

УДК: 622.276:338.242

Байдюков К.О.<sup>1</sup>, Бравков П.В.<sup>2</sup>, Жданев О.В.<sup>2</sup>, Кононенко В.А.<sup>1</sup> (1 — ООО «РН-ГРП» (ПАО «НК «Роснефть»), 2 — ТЭК ФГБУ «Российское энергетическое агентство»)

## О ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ГРП В РОССИИ

*В статье рассматриваются технические требования к комплексу оборудования для гидроразрыва пласта (ГРП) будущего (операции / процессу и оборудованию), возможные архитектурные решения. Определяющим значением в формировании перспективной архитектуры флота ГРП является широкомасштабный переход к разработке трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) углеводородного сырья (УВС). Данный переход обусловлен снижением уровня добычи из традиционных коллекторов и целевыми показателями Энергетической политики Российской Федерации до 2035 г. Перспективный флот ГРП должен иметь возможность выполнения работ в автоматическом режиме с ведением закачки расходом до 18 м<sup>3</sup>/мин, при давлении закачки до 100 МПа. Характер закачки может изменяться в зависимости от свойств коллектора, система подачи пропанта, жидкости и специализированных добавок должна обеспечивать как импульсную, так и непрерывную закачку в пласт. **Ключевые слова:** гидроразрыв пласта, флот ГРП, интенсификация добычи, трудноизвлекаемые запасы (ТРИЗ).*

Baydyukov K.O.<sup>1</sup>, Bravkov P.V.<sup>2</sup>, Zhdanov O.V.<sup>2</sup>, Kononenko V.A.<sup>1</sup> (1 — RN-GRP (Rosneft), 2 — Russian Energy Agency)

## ON PRIORITY DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF GRP TECHNOLOGIES IN RUSSIA

*The paper covers the technical requirements for the future hydraulic fracturing fleet (operations / process and equipment) and its potential architectural structure. The critical importance to define the most promising architecture of the hydraulic fracturing fleet is a large-scale transition to the oil and gas production from unconventional reserves. This transition is due to a decrease in the level of production from traditional reservoirs and the target indicators of the Energy Strategy of the Russian Federation until 2035. A prospective hydraulic fracturing fleet should be able to perform work in an automatic mode with a pumping rate of up to 18 m<sup>3</sup>/min, at working pressure of up to 100 MPa. The nature of the injection can vary depending on the properties of the reservoir, the proppant, fluid and specialized additives supply system must provide both pulsed and continuous injection into the formation. **Keywords:** hydraulic fracturing, hydraulic fracturing fleet, production stimulation, hard-to-recover reserves, unconventional reserves.*

## Часть 1 Введение

В настоящее время для более 80 % нефтяных и более 30 % газовых скважин проводятся операции гидравлического разрыва пласта (ГРП) перед первичным запуском. Это обусловлено ухудшением геологических свойств разрабатываемых коллекторов (проницаемости, пористости и пр.) Данный тренд сохранится в будущем в связи с ожидаемым развитием разработки трудноизвлекаемых запасов — ТРИЗ, залегающих в слабопроницаемых коллекторах (проницаемость <50,7 мДа) Баженовской, Ачимовской, Туронской, Куонамской свиты и других, и повышением доли ТРИЗ в общем объеме разработки углеводородного сырья (УВС) до 70 % [1]. Изменения минерально-сырьевой базы определяют изменения дизайна работ ГРП: повышение расхода и максимального давления закачки, возможное повышение количества химических реагентов. Это, в свою очередь, определяет перспективные требования к оборудованию флота ГРП.

В данный момент в России насчитывается 135 комплексов (флотов) ГРП, работающих в 15 нефтесервисных компаниях. Рынок услуг ГРП в России оценивается в 70 млрд руб./год. Рост объема рынка ГРП в денежном выражении: средний годовой прирост за последние 5 лет составляет 10 % год к году, обусловлен ростом количества операций (стадий) ГРП — 15 % год к году за тот же период (в том числе операций многостадийного ГРП до 30 % от общего количества в 2019 г.) [4]. В то же время отмечается опережающий прирост количества флотов ГРП на рынке РФ — в среднем 18 % за последние 5 лет. Эта ситуация приводит к снижению реальной среднегодовой загрузки флотов ГРП: количество стадий на флот в год снизилось на 5 % за последние 3 года, высокой конкуренции в борьбе за объем работ, приводящей к снижению средней цены за стадию с 7–10 млн руб. до 5–8 млн руб. (в зависимости от объема закачки). Высокая конкуренция, ценовые войны, ежегодное появление новых мощностей при постоянной оптимизации проектных параметров работ приводят к значительному снижению маржинальности данного вида сервисных услуг. Нефтесервисные компании, оказывающие услуги ГРП, вынуждены принимать беспрецедентные меры для снижения операционных и капитальных затрат с целью удержания рыночной доли. Это приводит к отсутствию инвестиций в НИОКР, высокому износу и устареванию основных средств. На текущий момент средний возраст основного оборудования флотов ГРП (насосные установки, смесители) в России — 15 лет. Сохранение данной тенденции может привести к неготовности нефтесер-

висных компаний ГРП к повышению требований производства работ, в связи с ухудшением свойств минерально-сырьевой базы и переходу к разработке нетрадиционных залежей.

Ожидаемое увеличение доли ТРИЗ в разрабатываемых запасах УВС (до 80 % к 2035 г.) потребует строительства большого количества горизонтальных скважин (до 75 % к 2035 г.). Сложность конструкции скважин повысится (увеличение отхода от вертикали с 1000 м сейчас до 2500 м в 2035 г.), также увеличится количество стадий ГРП соответственно (с 5–7 сейчас до 15–18 в 2035 г.).

