

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2022.2.134-149>

EDN LMZVEW

УДК 622.276.66.001

Гидравлический разрыв пласта. Особенности и возможности типизации процессов

¹Кравченко А.Н., ¹Васильев В.В., ¹Салимов О.В., ²Самойлов М.И.

¹ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия

²ООО «РН-ЦЭПИТР», Тюмень, Россия

Hydraulic fracturing. Special aspects and potential of process type assignment

¹A.N. Kravchenko, ¹V.V. Vasilev, ¹O.V. Salimov, ²M.I. Samoilov

¹LLC «Tyumen Petroleum Research Center», Tyumen, Russia

²LLC «RN-TSEPITR», Tyumen, Russia

E-mail: ovsalimov@tnnc.rosneft.ru

Аннотация. Гидроразрыв пласта – сложный, энергоемкий и дорогостоящий технологический процесс. Поэтому для обеспечения его технологической и экономической эффективности необходимо проводить тщательное и всестороннее изучение объекта обработки и составление проекта. При этом проектированию ГРП отводится первостепенное значение в комплексе подготовительных работ [1].

Сегодня ГРП является ключевым методом интенсификации добычи нефти и повышения нефтеотдачи пластов как по количеству применения, так и по вкладу в общий объем дополнительно добываемой нефти. Применение технологии позволяет вовлечь в разработку ранее не дренируемые запасы, увеличить темпы отбора, повысить рентабельность добычи. Проектирование разработки месторождения с применением ГРП возможно производить с обустройством более редкой сетки скважин. Кроме этого, технология ГРП позволяет вести разработку месторождений с нетрадиционными коллекторами, на которых добыча нефти или газа без ГРП невозможна или малорентабельна.

Ключевые слова: типовое проектирование, типизация, унификация, геология, разработка, технология, гидравлический разрыв пласта

Для цитирования: Кравченко А.Н., Васильев В.В., Салимов О.В., Самойлов М.И. Гидравлический разрыв пласта. Особенности и возможности типизации процессов//Нефтяная провинция.-2022.-№2(30).-С.134-149. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2022.2.134-149>. - EDN LMZVEW

Abstract. Hydraulic fracturing is a complex, energy-intensive and expensive technological process. Therefore, to ensure its technological and economic efficiency, it is necessary to conduct a thorough and comprehensive study of the processing object and draw up a project. At the same time, hydraulic fracturing design is given paramount importance in the complex of preparatory work. [1]

Today, hydraulic fracturing is a key method for intensifying oil production and enhancing oil recovery, both in terms of the amount of application and the contribution to the total volume of additional oil produced. The application of the technology makes it possible to involve previously undrained reserves in the development, increase the rate of recovery, and increase the profitability of production. It is possible to design a field development using hydraulic fracturing with the arrangement of a sparser well pattern. In addition, hydraulic fracturing technology allows the development of fields with unconventional reservoirs, where oil or gas production without hydraulic fracturing is impossible or unprofitable.

Key words: *standard design, typification, unification, geology, development, technology, hydraulic fracturing*

For citation: A.N. Kravchenko, V.V. Vasilev, O.V. Salimov, M.I. Samoilov *Gidravlicheskiy razryv plasta. Osobennosti i vozmozhnosti tipizatsii processov [Hydraulic fracturing. Special aspects and potential of process type assignment]. Neftyanaya Provintsiya, No. 2(30), 2022. pp. 134-149. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2022.2.134-149>. EDN LMZVEW (in Russian)*

Введение

Гидроразрыв пласта – сложный, энергоемкий и дорогостоящий технологический процесс. Поэтому для обеспечения его технологической и экономической эффективности необходимо проводить тщательное и всестороннее изучение объекта обработки и составление проекта. При этом проектированию ГРП отводится первостепенное значение в комплексе подготовительных работ. [1]

Сегодня ГРП является ключевым методом интенсификации добычи нефти и повышения нефтеотдачи пластов как по количеству применения, так и по вкладу в общий объем дополнительно добываемой нефти. Применение технологии позволяет вовлечь в разработку ранее не дренируемые запасы, увеличить темпы отбора, повысить рентабельность добычи. Проектирование разработки месторождения с применением ГРП возможно производить с обустройством более редкой сетки скважин. Кроме этого, технология ГРП позволяет вести разработку месторождений с нетрадици-

онными коллекторами, на которых добыча нефти или газа без ГРП невозможна или малорентабельна.

