



# ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПРИ РАЗРАБОТКЕ ДИЗАЙНА/ РЕДИЗАЙНА МНОГОСТАДИЙНОГО ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ

© Коллектив авторов,  
2024



**В.А. Стародубов\***, **Р.К. Непоп**, **Н.Ю. Смирнов**

ООО «ПетроГМ», РФ, Новосибирск

**Электронный адрес:** [starodubov.va@petrogm.com](mailto:starodubov.va@petrogm.com)

В настоящее время одной из наиболее актуальных задач в нефтегазовой отрасли является эффективная добыча углеводородов (УВ) на месторождениях, обладающими низкими значениями фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС). Ключевыми технологиями при решении этой задачи становятся строительство горизонтальных скважин (ГС) и проведение гидравлического разрыва пласта (ГРП), в том числе и многостадийного (МГРП). Совместное использование технологий горизонтального бурения и МГРП является успешным решением с точки зрения чистого дисконтированного дохода в разработке как традиционных запасов, так и карбонатизированных коллекторов со сверхнизкой проницаемостью [1].

**Цель.** Разработка и апробация подхода, позволяющего реализовать единый алгоритм моделирования трещины ГРП, построение дизайна и редизайна, а также прогноз продуктивности трещины и обеспечение эффективного проведения МГРП еще на этапе планирования.

**Материалы и методы.** В основе предлагаемого подхода положено комплексное (геологическое, гидродинамическое, геомеханическое) моделирование, которое проводится с использованием всех доступных по скважинам месторождения данных, включая данные геофизических исследований скважин (ГИС), результаты керновых исследований, буровую информацию, данные по конструкциям скважин и т.д. Для калибровки упруго-прочностных характеристик горной породы используются результаты керновых исследований, а напряженно-деформированное состояние геологической среды — это результат 1D геомеханического моделирования с калибровкой на специальные исследования (стресс-тест, тест на приемистость), нагнетательные тесты, мини-ГРП и буровые события.

**Результаты.** Разработанный геомеханический подход опробован при добыче УВ из ачимовских отложений одного из месторождений Западной Сибири. Успешно проведены пяти-, шестистадийные МГРП на ГС. Высокая точность прогнозируемых параметров трещины обеспечила эффективное размещение пропанта в трещине ГРП и успешное проведение основной закачки.

**Заключение.** Построенные в рамках геомеханического подхода модели повышают эффективность ретроспективного анализа ГРП и являются незаменимым инструментом при геомеханическом сопровождении ГРП в реальном времени. Они имеют прогнозную силу и являются эффективным инструментом, который после обновления может использоваться как на последующих стадиях при проведении МГРП, так и на других скважинах месторождения.

**Ключевые слова:** гидроразрыв пласта, геомеханическое моделирование, горизонтальные скважины, геомеханический подход, алгоритм моделирования ГРП, прогнозная сила, ачимовская толща

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Стародубов В.А., Непоп Р.К., Смирнов Н.Ю. Геомеханический подход при разработке дизайна/редизайна многостадийного гидроразрыва пласта в горизонтальных скважинах. ПРО НЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2024;9(4):110–116. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-4-110-116>

*Статья поступила в редакцию 10.09.2024*

*Принята к публикации 04.10.2024*

*Опубликована 27.12.2024*

## GEOMECHANICAL APPROACH IN THE DEVELOPMENT OF DESIGN/REDESIGN OF MULTISTAGE HYDRAULIC FRACTURING IN HORIZONTAL WELLS

**Vladislav A. Starodubov\***, **Roman K. Nepop**, **Nikolay Y. Smirnov**

PetroGM LLC, RF, Novosibirsk

**E-mail:** [starodubov.va@petrogm.com](mailto:starodubov.va@petrogm.com)

Currently, one of the most pressing tasks in the oil and gas industry is the efficient production of hydrocarbons (HC) in fields with low values of filtration and capacitance properties (PPP). The key technologies in this approach include the construction of horizontal wells (HS) and hydraulic fracturing (HF), including multi-stage fracturing. The combined use of horizontal drilling and multi-stage hydraulic fracturing technologies is a successful solution in terms of net present value in the development of both conventional reserves and carbonated reservoirs with ultra-low permeability [1].

