

Корпоративный симулятор гидроразрыва пласта «РН-ГРИД»: от программной реализации к промышленному внедрению

Corporate fracturing simulator RN-GRID: from software development to in-field implementation

A.V. Akhtyamov¹, G.A. Makeev¹, K.N. Baydyukov²,
U.S. Muslimov², S.N. Matveev³, A.V. Pestrikov³, S.N. Rezaev³

¹RN-UfaNIPIneft LLC, RF, Ufa

²RN-GRP LLC, RF, Nizhnevartovsk

³Rosneft Oil Company, RF, Moscow

E-mail: a_pestrikov@rosneft.ru

Keywords: hydraulic fracturing, HF, fracturing design, fracturing simulation, minifrac, mathematical modeling, geomechanics, hydrodynamics, numerical methods, project management, software development, in-field implementation

Article is devoted to project management experience for the development and implementation of the corporate hydraulic fracturing simulator aimed at improving the efficiency of hydraulic fracturing technology and providing technological independence in the field of engineering software for the design of hydraulic fracturing. It is shown that the following solutions were used to develop a physically adequate model of the fracturing process: the application of the Planar3D-concept to describe the fracture geometry; fully-coupled fully-implicit solution for the elasticity and hydrodynamics; proppant transport solution for each of the pumped proppants, taking into account the rheological properties of the fracturing fluid, the gravitational settling / floating of the proppant, the proppant slowing / acceleration due to interaction with the fracture walls and between the proppant particles.

To keep the high pace of the project implementation, the following organizational solutions proved effective at the software development stage: quick release of the working beta version, the presence of the active pilot test group, bug and tasks tracking system, daily assembly of the new software version, regular distribution of the new software version to the pilot group testing, the constant ranking of planned and unplanned tasks, the start of user training at the beta stage, the constant benchmarking and increasing the productivity of the calculation core. It is noted that the choice of a solid calculation core without separation into program elements for individual physical processes allows to methodically and organizationally concentrate efforts to optimize the core and increase its productivity, which is critical for numerical grid simulation of the fracturing based on Planar3D-concept.

Для повышения эффективности проведения гидроразрыва пласта (ГРП) и обеспечения технологической независимости в области инженерного программного обеспечения (ПО) для проектирования ГРП в ПАО «НК «Роснефть» в рамках реализации программы инновационного развития разработан корпоративный симулятор ГРП «РН-ГРИД» [1]. Программный комплекс (ПК) «РН-ГРИД» версии 1.0 обеспечивает выполнение всех операций и инженерных расчетов, необходимых для проектирования проппантных ГРП: загрузку и визуализацию большого объема исходных данных, создание геомеханической модели пласта, анализ диагностических закачек, расчет дизайна и анализ проведенных ГРП, визуализацию результатов моделирования.

Математическая модель симулятора «РН-ГРИД» базируется на наиболее

А.А. Ахтямов¹,
Г.А. Макеев¹, К.Т.Н.,
К.Н. Байдюков²,
У.С. Муслимов²,
С.Н. Матвеев³,
А.В. Пестриков³,
С.Н. Резаев³

¹ООО «РН-УфаНИПинефть»

²ООО «РН-ГРП»

³ПАО «НК «Роснефть»

Адрес для связи: a_pestrikov@rosneft.ru

Ключевые слова: гидроразрыв пласта (ГРП), дизайн ГРП, симулятор ГРП, мини-ГРП, математическое моделирование, геомеханика, гидродинамика, численные методы, управление проектами, разработка программного обеспечения, промышленное внедрение

DOI: 10.24887/0028-2448-2018-5-94-97

адекватной для инженерного применения концепции Planar3D, позволяющей достоверно и с минимальными допущениями описывать сложную геометрию трещины ГРП. Это выгодно отличает «РН-ГРИД» от имеющихся на рынке аналогов, большинство которых использует существенно упрощенные подходы [1, 2].

