: 10.25515/PMI.2017.6.695

риодам проникновения холодных, насыщенных кислородом арктических вод в баженовский бассейн седиментации, что приводило к вспышкам биопродуктивности зоопланктона, скелетные останки которого образовывали выдержанные на большой площади прослои [2].

Таким образом, из анализа условий осадконакопления можно сделать вывод, что в пределах отдельно взятой локальной площади, такой как Пальяновская, основным фактором, контролирующим латеральную изменчивость отложений баженовской свиты на стадии седиментогенеза, мог быть только палеорельеф дна бассейна. В погруженных частях осадка скапливалось больше, меньше в приподнятых, а в остальном отложения характеризуются незначительной изменчивостью. Другими словами, на территории исследований условия седиментации баженовской свиты обеспечили строгую последовательность залегания выдержанных по площади слоев, толщина которых контролируется палеорельефом, а в остальном решающая роль в формировании вертикальной и латеральной изменчивости принадлежит наложенным вторичным процессам.

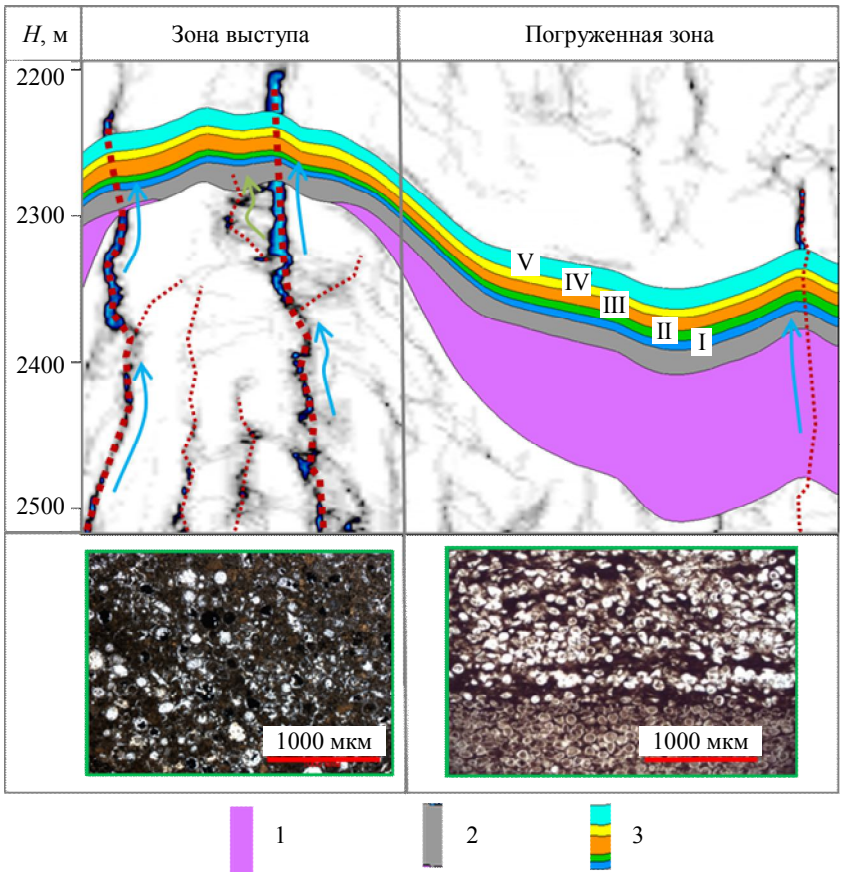


Рис.2. Иллюстрация геологического концепта на сейсмическом разрезе, построенном по технологии ант-трекинг [5]

1 – тюменская свита; 2 – абалакская свита; 3 –баженовская свита; римскими цифрами обозначены пачки баженовской свиты

Очаги вторичных преобразований в баженовской свите связаны с влиянием гидротермально-метасоматических преобразований и тяготеют к выступам доюрского комплекса, который имеет дизъюнктивно-блоковое строение [6]. Благодаря влиянию наложенных процессов породы одного и того же стратиграфического уровня баженовской свиты над выступами доюрского комплекса и в погруженных частях могут иметь различный тип пустотного пространства и его объем, а также характеризоваться разным литологическим составом.