**Aim.** Main aim of this work was to develop and test an approach that makes it possible to implement a unified algorithm for modeling a hydraulic fracturing fracture, constructing a design and redesign, as well as predicting

the productivity of the fracture and ensuring the effective implementation of multi-stage hydraulic fracturing at the planning stage.

**Materials and methods.** The proposed approach is based on comprehensive (geological, hydrodynamic, geomechanical) modeling, which is carried out using all data available for wells in the field, including geophysical survey data (GIS), results of core studies, drilling information, well design data, etc. For calibration of the elastic-strength characteristics of the rock, the results of core research are used, and the stress-deformed state of the geological environment is the result of 1D geomechanical modeling with calibration for special studies (stress test, injectivity test), injection tests and mini-fracturing, as well as drilling events.

**Results.** The developed geomechanical approach was tested during the extraction of hydrocarbons from the Achimov deposits of one of the fields in Western Siberia. Five- and six-stage multi-stage hydraulic fracturing on horizontal wells was successfully carried out. The high accuracy of the predicted fracture parameters ensured the effective placement of the proppant in the fracture and the successful conduct of the main injection.

**Conclusion.** Models built within the framework of the geomechanical approach increase the efficiency of retrospective analysis of hydraulic fracturing and are an indispensable tool for geomechanical support of hydraulic fracturing in real time. They have predictive power and are an effective tool that, after updating, can be used both at subsequent stages during multi-stage hydraulic fracturing and at other wells in the field.

**Keywords:** hydraulic fracturing, geomechanical modeling, horizontal wells, geomechanical approach, hydraulic fracturing modeling algorithm, predictive force, Achimov formation

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Starodubov V.A., Nepop R.K., Smirnov N.Y. Geomechanical approach in the development of design/redesign of multistage hydraulic fracturing in horizontal wells. PRONEFT. Professionally about oil. 2024;9(4):110–116. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-4-110-116>

*Manuscript received 10.09.2024*

*Accepted 04.10.2024*

*Published 27.12.2024*

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях истощения традиционных залежей углеводородов и длительной эксплуатации месторождений все более пристальное внимание в нефтегазовой отрасли уделяется работе с трудноизвлекаемыми запасами. Ключевыми технологиями их разработки являются строительство горизонтальных скважин (ГС) и проведение гидравлического разрыва пласта (ГРП), в том числе и многостадийного (МГРП), что позволяет существенно увеличить зону дренирования пласта, приобщив к выработке слабо дренируемые зоны и пропластки, вследствие чего дебит скважин повышается до экономически рентабельного уровня. Несмотря на то что технология ГРП применяется с 1950-х годов, на сегодняшний день не существует универсальной физико-математической модели, позволяющей описать все процессы при ГРП: инициация и рост трещины, массоперенос смеси рабочей жидкости и частиц пропанта в канале трещины [1]. Важным инструментом при реализации этих технологий становится комплексное (геологическое, гидродинамическое, геомеханическое) моделирование [2]. Прогнозная сила и, соответственно, эффективность дальнейшего применения этого инструмента, во многом определяется последовательным использованием в процессе моделирования: 1) свойств материала (горной породы); 2) параметров среды (поровое давление и НДС горного массива); 3) технологических параметров закачек в контексте планируемых

целей ГРП; и, наконец, 4) моделирование самого ГРП в одном из симуляторов, выбор которого также осуществляется с учетом заложенных в специализированное программное обеспечение моделей (Pseudo3D, Planar3D и другие). Отметим, что первые две характеристики являются физическими свойствами пласта, которые необходимо определять и прогнозировать с высокой точностью и которые не могут произвольным образом корректироваться при разработке дизайна или редизайне МГРП (рис. 1). Помимо свойств пласта также существует ряд технологических параметров, оказывающих значительное влияние на развитие трещины ГРП, ее геометрию и, как следствие, на конечную добычу УВ.