Среди основных особенностей «РН-ГРИД» можно выделить:

– современную Planar3D модель геометрии трещины (рис. 1);

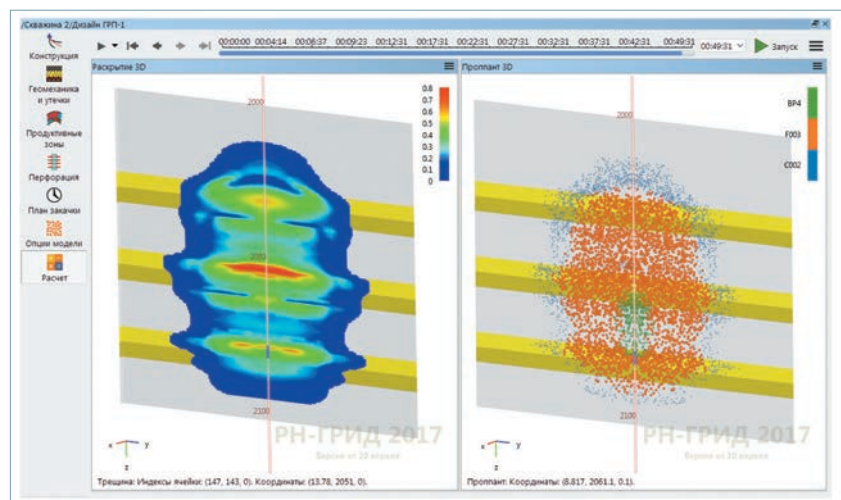


Рис. 1. Распределение раскрытия и положения закачанного проппанта при моделировании трещины ГРП сложной геометрии