В целом, при планировании ГРП в основном решается три комплекса задач:

- прогноз дебитов, которые могут быть получены при создании трещин различной длины и/или проводимости для данного пласта;
- расчет технологических параметров гидроразрыва, обеспечивающих образование трещин требуемой длины и проводимости;
- определение экономической эффективности проведения ГРП. [1]

По данным компании RPI Research&Consulting, в 2018 году в нефтегазовой отрасли России впервые с 2014 года объем ввода эксплуатационных скважин не вырос по сравнению с предыдущим годом, а, наоборот, сократился более, чем на 3 %. В то же время показатель ввода более технологически сложных горизонтальных скважин увеличился почти на 21 % – с 2974 скважин в 2017 до 3587 скважин в 2018.

За тот же период объем ввода наклонно-направленных скважин снизился почти на 14 % – с 5955 скважин в 2017 году до 5104 скважин в 2018.

Рынок ГРП развивался похожим образом – количество операций одностадийного ГРП в 2018 году снизилось на 7,5 % по сравнению с предыдущим годом, в то время, как число операций многостадийного ГРП (МГРП) увеличилось на 41 %.

Тенденция вытеснения технологий с низкой эффективностью более дорогими, но при этом более эффективными, может стать долговременной на российском рынке.

Суммарное количество операций одностадийного ГРП (на новых скважинах и переходящем фонде) в 2018 году снизилось на 7,4 % по сравнению с 2017 годом – до 12738 (Рис. 1) [2].

Подобную тенденцию подтверждает и динамичный рост потребления пропантов в нефтегазодобывающей промышленности. Начиная

с 2001 года объем потребления пропантов в России увеличивался ежегодно, за исключением 2009 года, когда спрос на данную продукцию сократился вследствие кризисных явлений в экономике.

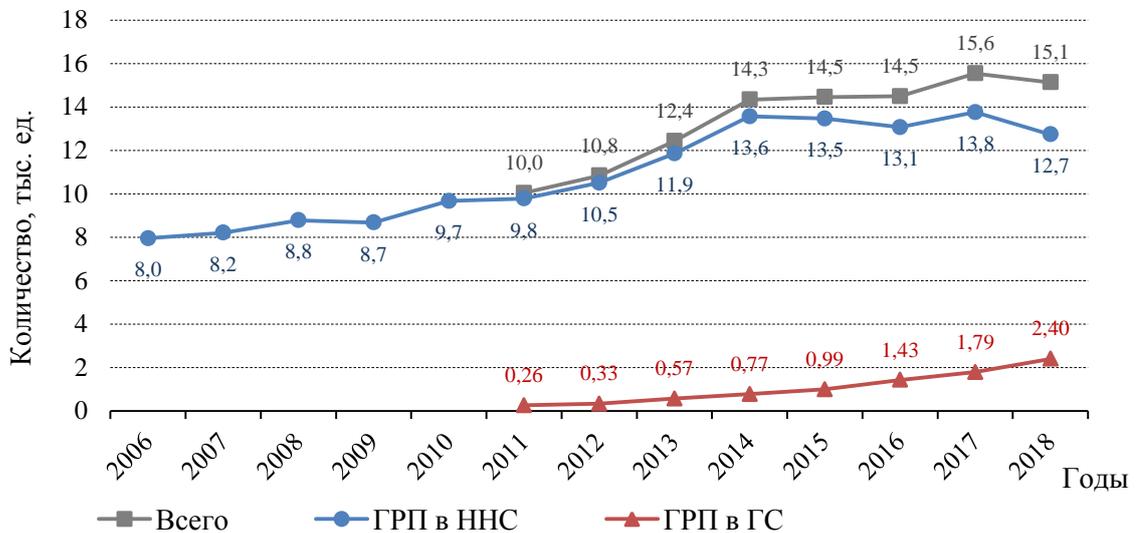


Рис. 1. Динамика изменения количества скважино-операций ГРП

Ежегодные темпы роста потребления пропантов в период 2001-2005 годов в среднем превышали 50 %, в период с 2014 по 2018 гг. объем потребления данной продукции увеличивался на 11-25 % в год.