Основная идея геологического концепта баженовской свиты Пальяновской площади Красноленинского месторождения показана на рис.2. Для иллюстрации влияния наложенных процессов взят тот же слой пачки II (см. рис.1, усл. обозначение 5), представленный силицитом с различными типами цемента. В зоне выступа фундамента он подвергнут вторичным преобразованиям, связанным с его частичной карбонатизацией и/или фосфоритизацией, а в погруженных участках сохранил первичную (реликтовую) радиоляриевую структуру. В обоих случаях исходным осадком являлся радиолярит, почти целиком состоящий из скелетных остатков зоопланктона – радиолярий, которые имеют кремневый скелет. Именно радиоляритовому прослою соответствует самое высокое содержание подвижных УВ и самая высокая хрупкость в разрезе (см. рис.1).

Вторичные наложенные процессы могут способствовать как улучшению, так и ухудшению фильтрационно-емкостных свойств. Для данной площади вторичная карбонатизация и фосфоритизация в зоне выступов доюрского комплекса совместно с активным тектоническим развитием территории способствовали формированию улучшенных коллекторских свойств БАК, которые в ряде случаев позволяют достичь высоких дебитов без всякой стимуляции, как это случилось в первой

DOI: 10.25515/PMI.2017.6.695

же скважине ОПР в 2013 г. Тем не менее последующее бурение пяти наклонно-направленных и двух пологих скважин показало, что для этой зоны результат первой скважины скорее случайность, чем закономерность, так как даже ГРП не смог исправить ситуацию. Подобное несоответствие ожиданиям можно было бы объяснить недостаточно надежным прогнозом очагов вторичных преобразований, но изучение отобранного керна показало, что скважины действительно пробурены в зонах активных гидротермально-метасоматических преобразований. Таким образом, можно заключить, что не все факторы, влияющие на продуктивность баженовской свиты, были учтены при заложении скважин ОПР, и что текущего уровня достоверности площадных прогнозов недостаточно для тиражирования положительного опыта с целью организации коммерчески успешной добычи.

В сложившейся ситуации организация разработки баженовского горизонта согласно идеологии «фабрика коллектора в пласте» может гарантировать более высокий и стабильный результат, так как опирается на характеристики пласта, которые можно достоверно измерить и спрогнозировать уже сегодня. В этой концепции основная ответственность за обеспечение уровня добычи перекладывается с технологий поиска высокопродуктивных зон на организацию эффективной работы «технологической линии по подготовке сырья», т.е. на техногенную стимуляцию пласта. Опыт строительства тысяч горизонтальных скважин с многостадийными ГРП в США показал, что при современном уровне технологий строительства скважин и их освоения «фабрика коллектора в пласте» имеет высокий шанс на успех. Для широкомасштабной разработки баженовской свиты это обстоятельство намного важнее, чем совершенствование технологий поиска высокопродуктивных зон, площадь которых несоизмеримо меньше общей, которая потенциально нефтеносна при условии создания искусственной проницаемости.

В нашей стране пока еще не накоплен опыт строительства высокотехнологичных скважин, при помощи которых добывают «сланцевую нефть» в США, поэтому в текущей ситуации наиболее правильным первым шагом стало бы опробование зарекомендовавших себя за рубежом технологий. С этой целью на Пальяновской площади в зоне выступа доюрского фундамента, которую принято считать наиболее перспективной, пробурена первая горизонтальная скважина длиной 1000 м с девятью стадиями ГРП, проведенными по технологии Slick Water, при которой с большими расходами (не менее 12 $м^3$/мин, стандартный ГРП ~3,5 $м^3$/мин) в пласт закачивается обычная вода с расклинивающим агентом (проппантом) и понизителем трения. Новая скважина показала хороший результат, хотя несколько ниже ожиданий. Возможно, это вызвано тем, что некоторая часть горизонтального ствола попала в зону влияния исторической разработки, что подтвердили гидродинамические исследования, которые засвидетельствовали пониженные пластовые давления в интервале двух стадий, находящихся в непосредственной близости к разлому, пересеченному скважиной. В условиях разработки традиционных пластов зоны выработки запасов имеют преимущественно концентрические формы, здесь же оказалось, что они могут значительно вытягиваться вдоль разломов, что невозможно было спрогнозировать при заложении этой скважины.

Конечно же, по результатам бурения одной скважины нельзя говорить о некой системности и ожидании повторения результата. С этой целью нужно построить и опробовать, как минимум, несколько скважин в идентичных геологических условиях и провести стимуляцию по одной и той же технологии. Уникальность таких скважин, отсутствие конкуренции на рынке подрядчиков, ограничения доступа к западным технологиям из-за санкций – все это делает подобные скважины очень дорогостоящими, поэтому до статистически представительного результата еще далеко. Но все же в качестве доказательства справедливости основных положений новой концепции изучения и разработки трудноизвлекаемых и нетрадиционных УВ, названной «фабрикой коллектора в пласте», можно привести еще один убедительный пример.