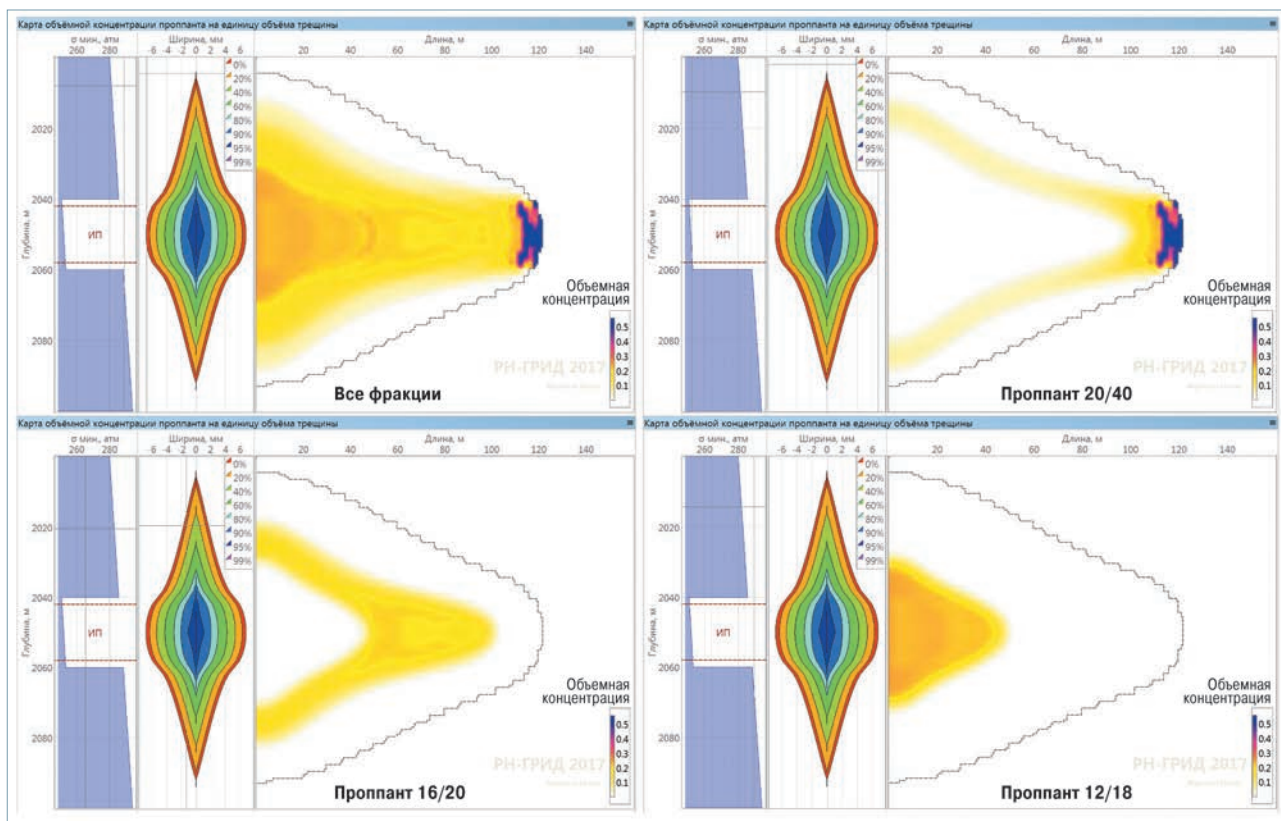


Рис. 2. Результаты моделирования в ПК «РН-ГРИД» переноса и распределения объемной концентрации проппанта различного фракционного состава при его закачке в скважину

- полностью сопряженное неявное решение задачи упругости и гидродинамики;
 - расчет переноса для каждого закачиваемого типа проппанта с учетом меняющихся во времени реологических свойств жидкости ГРП, гравитационного оседания/всплытия и торможения/застывания проппанта из-за взаимодействия со стенками трещины и между частицами (рис. 2);
 - гибкая подсистема 2D и 3D представления входных данных и результатов расчета (рис. 3).
- Математическая модель, инженерные методики и пользовательский интерфейс, составляющие базовый

функционал ПК «РН-ГРИД» версии 1.0, обеспечивают возможность проектирования 98 % всех операций ГРП, выполняемых на месторождениях ПАО «НК «Роснефть».

Основную роль в эффективности реализации проектов в области импортозамещения специализированного нефтегазового ПО играет организация процессов разработки и промышленного внедрения ПО. Далее более детально рассмотрен опыт создания и внедрения первого отечественного симулятора ГРП промышленного класса.

Организация разработки

С учетом сжатых сроков (1,5 года), выделенных на разработку ПК «РН-ГРИД» версии 1.0, с самого начала проекта было принято решение о применении высокоинтенсивного Agile-подобного подхода к разработке и внедрению ПО. В частности, были зафиксированы и использованы следующие принципы организации проекта, получившие условное название «Разработка через Внедрение».

1. Быстрый выпуск работающей бета-версии.
2. Формирование Группы пилотного тестирования.
3. Использование системы отслеживания обращений и статуса решения задач.
4. Ежедневная сборка новой версии ПО.

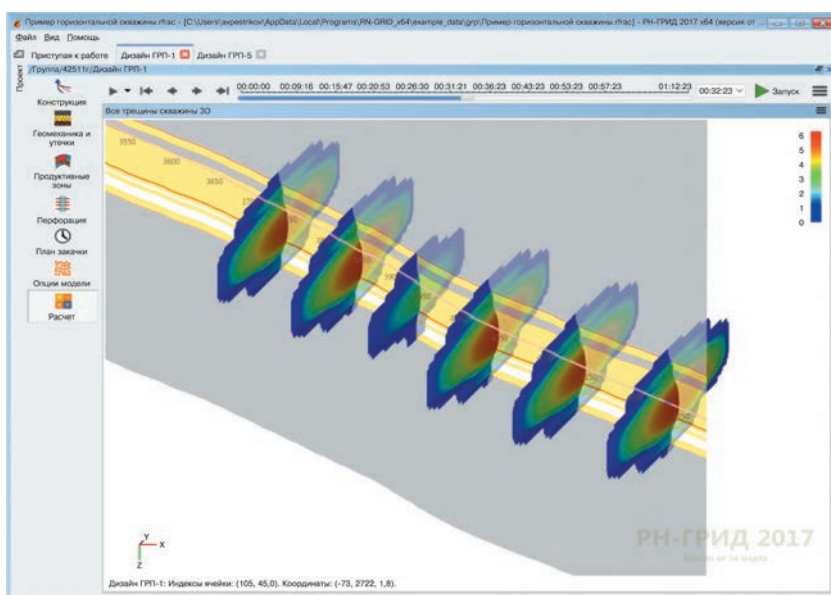


Рис. 3. Пример визуализации результатов моделирования в ПК «РН-ГРИД» многостадийного ГРП в горизонтальной скважине

5. Регулярная рассылка новой версии ПО Группе пилотного тестирования.