При расчете перспективной потребности во флотах ГРП кроме описанных выше факторов, влияющих на рост потребности в комплексах ГРП, необходимо учитывать следующие: прогнозный вывод из эксплуатации устаревающего оборудования в размере 5 % от общего количества флотов ГРП в год и рост эффективности флотов ГРП — повышение количества стадий гидроразрыва, выполняемых одним флотом ГРП на 50 % от текущего уровня к 2026 г. Данный тренд обусловлен применением новых технологий, повышением эффективности планирования и уровня компетенций. В результате расчета определено, что до 2030 г. потребность в дополнительных флотах ГРП составит от 3–5 единиц в год, а общий парк флотов ГРП вырастет до 180 единиц.

Необходимо отметить наличие действующих международных торговых ограничений, определяющих практическую невозможность использования оборудования, химреагентов и программного обеспечения (ПО) ГРП, произведенного в США или ЕС для оказания услуг на большинстве залежей ТРИЗ (Баженовская, Доманиковская, Хадумская и пр.). В перспективе активного освоения нетрадиционных залежей данные ограничения повлияют на 50–60 % рынка услуг ГРП. Создание отечественного флота ГРП, обладающего расширенным диапазоном технических характеристик, отвечающих российским условиям эксплуатации и свободное от торговых ограничений США и ЕС, становится приоритетом для нефтегазового машиностроения.

#### **Технологии ГРП. Международный опыт**

Технологии ГРП можно разделить на категории: технологии связанные с методикой закачки специализированным оборудованием, связанные с применением специализированных химических реагентов. В каждой из категорий применяется уникальный алгоритмический аппарат, преобразованный в модули специализированного программного обеспечения.

Остановимся на перспективных технологиях, применение которых получит наибольшее распространение в мире, исходя из грядущих изменений минерально-сырьевой базы УВС, которые определяют облик оборудования комплекса ГРП.

#### **Стимуляция горизонтальных скважин с применением компоновок многостадийного ГРП**

Наиболее востребованными технологиями в России на текущий момент остаются технологии

многостадийной стимуляции горизонтальных скважин при помощи специальных компоновок. Данные технологии можно разделить на несколько направлений: технологии активации муфты ГРП при помощи шара, технологии разрывных муфт, активируемых гидравлически, технологии активации муфт МГРП при помощи ГНКТ. Среди них технологии с шарами и разрывными муфтами стали наиболее применяемыми. Суть технологии с шарами сводится к установке в конструкции обсадной колонны специальной муфты, которая в процессе спуска в скважину остается закрытой. Активация конкретной муфты производится сбросом в скважину шара соответствующего диаметра. По достижению шаром муфты происходит его посадка в предварительно установленное седло, повышение давления в скважине за счет нагнетания в нее жидкости активирует муфту, муфта сдвигается, образуя доступ к пласту. Второй распространенной технологией стала технология разрывных муфт. Суть технологии в установке в компоновку обсадной колонны муфт с предварительно подготовленными и закрытыми отверстиями. Активация этих отверстий происходит при помощи спуска в скважину специального инструмента — чашечного пакера. Внутри пакера нагнетается давление через специальный фрак порт и блокирующие отверстия мембраны лопаются, тем самым образуя связь скважина-пласт. Впоследствии через фрак порт чашечного пакера в скважину производится закачка геля с пропантом.

#### **Кластерная закачка ГРП**

Кластерная закачка пропантного ГРП позволяет сформировать устойчивые каналы между пропантными кластерами в трещине, достигая при этом неограниченной проводимости трещины для пластового флюида. Достижимые дебиты после кластерной закачки на 15–40 % выше, чем при обычном ГРП. При этом достигается существенная экономия закачиваемого пропанта в пласт — 30–50 %. Особо необходимо отметить снижение риска преждевременного «стопа» (преждевременной остановки закачки ГРП в связи с ростом давления закачки до максимального рабочего уровня) практически до нуля. Область применения данной технологии включает консолидированные пласты со следующими характеристиками: модуль Юнга выше  $1,7 \times 10^7$  кПа, напряжение закрытия до 90 МПа. Основной технической особенностью реализации данной технологии является специально сконструированный приемник пропанта смесительной установки, оборудованный скоростными шиберными затворами с временем отклика до 0,5 сек., воронка подачи волокон и наличие программно-аппаратного комплекса для реализации интервальной закачки в автоматическом режиме.

#### **Закачка многостадийного ГРП с динамическим отклонением**

Данная технология позволяет контролируемо перекрывать зону с созданной трещиной ГРП, путем частичной закупорки перфорационных зон пачкой

смеси из растворяемых частиц различного размера и волокон, смешанных в определенной концентрации [8]. Частицы большего размера проходят через перфорационные отверстия, но останавливаются в районе инициации трещины ГРП. Частицы меньшего размера закачиваются для понижения проницаемости сформированной пачки. Растворяемые волокна призваны обеспечить целостность закачиваемой пачки и эффективность отклонения потока жидкостно-пропантной смеси. Технология ограничивается температурным интервалом для эффективного растворения отклоняющей пачки, в зависимости от используемого материала от 60 до 170 °С. Расположение горизонтального участка скважины должно быть в поперечном направлении распространения пластового стресса. Данная технология позволяет повысить продуктивность скважин на 10–20 % по сравнению с традиционным методом ГРП, за счет более полного покрытия перфорированного интервала скважины, а также снизить время цикла ввода скважины в эксплуатацию (закачивания) после бурения на 40 % за счет исключения части операций механической межинтервальной изоляции (установке разделяющих пробок) [8]. Для реализации данной технологии необходимо выделить линию подачи изолирующей пачки, оборудованную насосом высокого давления и смесителем сухих материалов.

#### ***ГРП с применением гибких насосно-компрессорных труб (ГНКТ)***

Комбинированное применение технологий ГРП и установок гибких насосно-компрессорных труб (ГНКТ) является одним из значительных трендов при интенсификации скважин. Установки ГНКТ в цикле закачивания скважин используются для промывки скважин от оставшегося в стволе пропанта, вызова притока скважинного флюида и эффективной очистке трещины от жидкости ГРП. Доставки инструмента для операций с муфтами ГРП в стволе скважины, установке и удалении разделяющих пробок при проведении многостадийного ГРП (МГРП), применение ГНКТ в качестве гидродескоструйного перфоратора с дальнейшим проведением МГРП по затрубному пространству — лишь некоторые примеры применения ГНКТ в цикле операций ГРП. Формирование единого программно-аппаратного комплекса проектирования и управление работами ГРП и ГНКТ позволит эффективнее контролировать операционные риски.