По итогам 2018 года «видимое» потребление пропантов в России составило 1,51 млн т (Рис. 2) [2].

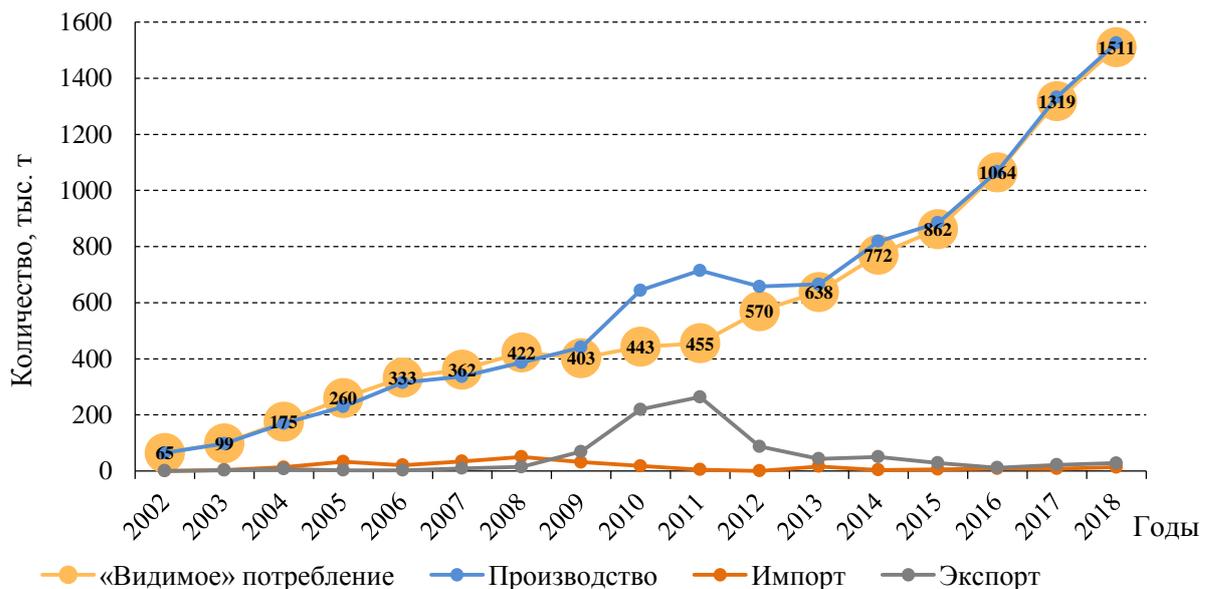


Рис. 2. Динамика производства, экспорта, импорта и потребления пропантов в РФ в 2002-2018 гг.

Известно, что на эффективность операций ГРП влияет множество факторов: геолого-физические характеристики пласта, состояние разработки, технологические параметры операций, качество используемых материалов и т.д.

Основными негативными факторами, снижающими эффективность применения ГРП на месторождении, являются:

- охват до 80 % фонда добывающих скважин (вариантов выбора остается все меньше);
- низкая энергетика пласта из-за недокомпенсации текущих отборов закачкой, особенно на участках с низкими коллекторскими свойствами и сложным строением коллекторов;
- прорыв трещин разрыва в водонасыщенные пропластки через мало-мощные глинисто-алевритовые барьеры;
- значительный охват заводнением длительно разрабатываемых залежей (получаем быстрый прорыв закачиваемой воды по трещине разрыва).