**ПРЕДЛОЖЕН ПОДХОД, ПОЗВОЛЯЮЩИЙ НА ЭТАПЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ГРП РЕАЛИЗОВАТЬ ЕДИНЫЙ АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕЩИН, С ПОСТРОЕНИЕМ ДИЗАЙНА И РЕДИЗАЙНА, С ПРОГНОЗОМ ПРОДУКТИВНОСТИ ТРЕЩИН И ЭФФЕКТИВНОГО ПРОВЕДЕНИЯ МГРП.**

Таким образом, геомеханический подход к дизайну/редизайну МГРП базируется на четком разделении входных параметров по логически понятным группам и их последовательном использовании при комплексном моделировании. В рамках этого подхода накладываются жесткие ограничения на возможность корректировки базовых параметров среды при настройке модели ГРП

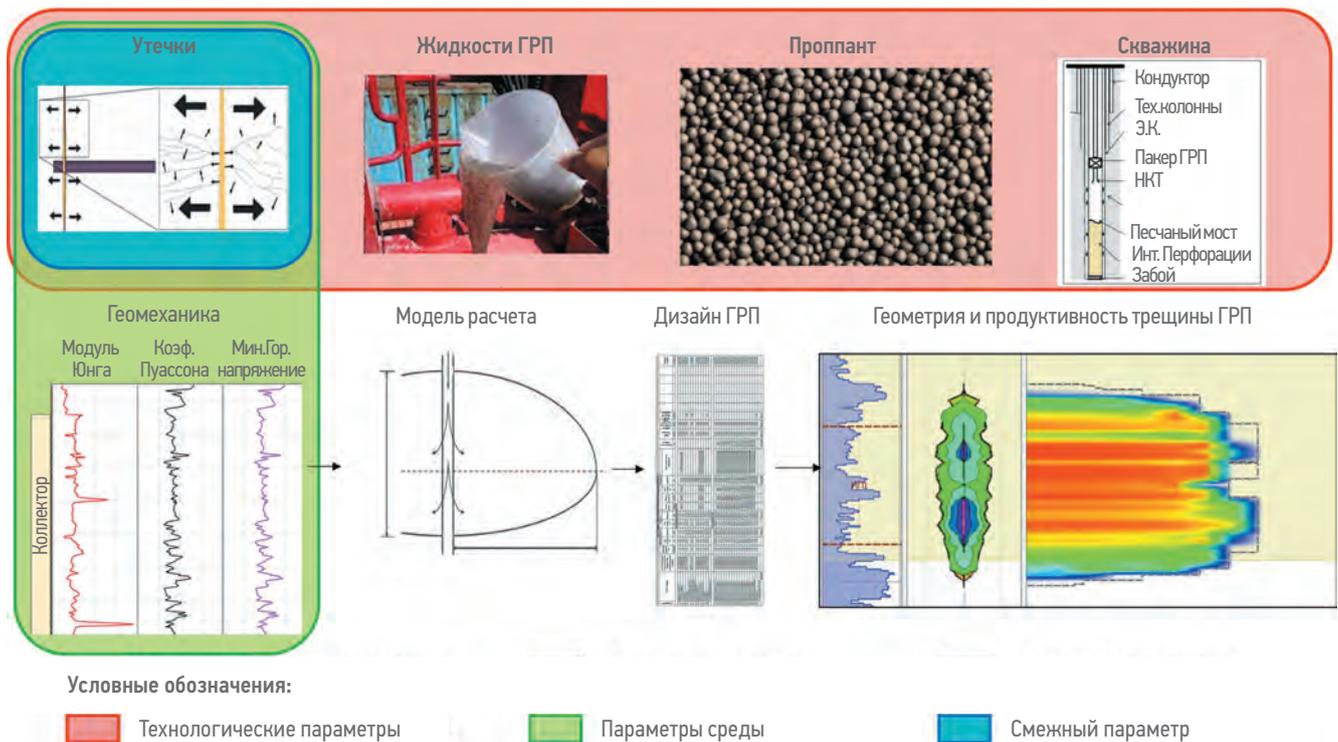


Рис. 1. Блок-схема параметров, необходимых для моделирования геометрии и продуктивности трещины ГРП. Составлено авторами  
 Fig. 1. Flowchart of parameters required to model hydraulic fracture geometry and productivity. Compiled by the authors