Большинство исследований последних лет в части технологий ГРП в России были сфокусированы на разработках и внедрении новых внутрискважинных компоновок многостадийного ГРП и связанные с этим изменения в части процедур проведения операций ГРП [5]. В настоящее время открываются новые перспективы в связи с качественным изменением технологии ГРП в целом, таким как применение в жидкостях новых полимеров, новых систем, не содержащих полимеров и не загрязняющих пласт, применением легких и сверх легких пропантов. Особое

внимание нужно обратить на развитие научной базы и реализацию практических экспериментов, нацеленных на изучение конкретных технологий: свойства жидкости, способность транспортировать пропант, оседание пропанта, проводимость и остаточная проводимость пропантной пачки. Моделирование и экспериментальное подтверждение свойств по трению жидкостей, т.к. трение является основным элементом энергетических потерь передачи энергии от поверхности к забою и является ограничением к применению устьевого оборудования.

Тренды развития технологий ГРП отвечают на текущие геологические и экономические вызовы. Главным драйвером является сдерживание удельных затрат на сервис ГРП, при увеличении энергоемкости и технологичности оборудования за счет комплексного применения новых технологий с прогнозируемым ростом индекса продуктивности на 200–300 %. Перспективы развития технологий с геологической точки зрения будут базироваться на дальнейшем ухудшении свойств коллекторов, уплотнении сетки бурения скважин, увеличении радиуса дренирования скважин.

#### **Основные технологические тренды, определяющие требования к флоту ГРП**

Развитие технологий с учетом роста объемов ТРИЗ в общем портфеле диктует основные пути изменений всего процесса в целом как единого механизма, который можно представить в виде основных блоков:

1. Оптимизация процессов бурения для возможности привлечения одного флота сразу для стимулирования нескольких скважин.
2. Техническая модернизация основного оборудования ГРП.
3. Подбор, оптимизация систем жидкостей ГРП, специализированных химических добавок.
4. Оптимизация и/или создание с нуля логистических решений обеспечения рабочей площадки ГРП материалами, технической водой, химией, пропантом, топливом.
5. Создание устьевого арматуры, линий высокого давления, запорной арматуры, устройств автоматического сброса шаров и т.д.
6. Разработка отечественного программно-аппаратного комплекса для моделирования и управления процессом ГРП.

Введение в рентабельную эксплуатацию запасов категории ТРИЗ требует нового осмысления не только в вопросах эффективного размещения траекторий стволов скважин с учетом последующих технологий стимуляции, но и грамотного планирования кустовых площадок. Предусмотрительный подход может позволить одновременно задействовать флот ГРП для стимуляции сразу нескольких или всех скважин кустовой площадки. Это позволит сократить временные затраты за счет исключения непроизводительного времени на демобилизацию, улучшить процесс логистики материалов, химии ГРП, технологической воды. Конструкция скважин, применение соответствующих эксплуа-

тационных колонн должны обеспечивать требования к реализации технологических решений с учетом возможностей флота ГРП.

Очевидно, что сам флот ГРП должен быть способен работать в самых разных условиях, но требования к работе с ТРИЗ определяют тенденцию способности всего комплекса обеспечить работу с давлениями закачки до 1300 атм при общем расходе закачки до 40 м<sup>3</sup>/мин [10]. Основные направления технологического развития оборудования ГРП будут состоять в повышении энергоэффективности и увеличении мощности насосных установок; как следствие, снижение занимаемой площади флота ГРП является основным вызовом для производителей оборудования ГРП в данное время. Модульность флота, сокращение времени на монтаж и подготовку к закачке — еще один вызов, остающийся не решенным в данное время.

Сложное оборудование требует четкой системы управления. Становятся объективными требования к объединению систем АСУ ТП сопутствующих сервисов, находящихся во время проведения ГРП на скважинной площадке (оборудование испытания скважин, ГНКТ, азотное оборудование и пр.). Управление скважинными операциями должно проводиться из единого командного центра — станции управления. Такое требование становится ключевым для большеобъемных МГРП с закачкой 200–400 т на стадию при условии 10 и более стадий. Система мониторинга управления и контроля должна обеспечивать неограниченное число подключаемых единиц специальной техники, при этом все регистрируемые параметры должны иметь возможность выведения на графические мониторы. Аппаратные решения должны обеспечивать не только фиксацию параметров, но и иметь возможность дистанционного управления оборудованием. Станция мониторинга должна быть сконструирована с учетом требований к числу операторов, следящих за производственным процессом, возможности передачи данных по спутниковому каналу в «Центр инженерного сопровождения ГРП», прототипы которого могут быть созданы в каждой нефтедобывающей компании.

Технологии жидкости, применяемые в процессах ГРП, должны быть оптимизированы для работы в условиях больших расходов, больших сдвиговых нагрузок. Свойства таких систем должны быть направлены на снижение энергетических потерь на трение, влияние таких жидкостей на низкопроницаемые коллектора должно сопровождаться минимальным загрязнением эффективной проницаемости, а фильтрационная корка должна быть минимальной или полностью разрушаться в пластовых условиях со временем. Одной из задач технологичности применения является толерантность таких систем к источникам воды разной минерализации. Исходные компоненты требуют локализации производства в России. Для достижения приемлемых цен и недопущения монополии следует развивать конкуренцию в среде разработчиков химической продукции, а также привле-

чать иностранных производителей, не связанных с ограничительными секционными действиями ЕС и США.