Факторы влияющие на успешность непосредственно самого процесса ГРП это:

1. Литологическая характеристика пласта, а именно тип коллектора, степень сцементированности зерен, степень трещиноватости и кавернозности, степень глинистости. Литологическая неоднородность, характеризующаяся коэффициентами песчанистости, расчлененности, анизотропии.
2. Фильтрационно-емкостные свойства пласта: пористость, проницаемость, гидро- и пьезопроводность, сжимаемой горной породы.
3. Упруго-прочностные свойства пласта: модуль Юнга, коэффициент Пуассона, градиент разрыва и т.д.
4. Наличие ограничивающих барьеров. Величина контраста напряжений между продуктивным пластом и ограничивающими барьерами.

5. Наличие газовой шапки и/или подошвенной воды.
6. Толщина продуктивного пласта.
7. Глубина залегания пласта, а точнее величина пластового давления.
8. Степень закольматированности призабойной зоны пласта.
9. Степень обводненности продукции скважин.
10. Технологические параметры ГРП: темп и давление закачки, объем закачиваемой жидкости, концентрация закрепляющего материала, объем продавочной жидкости.
11. Параметры материалов используемых при ГРП: вязкость жидкость разрыва и качество закрепляющего материала (пропанта в случае пропантного ГРП).

Подготовка и проведение ГРП это большой и сложный организационный и технологический бизнес-процесс, на результаты которого оказывают влияние как внутренние, так и внешние факторы: работа подрядчиков по КРС (подготовительно-заключительные работы), ГИС (уточнение геолого-технических характеристик, контроль технического состояния), ГРП (непосредственное проведение ГРП), работа внутренних подразделений добывающей компании (оперативное планирование и подбор геолого-технических мероприятий, супервайзинг технологического процесса ГРП) и т.д. Учесть абсолютно все факторы при планировании и проведении операции ГРП удается не всегда.

При рассмотрении гидравлического разрыва пласта как вида геолого-технических мероприятий легко убедиться, что данный бизнес-процесс состоит из следующих основных этапов – типовых процессов (Рис. 3):

1. Подбор скважин-кандидатов;
2. Оценка потенциала скважины после ГРП. Определение технологического режима работы и подбор ГНО;
3. Выбор и обоснование технологии ГРП;
4. Выбор и обоснование материалов (жидкость разрыва, пропант, кислота и т.п.);

5. Составление дизайн-проекта ГРП;
6. Непосредственно проведение самого процесса ГРП. Обеспечение качественного выполнения ГРП;
7. Освоение скважины, вывод на режим и запуск по фонду.



Рис. 3. Последовательность процессов при планировании и выполнении ГТМ (ГРП)

На этапе подбора скважин-кандидатов для ГРП важно достоверно оценить потенциал скважины и риски связанные с прорывом трещины ГРП в водонасыщенные интервалы. Для этого необходимо располагать достоверными источниками данных по геологическому и гидродинамическому состоянию разработки объекта намеченного под ГРП, а также по техническому состоянию самой скважины.

В области выбора и обоснования технологии ГРП необходима техническая информация по ранее проведенным ГРП на скважинах окружения. Количество и тип закачанного пропанта/кислоты. Давления и темпы закачки.

В области составления дизайн-проектов ГРП ключевую роль в корректности модели ГРП играет оценка упруго-прочностных параметров пластов, слагающих продуктивный разрез, реологических и транспортирующих свойств жидкости, параметров рабочего давления и оборудования, применяемого при выполнении ГРП. При построении 1D-геомеханической модели скважины разрез может быть построен как полностью от устья, так и только в зоне обрабатываемых коллекторов. Это приводит к необходимости решать нетипичные задачи, отсутствующие в обычной геофизической практике (интегрирование и экстраполяция кривых, коррекция аномалий, синтезирование кривых ГИС, их калибровка по сейсмическим данным, расчет упругих модулей пород). Кроме этого известно, что коэффициент продуктивности скважины после гидроразрыва напрямую зависит от геометрии созданной трещины. При этом важным является определение оптимальной геометрии, при которой будет получен максимальный коэффициент продуктивности. [1]

В области выбора и обоснования материалов используемых при ГРП важно установить системные требования к качеству и физико-химическим свойствам материалов, которые соответствовали бы особенностям их будущего применения. При этом одним из главных объектов процесса типизации на этой стадии является пропант, так как именно качество закрепляющего материала, является одним из основных факторов, определяющих эффективность проведенной операции ГРП в целом.