на более высоких иерархических уровнях, когда допускается варьирование только технологических параметров. В своих предыдущих работах [3] мы уже продемонстрировали эффективность применения геомеханического подхода при разработке дизайна/редизайне ГРП для вертикальных и S-образных скважин. В данной статье мы приводим результаты его дальнейшей модификации и адаптации для применения на горизонтальных скважинах. Предлагаемый подход опробован при проведении МГРП в ачимовских отложениях, вскрытых ГС на месторождениях Западной Сибири.

### ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ ДИЗАЙНА/РЕДИЗАЙНУ МГРП

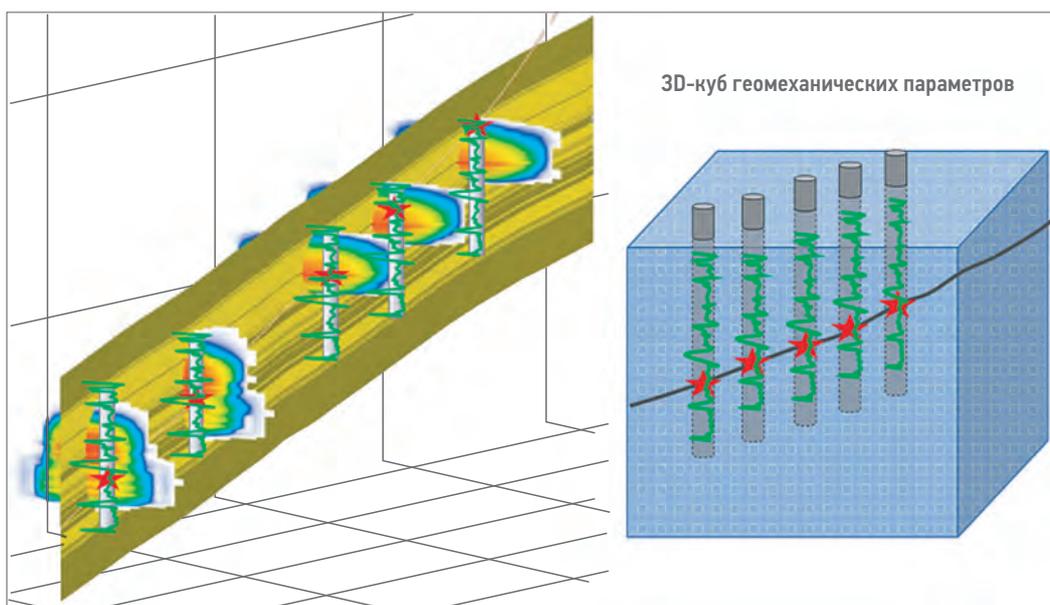
Если опустить предварительные исследования по обоснованию и выбору скважин, на которых будет проводиться ГРП / МГРП, то общий процесс моделирования распространения трещины будет включать в себя три основных этапа:

- 1) подготовка предварительного дизайна;
- 2) редизайн с калибровкой на результаты тестовых закачек;
- 3) фактический дизайн по результатам проведения основной закачки ГРП.

На первом, подготовительном этапе разработки предварительного дизайна ключевым моментом является сбор и анализ всей доступной информации по скважине, вскрываемому разрезу и ожидаемым параметрам ГРП. К этим данным будут относиться: траектория ствола, конструкция скважины, альтитуда стола ротора и т.д.; выгруженные (вдоль виртуального вертикального ствола, проходящего через муфту/порт ГРП) из предварительно построенной 3D геомеханической модели упруго-прочностные свойства породы и данные по напряженно-деформированному состоянию горного массива; технологические параметры ГРП, включающие в себя тоннаж, тип проппанта и жидкости, количество стадий и т.д. Таким образом, результатом работ на первом этапе является график закачки с учетом технических ограничений и рисков. Рассмотрим подробнее стадию описания геомеханических свойств. Основополагающими параметрами, контролирующими распространение трещины ГРП являются: статические модуль Юнга и коэффициент Пуассона, описывающие упруго-прочностные характеристики породы, и минимальное горизонтальное напряжение, определяющее напряженно-деформированное состояние горного массива. В основу разрабатываемых геомеханических моделей закладывается вся имеющаяся по месторождению информация, данные