Амбициозные задачи по достижению высоких скоростей проведения процесса ГРП, минимизация ненормативного времени будут напрямую зависеть от слаженной, отработанной системы снабжения и подачи воды, пропанта, химических реагентов, топлива на площадку флота ГРП. Одним из решений могут стать стационарные емкости большого объема открытого типа, системы рециркуляции, очистки и нагрева воды, работающие в режиме реального времени. Для условий зимнего периода нужно рассматривать такое оборудование, которое способно обеспечить подачу «в поток». Строительство точечных или комплексных водоводов возможно станет одним из самых эффективных решений всего проекта и сократит большую часть НПВ, а также значительно снизит затраты. В случае, если рецептура жидкости ГРП позволяет — можно и нужно использовать воду ППД. Обеспечение флота ГРП пропантом для большеобъемных работ ГРП — важнейшая задача непрерывности процесса. Комплексы автоматической подачи и загрузки приемных бункеров посредством транспортных лент и пневмозагрузки должны рассматриваться в приоритетном порядке относительно систем «классической» загрузки, при которой весь пропант в полном объеме загружается до начала каждой операции.

Большие расходы жидкости ГРП напрямую диктуют требования к устьевому оборудованию и линиям высокого давления. Проектирование, разработка и изготовление устьевых элементов оборудования, способных выдержать высокое давление, станет еще одним вызовом для промышленности. Комплексные манифольды большого диаметра, предназначенные для быстрого монтажа линий нагнетания большой длины, устьевое оборудование для МГРП, способное удаленно с пульта управления или в автоматическом режиме производить открытие-закрытие скважины, включение/переключение линий высокого давления, сбросовых аварийных линий, сброс шаров компоновок МГРП, требуют тщательной проработки и использования самых лучших инженерных решений, а также высокопрочных сталей российского производства. Такое оборудование должно быть с высоким коэффициентом запаса прочности, иметь мобильное исполнение, включать в себя элементы контрольно-измерительных приборов: давление, температура, плотность проходящего потока с возможностью определения концентрации механических частиц.

Кроме оборудования ГРП одной из составляющих успешности работ является инженерное моделирование гидроразрыва с учетом сложного процесса, объединяющего деформацию пласта и роста трещины, течение жидкости по трещине и ее фильтрацию в пласт, а также перенос пропанта и кислоты. Доступность импортного программного обеспечения для процессов гидроразрыва в России сопряжено с ря-

дом санкционных ограничений. Однако российским компаниям удалось в кратчайшие сроки разработать и внедрить в производство собственные разработки ПО [7]. Отечественные продвинутые промышленные симуляторы используют модель «Planag-3D», оптимальную с точки зрения точности основных процессов моделирования и скорости расчета. Рассматривая подход инженерного проектирования, также следует уделять внимание важным расчетам, включающим в себя:

- геомеханическое моделирование пластов с построением 1D модели и более сложных 3D моделей;

- геологическое и гидродинамическое моделирование с учетом сценариев классических трещин ГРП, МГРП, а также развития неравномерной сетки технологических трещин по простиранию;

- элементы NODAL-analysis (пласт-скважина-устье).

Неотъемлемым элементом должна стать регулярная верификация всех выполненных расчетов, моделей, дизайнов, по факту выполненных работ ГРП, в том числе по фактическим данным объемов добываемой продукции.

В зависимости от изученности региона и качества имеющихся в наличии данных, этап подготовки программы работ занимает от нескольких часов до нескольких дней работы высококвалифицированного в данной области инженера или целой команды инженеров. При этом сохраняются риски ошибочности произведенных расчетов. Около 70 % непроизводительного времени (аварии, ликвидации аварий) и ассоциированных затрат связано с некачественной подготовкой программ работ.

Ведется работа по созданию автоматизированных программных продуктов с функционалом машинного обучения и интеграции с геологическими базами данных операторов нефтегазовых месторождений. Предиктивная аналитика и алгоритмы искусственного интеллекта позволят уточнить гидравлические модели жидкостных систем, модели расчета геометрии, распространения трещины и предвосхитить осложнения в процессе проведения ГРП.

Рост объема закачек на одну стадию в среднем до 100 тыс. т пропанта (максимальный объем закачки на одну стадию в России — 860 т), увеличение стадийности горизонтальных скважин до 30 в одной скважине определяет необходимость привлечения большего количества оборудования ГРП на кустовой площадке — 50 единиц различной специализированной техники. Управление таким комплексом оборудования требует единовременного нахождения до 40 человек при проведении работы. Помимо рисков, связанных с техническими отказами оборудования, синхронизации работы установок и соблюдения расписания закачки, приоритетными становятся задачи по исключению рисков, связанных с человеческим фактором. При расследовании нештатных и аварийных ситуаций определено, что корневыми причинами 70 % инцидентов являются факторы, напрямую

или косвенно связанные с деятельностью бригады, к таковым относятся: несоответствие уровня компетенции выполняемой работы, согласованность действий при выполнении одновременных работ, уровень усталости и соблюдение санитарных норм отдыха. Это определяет тренд на полную автоматизацию процессов, минимизацию количества персонала, вовлеченного в принятие решений и управление процессом. Выделение команды обеспечения процессом как дополнительного звена участников процесса, не принимающем в нем прямого участия, но обеспечивающим его непрерывность. При этом повышение требований к компетенциям специалистов, расширение зон контроля в процессе работ в области электроники, гидравлики, механики становится крайне важным и является залогом снижения вероятности аварийных ситуаций.