В области проведения и супервайзинга процесса ГРП необходимо четкое следование инструкциям, стандартам обеспечения контроля качества выполнения работ для проведения проверки и подтверждения безопасности применения тех или иных материалов (паспорт вещества от производителя, сертификат качества вещества, сертификат безопасности вещества и т.п.).

В области освоения и вывода скважины на режим важно обеспечить строгое выполнение технологических карт и технологий вывода на режим установок ГНО. В случае работы ШГН – обеспечить требуемую частоту качаний, в случае работы ЭЦН – недопущении перегрева ПЭД, кабельной линии и обеспечении отключения УЭЦН при содержании свободного газа на приеме насоса более 25% и т.п.

В этой связи важно по каждому отдельному этапу технологического процесса ГРП предложить возможные и/или наиболее эффективные унифицированные подходы и типовые решения, что позволит обеспечить тиражирование лучших практик в Компании.

Сущность типизации технологических процессов состоит в том, что на основе предварительного изучения и анализа частных особенностей, свойственных той или иной технологии, производится обобщение лучших достижений практического опыта, причем этим обобщениям придается характер технологических закономерностей, распространяемых затем на соответствующие классификационные группы.

Таким образом, осуществление типизации подразумевает необходимость классификации технологических процессов, которая обычно базируется на геолого-промысловых, технологических и административно-организационных условиях свойственных тому или иному нефтегазодобывающему обществу.

Методы типизации технических решений, как и иные подходы к классификации и стандартизации работ, имеют свои достоинства и недостатки. Для определённых задач они применимы более, для других – менее. Например, наиболее показательным и развитым примером в области с реализованным подходом типизации, являются правила промышленной и пожарной безопасности, охраны труда и окружающей среды. К развитой области типизации можно отнести и различные технологические инструкции по обеспечению и контролю качества при проведении различных видов ГТМ. Указанные инструкции определяют принципы качественного

безаварийного выполнения работ и содержат систематизированное описание стандартных процедур, форм отчётности, схемы взаимодействия и методов работ.

Перспективные области типизации в ГРП

Некоторые этапы подготовительных работ и инженерного сопровождения ГРП представляют собою механические рутинные операции, для которых могут быть применены алгоритмы унифицированных подходов.

В ПАО «НК «Роснефть» основным центром компетенций в области инженерного сопровождения ГРП является ООО «РН-ЦЭПиТР». Сотрудники ООО «РН-ЦЭПиТР» имеют 10-20-летний опыт инженерного сопровождения ГРП как в российских, так и в зарубежных компаниях. Многолетний опыт и накопленные знания в области ГРП позволяют ООО «РН-ЦЭПиТР» выделить основные зоны типизации технологических процессов ГРП. С точки зрения инжиниринга ГРП к ним относятся:

- подготовка стандартного набора входных данных для проектирования работ ГРП из различных источников информации;
- предварительная оценка продуктивности скважины в симуляторе ГРП.

Остановимся подробнее на последнем пункте. В современных симуляторах ГРП с планарными моделями трещин не предполагается построение секторных 3D гидродинамических или геомеханических моделей. Инженер ограничен аналитическими и полуаналитическими методами (корреляциями) в инструментах построения и настройки модели продуктивности скважины до и после выполнения ГРП.