6. Постоянное ранжирование плановых и внеплановых задач.

7. Старт обучения пользователей на стадии бета-версий.

8. Постоянное измерение и повышение производительности расчетного ядра.

Первая полноценно работающая бета-версия ПК «РН-ГРИД» была выпущена через 2 мес после начала проекта. Несмотря на то, что она содержала только функционал анализа диагностических закачек, активная обратная связь Группы пилотного тестирования позволила сразу обеспечить высокий темп разработки и активировать взаимодействие с пользователями.

Группа пилотного тестирования была сформирована на инициативной основе из числа самых опытных специалистов по ГРП производственных и научно-исследовательских подразделений компании. Ее первоначальная численность составляла 10 человек, но уже к моменту релиза ПК «РН-ГРИД» версии 1.0 насчитывала более 100 человек, став основой целевой группы пользователей корпоративного симулятора ГРП. Немаловажным аспектом активного взаимодействия разработчиков ПО и Группы пилотного тестирования стала возможность оперативного учета актуальных требований и пожеланий производства к функционалу симулятора ГРП.

Внедрение системы отслеживания обращений пользователей и статуса решения задач позволило автоматизировать взаимодействие с Группой пилотного тестирования, повысить качество и своевременность внесения изменений в ПК «РН-ГРИД» по результатам постоянной обратной связи. Например, общее число полученных предложений и замечаний пользователей на стадии активной разработки ПК составило 6000 позиций, из них более 85 % были обработаны и нашли отражение в программном коде симулятора ГРП.

Реализация принципа ежедневной сборки новой версии ПО связана с дополнительными трудозатратами на процесс разработки ПО. Принцип является рискованным с точки зрения обеспечения стабильности выпускаемых версий ПО в условиях активной фазы наращивания функционала ПО. Однако данный принцип позволяет сформировать эффективную прикладную направленность усилий проектной команды по разработке ПО, повышает ритмичность процесса разработки и тестирования ПО, обеспечивает высокую скорость реагирования на критические запросы на изменение ПО. Для поддержания процесса постоянного тестирования в период активной разработки регулярно выполнялась рассылка новой версии ПО, более 40 новых версий ПК «РН-ГРИД» были направлены Группе пилотного тестирования.

Высокий темп разработки и необходимость учета обратной связи потребовали постоянного ранжирования плановых задач из технического задания на разработку ПО и внеплановых задач, связанных с результатами работы Группы пилотного тестирования. С самого начала проекта было установлено, что формализованное следование техническому заданию без учета результатов практического применения ПО является неэффективным подходом к разработке и внедрению в сжатые сроки импортозамещающих ИТ-решений.

Принцип «Старт обучения» пользователей навыкам работы в симуляторе ГРП до релиза промышленной версии ПК «РН-ГРИД» преследовал несколько целей. Во-первых, поддержание высокого темпа разработки ПО, активное вовлечение пользователей в тестирование математических и интерфейсных решений. Существенная доля от общего числа запросов на изменения ПО была получена именно в процессе тестирования ПО пользователями при обучении. Во-вторых, проведение обучения разработчиками ПО позволило обеспечить прямой диалог с будущими пользователями ПО, углубить понимание разработчиков предметной области в части ГРП и повысить прикладную направленность последующих решений. В-третьих, опыт применения пользователями ПК «РН-ГРИД» в процессе обучения снизил порог сложности последующего внедрения симулятора ГРП на практике.

С точки зрения программной архитектуры ПК «РН-ГРИД» выбрано решение с минимально необходимым разделением программы на отдельные модули: расчетное ядро и интерфейс. Это позволяет эффективно применять комплекс «РН-ГРИД» как для работы на ноутбуках специалистов по ГРП в полевых условиях, так и для перспективных вычислений с целью многовариантного моделирования ГРП в офисных условиях.