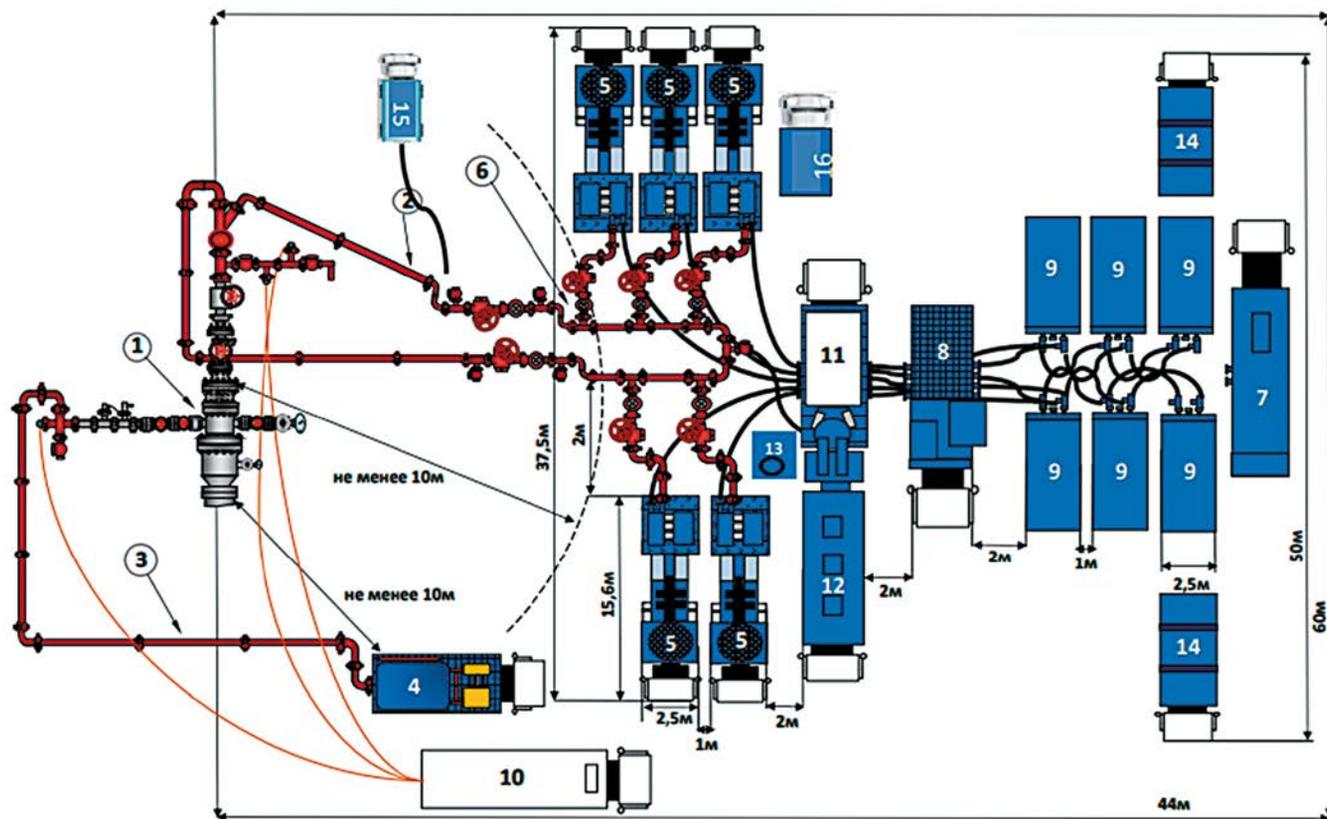
## Часть 2

### Требования к развитию технологий ГРП в России

История применения технологии гидравлического разрыва пласта в России ведется с 1950-х годов, однако широкое применение данная технология обрела в конце 1990-х годов [3]. Это обусловлено несколькими факторами: ухудшение свойств пластов (снижение проницаемости), переход к более агрессивной стратегии разработки минерально-сырьевой базы с повышением целевых показателей коэффициента извлечения нефти (КИН) до 40–50 %, снижение горного давления в течение времени эксплуатации традиционных месторождений, появление на рынке флотов ГРП иностранного производства, способных обеспечивать конкурентный уровень стоимости нефтесервисных услуг данного вида.

Географическое распространение флотов ГРП в России покрывает все нефтегазоносные провинции. Для районов Крайнего Севера и приравненных к ним регионам (70 % работ ГРП) определяющим требованием является наличие зимнего исполнения оборудования: наличие предподогревателей двигателей, термоизоляции гидравлических систем и блоков электроники.

Немаловажным фактором является необходимость передвижения флота ГРП по дорогам общего назначения. Например, в Волго-Уральском регионе каждая мобилизация проходит по общественным дорогам. В период паводка ограничения по нагрузке на ось составляют не более 8 т [6]. При этом габаритные ограничения составляют следующие значения: высота не более 4 м от линии дорожного полотна, ширина не более 2,55 м, длина не более 20 м. При превышении какого-либо из указанных параметров необходимо оформлять разрешение дорожной инспекции. Данный процесс занимает от 1 до 3 месяцев в зависимости от состава флота и частоты перемещений по дорогам общего пользования, стоимость разрешений может достигать до 10 млн руб. в месяц. Соблюдение требований массо-габаритных характеристик является одним из основных при проектировании установок отечественного флота ГРП.



**Рекомендуемая схема расстановки флота ГРП на кустовой площадке:** 1 — скважина; 2 — линия высокого давления; 3 — линия поддержания затрубного давления; 4 — установка насосная для кислотной обработки скважин; 5 — насосная установка; 6 — блок манифольдов; 7 — установка нагрева воды; 8 — гидратационная установка; 9 — технологические емкости; 10 — станция контроля и управления; 11 — смесительная установка; 12 — песковоз; 13 — бункер для пропанта; 14 — тягач; 15 — вакуумная машина

Удаленность ряда месторождений, отсутствие дорог, а в некоторых случаях даже зимнего использования ставит задачу проектирования и создания установок флота ГРП контейнерного типа для обеспечения мобилизацией вертолетом. При этом максимальный вес одной установки не должен превышать 20 т [6].

Рассмотрим перспективные технические требования к флоту ГРП в целом.

Флот ГРП (флот) — это комплекс технологического оборудования с единой системой управления технологическим процессом. Состав флота ГРП можно разделить на основное и вспомогательное оборудование. Основной состав: установка смесительная, установка насосная, установка гидратационная, установка подачи химических добавок, установка (комплекс единиц техники) подачи и транспортировки пропанта, станция контроля и управления, установка (комплекс единиц техники) манифольдов высокого давления. Вспомогательное оборудование: установка (система технических решений) для разогрева воды, установка (система технических решений) по доставке воды на кустовую площадку, установка (система технических решений) по доставке пропанта на кустовую площадку.