Также в симуляторах ГРП не представлено отличия параметров трещин: закреплённых пропантом и/или продуктивных (эффективных). Например, эффективная (проводящая) полудлина трещины может составлять $2/3$ или менее от закреплённой пропантом полудлины трещины, что, к

сожалению, не может быть оценено или спрогнозировано на стадии проектирования в симуляторе ГРП. Результаты оценки продуктивности скважины в симуляторе ГРП могут быть использованы для сравнительного анализа (в терминах «больше» и «меньше» – при изменении параметров трещин), но не как источник достоверной оценки дебита скважины с ГРП. Следовательно, требуется четкое разделение сфер применимости и достоверности (т.е. типизация) различных способов оценки продуктивности скважин до и после ГРП. [3]

Общий вид типовой схемы подготовки и оптимизации дизайна ГРП приведен на рис. 4.

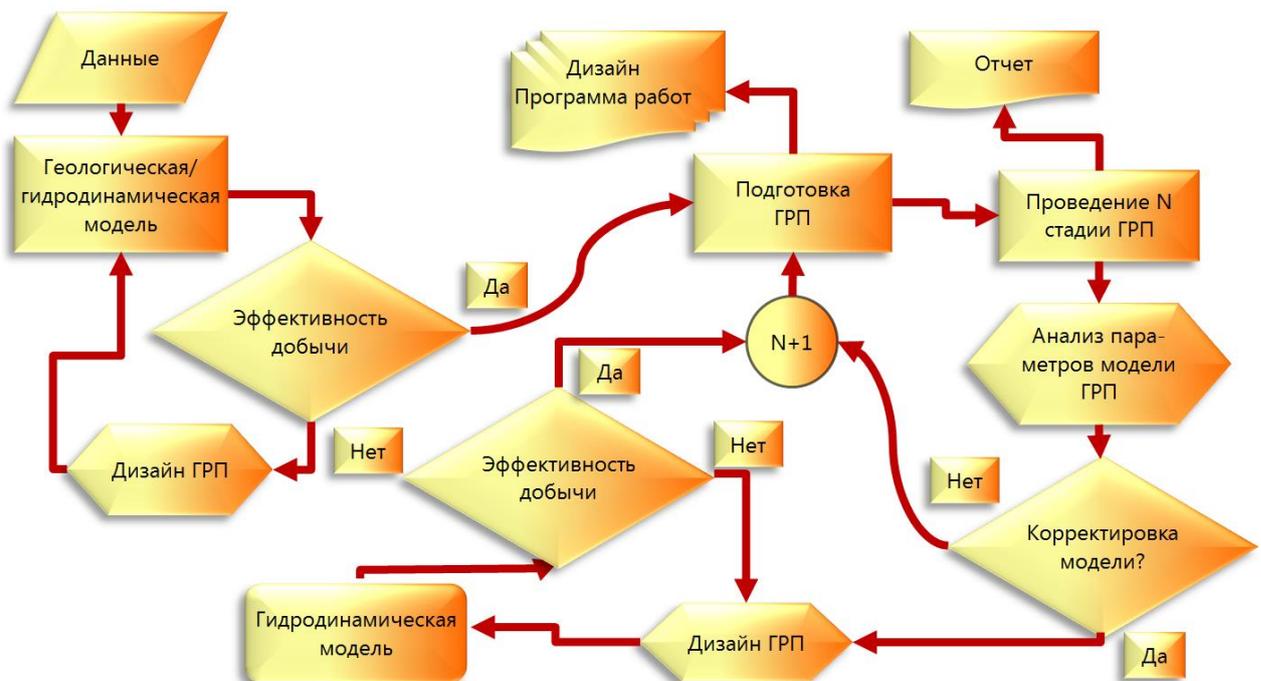


Рис. 4. Типовая схема подготовки и оптимизации дизайна ГРП

В общем случае, оценка продуктивности скважин с ГРП, как и подбор скважин-кандидатов ГРП, могут быть выполнены следующими способами:

- с помощью статистического анализа;
- методом аналогий и сравнением с работой соседних скважин;
- аналитическими и/или полуаналитическими методами.