Выбор в пользу монолитного расчетного ядра без разделения на программные элементы по отдельным физическим процессам является более трудоемким решением с точки зрения дальнейшего развития физических подмоделей симулятора ГРП. Однако только такой подход позволяет методически и организационно сконцентрировать усилия для оптимизации расчетного ядра и повышения его производительности, что является критичным для численных сеточных симуляторов ГРП на базе Planar3D концепции. Выбор Planar3D для описания геометрии трещины ГРП (решение подзадачи упругости в 3D постановке методом граничных элементов, двухмерная гидродинамика в плоскости трещины), наличие уравнений переноса для каждого типа закачиваемого проппанта, реология неньютоновских жидкостей ГРП [1, 2] обуславливают высокую сложность решения задачи моделирования ГРП. В то же время промышленный симулятор ГРП должен выполнять типовые расчеты за время, приемлемое для оперативного принятия инженерных решений.

Для эффективной организации процесса разработки расчетного ядра было выполнено следующее:

- сформирован набор тестовых дизайнов ГРП с различным набором «вычислительно сложных» входных данных и вариантов развития трещины ГРП;

- определены целевые показатели скорости расчета для различных вариантов размера расчетной сетки с учетом требований практического применения симуляторов ГРП;
- внедрен регулярный всесторонний бенчмаркинг для последующей оптимизации и повышения скорости вычислений новых версий расчетного ядра.

Данные мероприятия позволили участникам проектной команды, ответственными за разработку расчетного ядра, получить четкие измеримые критерии и целевые ориентиры эффективности работы расчетного ядра. За период активной разработки ПК «РН-ГРИД» версии 1.0 исследовано более 80 модификаций расчетного ядра, скорость работы которого в результате оптимизации увеличилась более чем в 20 раз.

Организация внедрения

Пользователями ПК «РН-ГРИД» в ПАО «НК «Роснефть» являются специалисты добывающих предприятий, корпоративных научно-исследовательских и проектных институтов, центра экспертной поддержки в области ГРП, предприятий блока внутреннего сервиса. В рамках корпоративной системы внутреннего обучения была проведена серия обучающих семинаров по навыкам работы в данном ПК. Обучение прошло более 100 сотрудников компании.

Особое внимание уделялось внедрению корпоративного симулятора ГРП «РН-ГРИД» в дочернем нефтесервисном предприятии ООО «РН-ГРП», непосредственно занимающемся проведением ГРП на месторождениях добывающих обществ ПАО «НК «Роснефть». Для плавного перехода ООО «РН-ГРП» на корпоративный симулятор вместо зарубежного были реализованы следующие мероприятия:

- организовано обучение всего инженерного состава ООО «РН-ГРП» навыкам работы в ПК «РН-ГРИД»;

- проведена активная работа по использованию в этом ПК накопленного опыта и инженерных подходов ООО «РН-ГРП» по анализу тестовых закачек, потерь давления на трение, учету промысловых данных по влиянию проппанта на трение в трубах, построению геомеханической модели пласта на основе данных каротажей, расчету эрозии перфорационных отверстий, калибровке дизайна ГРП;

- организовано перекрестное дежурство участников проектной команды по разработке ПК «РН-ГРИД» в ООО «РН-ГРП» и специалистов ООО «РН-ГРП» в команде разработчиков на наиболее критичных этапах процесса внедрения комплекса.

В течение 4 мес был выполнен последовательный переход к проектированию в ПК «РН-ГРИД» всех операций ГРП по всем районам деятельности ООО «РН-ГРП». Первоочередное внедрение ПК «РН-ГРИД» на базе предприятия внутреннего сервиса позволило получить очень важную для последующей оптимизации и развития расчетного ядра информацию о времени расчета в ПК в режиме Planar3D при применении симулятора в производственных условиях.