Флот ГРП должен соответствовать следующим общим характеристикам:

- работа со всеми видами технологий пропантно-го ГРП с жидкостями на водной основе, кислотного ГРП, ГРП с энергетическими жидкостями на основе  $N_2$  и  $CO_2$ ;
- максимальное рабочее давление закачки жидкости: 65 или 105 МПа (опция — не менее 125 МПа);
- минимальный расход жидкости не более:  $1,0 \text{ м}^3/\text{мин}$ ;
- расход смеси на выходе блендера не менее:  $1-10 \text{ м}^3/\text{мин}$  (опционально  $18 \text{ м}^3/\text{мин}$ );
- концентрация пропанта при указанных выше расходах и погрешностью замера  $\pm 5\%$ : от  $50-1500 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;
- климатическое исполнение с возможностью проведения закачки при температуре окружающей среды от  $+40^\circ$  до  $-40^\circ$  (опция от  $+60^\circ \text{ C}$  до  $-45^\circ \text{ C}$ );
- основные виды силовых установок на основе дизельных двигателей внутреннего сгорания. Опционально может быть рассмотрен электропривод силовых установок с системой обеспечения электричеством;
- единая (совместимая) автоматическая система контроля и управления всем оборудованием с цифровой записью всех характеристик работы оборудования, рабочего процесса, с возможностью передачи данных по каналу спутниковой связи. Работа системы в автоматическом режиме по заданной программе, а также в ручном режиме;

- степень локализации производства не менее 80 %;
- гарантийный срок эксплуатации не менее 3 лет.

Гарантия на отказ крупных узлов и агрегатов не менее 5 лет.

Все установки основного оборудования флота должны соответствовать следующим максимальным массогабаритным характеристикам:

- максимальная масса одной установки: не более 40 т;
- максимальная нагрузка на ось: не более 8 т (рекомендация: до 5,9 т);
- ширина: не более 2,5 м;
- высота: не более 4,0 м;
- длина: не более 20,0 м;
- дорожный просвет: не менее 40 см.

Ввиду того, что техника предназначена для работы в экстремальных условиях, ряд систем будет характерен для всех единиц специальной техники:

- система мониторинга ГЛОНАС с расширенным функционалом контроля работы оборудования, контроля за топливом. Система должна сопровождаться программой удаленного web-мониторинга;
- система видеофиксации работы всего флота ГРП (с возможностью расширения записи по каждой единице техники) с возможностью локальной записи данных видеокамер с объемом не менее чем 15 суток;
- система мониторинга вибраций;
- системы контроля давления, расхода, температуры рабочих жидкостей;
- передпусковой обогреватель двигателей внутреннего сгорания;
- тахограф;
- электронная (цифровая) дистанционная система мониторинга и управления оборудованием, подключаемая к единому пульту (компьютеру) управления.

Необходимо отметить требования, относящиеся к отдельным элементам флота ГРП.

В смесительной установке необходимо предусмотреть возможность создания песко-жидкостной смеси подачей пропанта в миксер как свободно со шнеков, так и через систему скоростных шибберных задвижек для возможности создания импульсной подачи пропанта. Максимальная производительность подачи пропанта до 12000 кг/мин. В зависимости от планируемого объема работ должна быть возможна замена шнеков на больший/меньший типоразмер. Смеситель может быть представлен в двух вариантах: как импеллерного типа для варианта с установкой системы импульсной подачи пропанта объемом до 1,0 м<sup>3</sup>, так и смесительная емкость с перемешивателем объемом 1,5–2,0 м<sup>3</sup>. Из системы контрольно-измерительных приборов необходимо отметить требования к точности измерения плотности потока и концентрации пропанта. Данные должны предоставляться в режиме реального времени, с интервалом усреднения не более 5 сек., с погрешностью до 20 кг/м<sup>3</sup>.

Перспективная насосная установка высокого давления должна обладать следующими основными ха-

рактеристиками: максимальная входная мощность — 1838 кВт (2500 л.с.), расход от 1 до 5,5 м<sup>3</sup> в минуту при плотности смеси на выходе установки не менее 1500 кг/м<sup>3</sup>. Насосная установка должна быть оборудована следующими системами: автоматической аварийной остановкой, аварийного сброса максимального давления (механическая), системой компенсации импульсов давления на входе в плунжерный насос. Гидравлическая часть насоса высокого давления должна иметь возможность замены типоразмера плунжеров.

В связи с ростом объема закачек пропанта на одну стадию и увеличении доли МГРП в общем объеме работ по интенсификации притока, необходимо пересмотреть процессы перевалки и подачи пропанта для закачки. В качестве перспективной системы подачи пропанта предлагается рассмотреть комплекс оборудования, способного производить загрузку основного подающего бункера посредством пневмолиний и/или транспортных лент. Основной подающий бункер находится на некотором расстоянии от блендера и оборудован двумя отсеками не менее чем по 25 т каждый, общая масса не менее 50 т (возможно рассмотреть вариант до 100 т.) Выгрузка из бункера осуществляется самотоком из нижней части путем открывания автоматических высокоскоростных шибберных задвижек. Бункер должен быть оборудован измерителем веса, подключенным к электронной (цифровой) дистанционной системе мониторинга и управления оборудованием. Подача в блендер осуществляется по металлическим рукавам или по транспортной ленте. Загрузка пропанта в бункер осуществляется посредством пневмолиний (расход не менее 25 т/мин) от загрузочного бункера. Загрузка пропанта в загрузочный бункер осуществляется механически краном из пропантных мешков. Может быть несколько загрузочных бункеров, превышающих объем подающего бункера в 2–3 раза. Необходимо предусмотреть возможность затарки бункера как перед работой, так и во время работы.