По механизму реализации:

- с привлечением расчётных форм – для экспресс-анализа;
- в специализированном программном обеспечении (Perform и т.п.);
- с привлечением возможностей гидродинамических симуляторов (для секторного гидродинамического моделирования). Однако на начальном этапе данный подход кажется чрезмерно трудозатратным.

Аналогичным образом может быть типизирована оценка экономической эффективности выполнения работ: как на уровне проектов ГРП, так и на уровне отдельных работ ГТМ.

Механические рутинные операции могут быть подвергнуты стандартизации и типизации с составлением методических указаний, описанием лучших практик, что позволит ускорить работу сотрудников добывающих и сервисных компаний, позволит использовать наиболее эффективные решения.

Области нечёткой или частичной типизации ГРП

К данному разделу можно отнести вопросы применимости технологий ГРП в тех или иных геологических и технических условиях. Типизацию «применимости технологий» следует проводить в «крупноблочном формате» для удобства использования результата в практических целях. Следует придерживаться принципа «минимальной достаточности» по количеству выделяемых факторов и взаимосвязей.

Чрезмерная детализация при типизации может привести к негативным последствиям:

1. Количество устанавливаемых или предполагаемых взаимосвязей столь высоко, что результат невозможно представить в виде двумерной или трёхмерной «матрицы» (например, «матрицы технологий»). Попытка построения детальных многомерных матриц приведёт к потере наглядности и снижению практической значимости результата;

2. Построение фиксированной иерархической или матричной структуры «типизации технологий» без сомнения приведёт к чрезмерным формализации и упрощению понимания достоинств, недостатков и перспектив применения отдельных технологий. Механизмы упрощённого (тезисного) представления материала хороши для целей ознакомления или обучения на отдельных примерах, но недостаточны для принятия решений о применении технологий. Важную роль должно играть мнение квалифицированных технических специалистов, имеющих опыт применения той или технологии.

Следует учесть, что метод типизации эффективен далеко не для всех этапов работ. Не рекомендуется подвергать чрезмерной типизации виды работ, связанных с творческой составляющей инженерной работы.

Иллюзии полной «типизации работ» инженера ГРП неразрывно связаны с активным применением программного обеспечения. Однако неправильно рассматривать проектирование ГРП в узком смысле – только в виде моделирования гидроразрыва в симуляторе ГРП. По экспертной оценке, симулятор задействован в $\approx 15\%$ рабочего времени при всестороннем проектировании работ ГРП. Многие процессы, технические нюансы и факторы принципиально «неуловимы» или «неучитываемы» на уровне симулятора, но при этом кардинально влияют на успешность выполнения работ ГРП и должны учитываться инженером при составлении планов работ.

Решение инженерных задач неразрывно связано с:

- выбором технологий ГРП. В разных сервисных компаниях развиты различные технологии ГРП. Часто указанные технологии запатентованы и, как следствие, развиты в ограниченном количестве сервисных компаний. Одинаковые технологии представлены с особенностями технической реализации в разных компаниях;
- доступными возможностями в смежных сферах деятельности (заканчивание скважин, КРС, освоение, вывод скважин на режим и др.);

- организационной структуры, бизнес-процессов и потоков информации как внутри сервисной компании, так и в смежных областях деятельности;
- иными факторами.

Излишняя степень регуляции инженерной работы приводит к снижению качества инженерного сопровождения работ и эффективности выполнения ГТМ, в целом. Правильнее подвергать типизации структуру информационных потоков и сравнительно легко формализуемые этапы рутинных работ, но не творческое содержание инженерной работы. Кроме этого развитие унификации и типизации технологических процессов в обязательном порядке должно сопровождаться предварительным проведением научно-исследовательских (НИР), лабораторных и экспериментальных исследований.