В соответствие с изложенным геологическим концептом очевидна перспективность погруженной зоны баженовской свиты Пальяновской площади, для которой характерны:

- увеличенная мощность разреза (в том числе радиоляритового слоя, с максимальной концентрацией подвижных УВ);
- повышенная емкость, приуроченная к сохраненной реликтовой пористости радиоляритов;
- отсутствие разломов, что обеспечивает хорошую прослеживаемость разреза по площади;
- отсутствие влияния исторической разработки.

DOI: 10.25515/PMI.2017.6.695

Однако с точки зрения традиционных подходов это абсолютно бесперспективная зона, так как:

• результаты бурения разведочных скважин не показали хоть сколько-нибудь значимых естественных дебитов;

• ни один из результатов площадного прогноза посредством различных методов не охарактеризовал эту зону в качестве перспективной;

• опыт разработки баженовской свиты на других месторождениях свидетельствует о более низкой перспективности погруженных зон.

Увеличенная мощность разреза и поровый характер пустотного пространства радиоляритового слоя (в зоне выступа фундамента он из-за вторичной проработки преимущественно трещинно-каверновый), позволяют предположить более высокую плотность запасов погруженной зоны, а значит, ее большую перспективность для разработки. Кроме того, ее изучение представляет стратегический интерес, так как позволяет значительно расширить перспективную площадь вплоть до самых лицензионных границ Пальяновской площади. Однозначно, традиционными способами разработки эту нефть не добыть.

С целью выяснения перспектив разработки более погруженных зон баженовской свиты на Пальяновской площади пробурена вторая горизонтальная скважина, длина которой составила те же 1000 м. Эта скважина имеет девять стадий ГРП и является первой скважиной в России, по своим параметрам максимально приближенной к скважинам, при помощи которых добывают сланцевую нефть в США. В ней проведено цементирование с вращением горизонтального хвостовика длиной 1000 м, выполнена стимуляция по технологии plug&perf при помощи гибридного ГРП с высокими скоростями закачки технологической жидкости. Новая скважина, построенная согласно принципам «фабрики коллектора в пласте» в зоне, считавшейся до этого времени неперспективной, дала фонтанирующий приток нефти со стартовым дебитом 45 т/сут! Полученный результат даже несколько превысил ожидания, так как достигнутый дебит планировалось получить при более низком забойном давлении в условиях механизированной эксплуатации.

В описанных примерах никак не затронуты технологические аспекты создания искусственного коллектора, которые, вне всяких сомнений, играют одну из решающих ролей. Отечественный путь изучения баженовской свиты оставил практически без внимания вопросы исследования совместимости технологических жидкостей и расклинивающих агентов (проппантов) с породой, а также влияние основных параметров дизайна ГРП (скорости закачки; объемов несущей жидкости и ее реологии; объема, типа и размера расклинивающего агента) на его эффективность. По этой причине в настоящее время нет возможности провести тонкую настройку «фабрики коллектора в баженовской свите» с учетом ее уникальных особенностей в том или ином районе Западной Сибири. Нужно понимать, что эта задача не ограничивается лишь «расходными материалами» (химия, проппанты, колонны, хвостовики, подвески, пробки) и оборудованием (флот ГРП, гибкие насосно-компрессорные трубы). Кроме того, имеется острая потребность в надежных инструментах моделирования ГРП и средствах контроля параметров простимулированного объема. Для этой цели Компания совместно с Московским физико-техническим институтом разрабатывает симулятор ГРП и проводит большую работу по организации исследований с целью мониторинга параметров стимулированной зоны и повышения эффективности ГРП. Указанные работы находятся в начальной стадии реализации, поэтому вопросы обоснования оптимальных характеристик ГРП пока остаются за рамками настоящей статьи.