Отдельно следует проработать вопрос перспективной системы снабжения технической водой флота ГРП [9]. Технология, сложившаяся на текущий момент, предполагает наличие большого емкостного парка, который выстраивается вдоль обвалования кустовой площадки и заполняется заранее. Это несет ряд отрицательных факторов, таких как необходимость организации подъездных путей, длительный завоз большого объема воды может привести к ее порче, остывание воды в зимний период, необходимости применения бицидов для подавления жизнедеятельности микроорганизмов. Одним из решений может стать система снабжения водой из открытых источников, находящихся на определенном удалении от кустовой площадки или использование технических жидкостей систем поддержания пластового давления (ППД). Оба варианта требуют детальной проработки как на техническом уровне, так и с точки зрения экономики.

При организации системы водоснабжения из открытых источников одним из вариантов может быть

рассмотрена установка ограниченного числа емкостей в зоне флота ГРП, рядом с гидратационной установкой. В этом случае основной парк емкостей может находиться в удалении, где работа по затарке и нагреву будет происходить более удобно; после нагрева горячая жидкость может подаваться в основные емкости. Также можно рассмотреть вариант постройки больших бассейнов (в летний период) в удаленной части кустовой площадки с системой подачи воды в основные емкости. Постройка трубопроводов от ближайших источников водоснабжения может стать более быстрым способом доставки воды в случае применения современных гибких пластиковых трубопроводов, сама труба может быть намотана на барабан. Системы быстрого монтажа помогут избежать существенных затрат на постройку трубопровода и ускорить процесс монтажа и подачи воды.

Альтернативным решением может стать забор воды из системы ППД. Вода ППД имеет ряд преимуществ относительно открытых источников: воды всегда достаточное количество, она «условно» бесплатна, вода ППД теплая и не требует нагрева, не наносится вред окружающей среде. Вопрос к качеству воды должен решаться на уровне применяемой технологии и используемых химических добавок. Если такая вода по своим характеристикам подходит — возможно организовать отбор и подготовку.

Отечественный флот должен соответствовать требованиям Постановления Правительства РФ №719 от 17 июля 2015 г. Конструкция оборудования и ее узлы должна обеспечивать безопасные условия труда при эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте с соблюдением «Правил безопасности в нефтяной и газовой промышленности», утвержденным приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 101 от 12.03.2013.

Образ перспективного флота ГРП определяется требованиями технологий, которые будут использоваться в России на горизонте до 2035 г., географическими и климатическими условиями применения. Технологии закачки, в свою очередь, определяются геологическими условиями разрабатываемых пластов ТРИЗ. На рисунке представлена схема расстановки комплекса оборудования перспективного флота ГРП на скважинной площадке.

С точки зрения условий применения флота ГРП оборудование и техника должны соответствовать нормам эксплуатации в районах Крайнего Севера, в то же время обладать необходимым уровнем проходимости для применения на отсыпных кустах и соответствовать требованиям ГИБДД России для перемещения по дорогам общего пользования (в том числе в период распутицы) без необходимости оформления дополнительных разрешений.

Технологии гидравлического разрыва коллекторов ТРИЗ в настоящее время имеют различную степень успешности, единого подхода для Баженовской, Доманиковой и других перспективных залежей нет.

Поэтому архитектурные решения перспективного флота ГРП должны позволять варьировать режимы закачки (расход по жидкостно-пропантной смеси до 18 м<sup>3</sup>/мин, давление закачки до 100 МПа) и быть ориентированы на максимально осложненные пластовые условия. Технологическая оснащенность флота: система подачи жидкости и пропанта, гидравлическая схема смесительной установки должны позволять вести как непрерывную, так и импульсную закачку пропанта. С учетом повышения комплексности работ, увеличения стадийности и объема закачки на одну стадию система мониторинга и АСУ ТП флота должна обеспечивать выполнение работ в полностью автоматическом режиме. Специализированное программное обеспечение — обладать функцией «советчика» по оптимизации режима закачки при возникновении отклонений от программы работ.

### **Заключение**

Энергетической стратегией Российской Федерации до 2035 г. определены задачи и ключевые меры развития эффективного обеспечения потребностей социально-экономического развития Российской Федерации соответствующими объемами производства и экспорта продукции и услуг отраслей ТЭК. В частности, для нефтяной отрасли потребуются поддержание добычи нефти и газового конденсата в период до 2024 г. в диапазоне 55–560 млн т, а в период до 2035 г. в диапазоне 490–555 млн т, для газовой отрасли поддержание добычи газа в период до 2024 г. в диапазоне 795–820 млрд м<sup>3</sup>, а в период до 2035 г. в диапазоне 860–1000 млрд м<sup>3</sup>. Одной из ключевых мер решения поставленных задач является введение в экономический оборот малых месторождений, малодобитных и высокообводненных скважин, ТРИЗ (в том числе баженовской свиты). Разработка ТРИЗ невозможна без применения современных технологий бурения, освоения и интенсификации притока из скважин, поэтому оборудование и технологии воздействия на пласт для повышения нефтеотдачи, включая технику и технологии гидроразрыва пласта, включены в перечень технологического оборудования, востребованного организациями ТЭК, создание или локализация которого необходимы на территории Российской Федерации.

Создание отечественного флота ГРП — комплексная задача, для решения которой необходимо удовлетворение ряда условий. Отечественный флот ГРП должен соответствовать требованиям постановления Правительства РФ № 719 от 17.07.2015 г., это определяет необходимость применения российских комплектующих и приборов, таких как: двигатели внутреннего сгорания, мощностью до 2500 л.с, соответствующих автоматических трансмиссий, гидравлических систем и компонентов, систем АСУ ТП (включая электронную компонентную базу) [2], специализированное программное обеспечение и прочее. По некоторым из указанных направлений технологический задел в российской промышленности отсутствует. Решение данной задачи невозможно без гармонизированного

развития смежных отраслей промышленности: металлургической, обрабатывающей, нефтехимической, радиоэлектронной. Предприятия оборонно-промышленного комплекса (ОПК) обладают широкими компетенциями проектирования и разработки наземных комплексов самоходного оборудования специализированного назначения, а также широкой технологической оснащенностью для производства таких комплексов. Необходимо в полной мере использовать потенциал предприятий ОПК, соответствующий решаемой задаче.