Статистический анализ (рис. 4) данных по моделированию инженерами ООО «РН-ГРП» 625 вариантов дизайна операций ГРП (10668 запусков на расчет) в различных геолого-технических условиях за 1 мес наблюдения показал, что текущее среднее время расчета типового дизайна ГРП составляет 53 с (медиана – 35 с). По данному показателю ПК «РН-ГРИД» соответствует, а по ряду вариантов геоло-

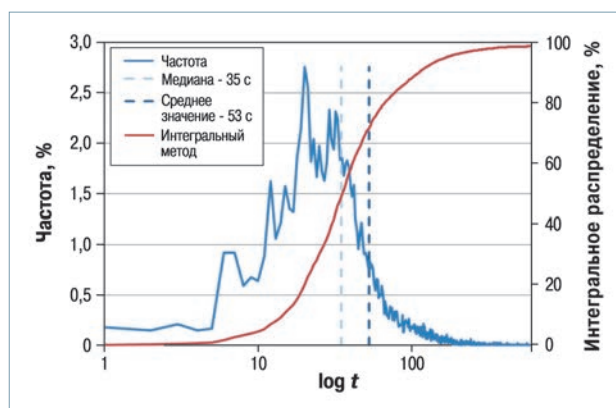


Рис. 4. Распределение запусков ПК «РН-ГРИД» по времени расчета t

го-технических условий проведения ГРП превосходит ближайший зарубежный аналог класса Planar3D. Несмотря на положительные результаты, целью дальнейшей работы по оптимизации расчетного ядра является достижение среднего времени расчета 30 с и менее. Применение ПК «РН-ГРИД» позволяет дочерним обществам компании обеспечивать постоянный контроль качества и высокий уровень требований к услугам по ГРП. В настоящее время общее число пользователей ПК «РН-ГРИД» превысило 150 человек. Кроме того, наличие корпоративного симулятора ГРП увеличило в 3 раза число специалистов, применяющих для решения производственных задач моделирование ГРП или анализ данных по проведенным ГРП.

С начала промышленного внедрения ПК «РН-ГРИД» выполнено более 1000 ГРП с полным циклом проектирования в корпоративном симуляторе ГРП «РН-ГРИД». Запланированы дальнейшие мероприятия с целью перехода на ПК «РН-ГРИД» по всем операциям ГРП.

Выводы

1. Механизм реализации инновационных проектов в ПАО «НК «Роснефть» одновременно с применением современных подходов к разработке и внедрению импортозамещающих ИТ-решений позволил в сжатые сроки разработать и внедрить первый отечественный симулятор ГРП промышленного класса «РН-ГРИД».

2. Успешное выполнение более 1000 ГРП с полным циклом проектирования мероприятия в ПК «РН-ГРИД», переход крупного нефтесервисного предприятия на 100%-ное применение этого ПК подтверждают возможность обеспечения технологической независимости отечественной нефтегазовой отрасли в области специализированного ПО.

Коллектив авторов благодарит специалистов в области ГРП из АО «РН-Няганьнефтегаз», АО «Роспан Интернешнл», АО «Самаранефтегаз», АО «Самотлорнефтегаз», ЗАО «Ижевский нефтяной научный центр», ОАО «Томскнефть» ВНК, ООО «Башнефть-Добыча», ООО «БашНИПИнефть», ООО «НК «Роснефть»-НТЦ, ООО «РН-ГРП», ООО «РН-Пурнефтегаз», ООО «РН-Уватнефтегаз», ООО «РН-УфаниПИнефть», ООО «РН-ЦЭПИТР», ООО «РН-Юганскнефтегаз», ООО «СамарНИПИнефть», ООО «Тюменский нефтяной научный центр», ПАО «Варьеганнефтегаз», ПАО «НК «Роснефть», ПАО АНК «Башнефть» за помощь и ценные замечания при тестировании и внедрении ПК «РН-ГРИД».

Список литературы

1. Корпоративный симулятор гидроразрыва пласта: от математической модели к программной реализации / А.В. Аксаков, О.С. Борщук, И.С. Желтова (и др.) // Нефтяное Хозяйство. – 2016. – № 11. – С. 35–40.
2. Computer simulation of hydraulic fractures / J. Adachi, E. Siebrits, A. Peirce, J. Desroches // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2007. – V. 44. – № 5. – P. 739–757.

References

1. Aksakov A.V., Borshchuk O.S., Zheltova I.S. et al., *Corporate fracturing simulator: from a mathematical model to the software development* (In Russ.), Neftyanoe Khozyaystvo = Oil Industry, 2016, no. 11, pp. 35–40.
2. Adachi J., Siebrits E., Peirce A., Desroches J., *Computer simulation of hydraulic fractures*, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007, V. 44, no. 5, pp. 739–757.