В качестве заключения. В кругу специалистов тематика «сланцевой революции в России» вызывает бурные дискуссии. Как оптимисты, так и пессимисты задаются вопросом, который, по мнению большинства, является главным: «Сколько должно пройти лет, чтобы в России свершилась “сланцевая революция”?». Материалы настоящей статьи, по мнению авторов, наглядно показывают, что актуальные вопросы вовлечения в разработку потенциала «главной сланцевой формации России» – баженовской свиты, далеко не измеряются только количеством затраченных на ее изучение лет, их с момента получения первых притоков в конце 1960-х годов прошло достаточно. Гораздо более точно обозначенную проблему характеризуют нерешенные задачи, о существовании которых еще несколько лет назад исследователи даже не задумывались. Их всех объединяет один главный вопрос: «Как поведут себя современные (и очень дорогие) технологии стимуляции пласта в геологических условиях баженовской свиты?». Число нерешенных задач следует соотнести с количеством новых высокотехнологичных скважин, которые предстоит построить

DOI: *10.25515/PMI.2017.6.695*

для их решения, а также с объемом денежных средств, который необходимо вложить в опытно-промышленные работы. Только в этом случае можно оценить требуемое время, являющееся производной величиной от масштаба и успешности проводимых опытно-промышленных работ.

26 апреля 2017 г. министр энергетики Российской Федерации Александр Валентинович Новак, в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 03.07.2014 № 1217-р, присвоил проекту компании ПАО «Газпром нефть» по созданию комплекса отечественных технологий и высокотехнологичного оборудования разработки баженовской свиты статус национального. В конце октября 2017 года «Газпром нефть» и правительство Ханты-Мансийского автономного округа подписали соглашение о запуске «Технологического центра «Бажен». Тем самым государство на федеральном и региональном уровнях продемонстрировало острую заинтересованность в развитии отечественных технологий добычи «сланцевой» нефти, что станет новым импульсом для развития всей российской нефтегазовой отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вероятностная оценка накопленной добычи скважин при разработке нефтематеринских пород с учетом геологических и технологических неопределенностей / М.Г.Ненашева, В.О.Демо, В.В.Жуков, Т.Н.Шевчук // Российская нефтегазовая конференция и выставка SPE (24-26 октября 2016, Москва). https://www.onepetro.org/search?q=SPE-182077-RU

2. Дифференцированный подход к оценке ресурсной базы нефтематеринских отложений / А.Д.Алексеев, А.А.Антоненко, В.В.Жуков, К.В.Стрижнев // Российская нефтегазовая конференция и выставка SPE (24-26 октября 2016, Москва). https://www.onepetro.org/search?q=SPE-182074-RU

3. *Костенко О.В.* Блокирующий характер распределения высокомолекулярных соединений битумоида в поровой системе баженовской свиты (Западно-Сибирский бассейн) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2014. Т. 9. № 1. С. 1-13.

4. *Немова В.Д.* Условия формирования коллекторов в отложениях баженовского горизонта в районе сочленения Красноленинского свода и Фроловской мегавпадины // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. Т. 7. № 2. С. 1-14.

5. Построение трехмерной геологической модели баженовской свиты в пределах северо-восточного борта Красноленинского свода / Е.О.Толмачев, А.Д.Алексеев, Е.Н.Главнова, В.В.Жуков, Т.Н.Шевчук // PROНефть. 2017. № 1(3). С. 23-27.

6. *Стрижнев К.В.* Выделение перспективных нефтегазоносных площадей для нетрадиционных коллекторов баженовской свиты / К.В.Стрижнев, Д.Е.Заграновская, В.В.Жуков // Недропользование XXI век. 2015. № 1(51). С. 46-51.

7. *Bierman S.* Russia Smashes Post-Soviet Oil Supply Record as OPEC Weighs Curb / S.Bierman, S.Lee, D.Khrennikova. http://www.bloomberg.com/news/articles/2016-09-28/russia-smashes-post-soviet-oil-supply-record-as-opec-weighs-curb

8. *Carroll J.* Chesapeake Energy Declares «Propageddon» With Record Frack / J.Carroll, D.Wethe. http://www.bloomberg.com/news/articles/2016-10-20/chesapeake-declares-propageddon-with-record-frack-in-louisiana

***Авторы*: А.Д.Алексеев**, *канд. геол.-минерал. наук*, *ведущий эксперт*, *Alekseev.AlDm@gazprom-neft.ru* (*ООО «Газпромнефть НТЦ»*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **В.В.Жуков**, *начальник департамента*, *Zhukov.VV@gazpromneft-ntc.ru* (*ООО «Газпромнефть НТЦ»*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **К.В.Стрижнев**, *д-р техн. наук*, *исполнительный директор*, *Strizhnev.KV@gazprom-neft.ru* (*ООО «Газпромнефть-Ангара»*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **С.А.Черевко**, *заместитель генерального директора*, *Cherevko.SeA@hantos.gazprom-neft.ru* (*ООО «Газпромнефть-Хантос»*, *г. Ханты-Мансийск*, *Россия*).

Статья принята к публикации 03.10.2017.