В случае отсутствия должного внимания к решению поставленных задач возрастает вероятность недостижения поставленных целевых показателей уровней добычи нефти, газа и газового конденсата, что окажет значительный негативный эффект на экономику России в целом. Отсутствие технологий для разработки ГРП значительно увеличивает технологическое отставание добывающей и смежных отраслей промышленности России от мирового уровня. Это, в свою очередь, повлечет значительное повышение зависимости от импорта техники и технологий, что вызовет повышение рисков непрерывности ведения операционной деятельности.

Необходимо отметить основные инициативы по созданию современной нормативно-правовой базы, для эффективной реализации проекта создания отечественного флота ГРП и адекватного развития смежных отраслей. Введение в правовое поле понятия взаимного признания испытаний и отраслевых методик испытания позволят значительно сократить сроки внедрения новой техники и технологий в ТЭК, а также производственные расходы разработчиков на сертификацию продукции. Применение механизма межотраслевой комиссии контроля качества и приемки продукции, разрабатываемой и создаваемой в рамках контрактов, субсидий, кредитов или иных мер государственной поддержки из федерального бюджета или иных источников государственного финансирования российскими организациями на финансовое обеспечение затрат (части затрат) на проведение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ в рамках реализации проектов по созданию высокотехнологичной, импортозамещающей продукции (производств продукции) для нужд ТЭК, позволит повысить эффективность реализации проекта, а также приведет к снижению технических и проектных рисков.

Оценивая эффект создания и внедрения отечественного флота ГРП в совокупности с предлагаемыми мерами стимулирования промышленности, а также применения новой нормативно-правовой базы, следует рассмотреть следующие показатели:

— В случае широкомасштабного внедрения флотов ГРП отечественного производства, соответствующих предлагаемым техническим требованиям, производительность труда в нефтесервисном секторе ТЭК повысится на 15–20 % за счет применения

технологий удаленного мониторинга и управления процессами подготовки и проведения работ ГРП, унификации оборудования, применения предиктивной аналитики для обслуживания оборудования по состоянию.

— Ожидается снижение стоимости владения флотом ГРП на 30 % за счет применения отечественных материалов, комплектующих, ведущее к исключению валютных рисков. Повышение надежности, снижение затрат на обслуживание флота, автоматизация технологических процессов окажут позитивное влияние на данный показатель. Повышение экономической эффективности операций ГРП позволит поддержать удельную стоимость добычи (lifting cost) на конкурентоспособном уровне в мире.

— Широкомасштабное внедрение отечественного флота ГРП для добычи углеводородного сырья, замещения устаревающего фонда импортного оборудования позволит снизить уровень зависимости от импорта в нефтесервисном секторе ТЭК до 10–15 % к 2035 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Жданев, О.В.* Перспективы технологий Индустрии 4.0 в ТЭК России / О.В. Жданев, В.С. Чубоксаров // Энергетическая политика. — 2020. — № 7. — С. 16–33. DOI: 10.46920/2409-5516\_2020\_7149\_16.
2. *Жданев, О.В.* К вопросу импортозамещения АСУ ТП в отраслях ТЭК / О.В. Жданев, П.П. Лукьянченко // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. — 2020. — № 2. — С. 5–9. DOI: 10.33285/1999-6942-2020-2(182)-5-9.
3. *Максимович, Г.К.* Гидравлический разрыв пласта / Г.К. Максимович // Нефтяное хозяйство. — 1954. — № 4. — С. 22–30.
4. *Многостадийный ГРП стал локомотивом для рынка гидроразрыва пласта в целом / ROGTEC.* — 2019. URL: <https://rogtec.com/gri-%D0%BC%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%B9%D0%BD%D1%8B%D0%B9-%D0%B3%D1%80%D0%BF-%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BB-%D0%BB%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BE%D0%BC/?lang=ru>.
5. *Оборудование для ГРП / МГРП: комплексный анализ рынка РФ, ключевые игроки, прогноз до 2030 года // RPI.* — 2019. — 65 с.
6. *Ограничения для большегрузов на дорогах России // Новостной портал DORinfo.* — 2020.
7. *Пестриков, А.В.* Валидация модели трещины гидроразрыва Planar3D, реализованной в корпоративном симуляторе «РН-ГРИД» / А.В. Пестриков, А.Б. Пещеренко, М.С. Гребельник, И.М. Ямилев // Нефтяное хозяйство. — 2018. — № 11. — С. 46–50. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-11-46-50.
8. *Юдин, А.* Кластерный ГРП в горизонтальных скважинах. Первое в России массовое применение новой технологии / А. Юдин, У. Мавлеткулов, Н. Чебыкин, А. Сердюк // Oil&Gas Journal Russia. — 2018. — № 4. — С. 48–53.
9. *Black, Bill.* Oilfield Review Multizone Fracturing. Groundwater Management. Triaxial Induction Resistivity // Bill Black, Mohamed Dowd, Rolf Herrmann, Didier Largeau, Robert Maliva, Bob Will / Oilfield Review. — 2008. — Vol. 20. — № 2. — P. 20–38.
10. *Kelvin, B Gregory.* Water Management Challenges Associated with the Production of Shale Gas by Hydraulic Fracturing / B. Gregory, Kelvin, D Vidic, Radisav, A. Dzombak David // Elements. — 2010. — № 7. — P. 181–186. DOI: 10.2113/gselements.7.3.181.

© Коллектив авторов, 2020

*Байдюков Константин Николаевич // KBaydyukov@rn-grp.ru*  
*Бравков Павел Владимирович // Bravkov@rosenergo.gov.ru*  
*Жданев Олег Валерьевич // Zhdanev@rosenergo.gov.ru*  
*Кононенко Владимир Алексеевич // VKononenko@rn-grp.ru*