Выводы

1. Механические рутинные операции могут быть подвергнуты стандартизации и типизации с составлением методических указаний, описанием лучших практик, что позволит ускорить работу сотрудников добывающих и сервисных компаний, позволит использовать наиболее эффективные решения.
2. Излишняя степень регуляции инженерной работы приводит к снижению качества инженерного сопровождения работ и эффективности выполнения ГТМ, в целом. Правильнее подвергать типизации структуру информационных потоков и сравнительно легко формализуемые этапы рутинных работ, но не творческое содержание инженерной работы.
3. Развитие унификации и типизации технологических процессов в обязательном порядке должно сопровождаться предварительным проведением научно-исследовательских (НИР), лабораторных и экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Прикладные задачи технологии гидравлического разрыва пластов / В.Г. Салимов, А.В. Насыбуллин, О.В. Салимов // Монография. – Казань. – Изд-во «ФЭН». – 2018. С. 340.
2. Обзор рынка пропантов в России, 6 издание: информационный отчет / ООО «ИГ «Инфомайн» // Москва – 2019.
3. Интегрированный подход к проектированию МГРП / В.Н. Астафьев, А.Г. Андреев, М.И. Самойлов // SPE-203896-RU

References

1. Salimov V.G., Nasybullin A.V., Salimov O.V. *Prikladnye zadachi tekhnologii gidravlicheskogo razryva plastov* [Applied tasks of hydraulic fracturing technology]. Monograph, Kazan: FAN Publ., 2018, 340 p. (in Russian)
2. *Obzor rynka propanotov v Rossii: informatsionnyi otchet* [Overview of proppant market in Russia, 6th edition: information report]. ООО IG Infomayn, Moscow, 2019. (in Russian)
3. Astaf'ev V.N., Andreev A.G., Samoylov M.I. *Integrirovannyy podkhod k proektirovaniyu MGRP* [Integrated Approach to Multistage Fracturing Design]. SPE-203896-RU (in Russian)

Сведения об авторах

Кравченко Александр Николаевич, заместитель главного инженера - начальник управления по развитию систем проектирования, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»

Россия, 625003, Тюмень, ул. Перекопская, 19

E-mail: ankравchenko-tnk@tnnc.rosneft.ru

Васильев Владимир Васильевич, кандидат технических наук, главный менеджер отдела типизации решений в ГиР, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»

Россия, 625003, Тюмень, ул. Перекопская, 19

E-mail: vvvasilev@tnnc.rosneft.ru

Салимов Олег Вячеславович, доктор технических наук, менеджер отдела типизации решений в ГиР, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»

Россия, 625003, Тюмень, ул. Перекопская, 19

E-mail: ovsalimov@tnnc.rosneft.ru

Самойлов Михаил Иванович, начальник управления гидравлического разрыва пласта, ООО «РН-Центр экспертной поддержки и технического развития» (ООО «РН-ЦЭПиТР»)

Россия, 625023, Тюмень, ул. Одесская, 7Б

E-mail: misamoilov@ceptr.rosneft.ru

Authors

A.N. Kravchenko, Deputy Chief Engineer - Head of Design Systems Development Administration, Tyumen Petroleum Research Center

42, Perekopskaya st., Tyumen, 625003, Russian Federation

E-mail: ankравchenko-tnk@tnnc.rosneft.ru

V.V. Vasilev, Ph.D., Chief Manager, Solutions Type Assignment Department, Tyumen Petroleum Research Center

42, Perekopskaya st., Tyumen, 625003, Russian Federation

E-mail: vvvasilev@tnnc.rosneft.ru

O.V. Salimov, Dr.Sc., Manager, Solutions Type Assignment Department, Tyumen Petroleum Research Center

42, Perekopskaya st., Tyumen, 625003, Russian Federation

E-mail: ovsalimov@tnnc.rosneft.ru

M.I. Samoilov, Head of Hydraulic Fracturing Department, Center for Expert Support and Technical Development (LLC «RN-TSEPITR»)

7b, Odesskaya st., Tyumen, 625023, Russian Federation

E-mail: misamoilov@ceptr.rosneft.ru

Статья поступила в редакцию 10.03.2022

Принята к публикации 18.06.2022

Опубликована 30.06.2022