по пробуренным скважинам, в том числе: результаты ГИС и керновых исследований, данные по бурению и по конструкциям скважин и т.д. Для калибровки упруго-прочностных характеристик, рассчитанных по каротажным данным и корреляционным зависимостям, используются результаты геомеханических тестов на керне. В свою очередь, профиль минимальных горизонтальных напряжений рассчитывается в рамках теории поропругой среды и калибруется на результаты специальных исследований (стресс тест, тест на приемистость), нагнетательных тестов и мини-ГРП, а также на буровые события. Отметим, что ключевым моментом предлагаемого (геомеханического) подхода является достоверность и прогнозная сила построенных геомеханических моделей. После завершения при дальнейшей разработке дизайна и редизайне ГРП, упруго-прочностные характеристики породы не подлежат корректировке, а профиль напряжений, может быть уточнен еще только на этапе проведения мини-ГРП. Для калибровки геомеханических моделей используются цифровые данные мини-ГРП, которые загружаются в симулятор ГРП. Далее проводится их интерпретация с расчетом значений давления закрытия трещины, эквивалентных величине минимального горизонтального напряжения. После такого уточнения геомеханическая модель в дальнейшем не подвергается никаким дополнительным настройкам — она представляет собой окончательный инструмент,

пригодный для использования при проектировании ГРП [3]. Как уже было продемонстрировано нами ранее [3], при разработке дизайна ГРП в вертикальных, субвертикальных и S-образных (с небольшим отходом) скважинах хорошие результаты обеспечивает применение 1D-геомеханической модели, построенной с использованием данных ГИС и бурения, результатов керновых исследований и другой калибровочной информации. Такой подход не может быть использован корректно в случае активной разработки месторождения. Однако при подготовке дизайна многостадийного ГРП в горизонтальных скважинах использование результатов только 1D-моделирования не позволяет добиться приемлемого результата ввиду того, что каротажные данные описывают вскрываемый разрез вдоль ГС, т.е. по латерали. Для расчета геометрии трещины ГРП необходимо описать разрез по вертикали, т.к. в большинстве случаев при нормальном сбросовом стресс режиме, трещины распространяются вертикально и поперек / вдоль горизонтального ствола. Однако в этом случае при моделировании распространения трещины ГРП ключевым моментом является понимание профиля упруго-прочностных свойств породы и напряженно-деформированного состояния горного массива по вертикали в точке инициации трещины по ГС. Это направление можно охарактеризовать виртуальной вертикальной скважиной, проходящей через муфту/порт ГРП (рис. 2).



**Рис. 2.** Применение 3D геомеханического моделирования при разработке дизайна/редизайна МГРП для горизонтальных скважин. Составлено авторами  
**Fig. 2.** Application of 3D geomechanical modeling in the development of design/redesign of multi-stage hydraulic fracturing for horizontal wells. Compiled by the authors

Работа с такой виртуальной вертикальной скважиной сводит процесс разработки дизайна/редизайна МГРП к решению ранее рассмотренной 1D-задачи. Однако для практической реализации описанного подхода возникает необходимость построения корректной 3D геомеханической модели высокого разрешения, которая способна с достаточной точностью охарактеризовать геомеханические свойства пород разреза в вертикальном и горизонтальном направлениях и при этом учитывающая изменчивость разреза, его мощность и наличие карбонатизированных или глинистых пропластков.

После утверждения предварительного дизайна осуществляется подготовка к проведению операционных процедур. Сама операция ГРП включает проведение тестовых закачек, по результатам которых осуществляется калибровка технологических параметров. На этом этапе уточняются свойства используемой жидкости и пропанта, трение в трубах, взаимодействие жидкостей с пластом (утечки), определяются ключевые параметры ГРП, такие как давление закрытия, чистое давление, давление мгновенной остановки закачки, эффективность жидкости. По установленным во время тестовых закачек

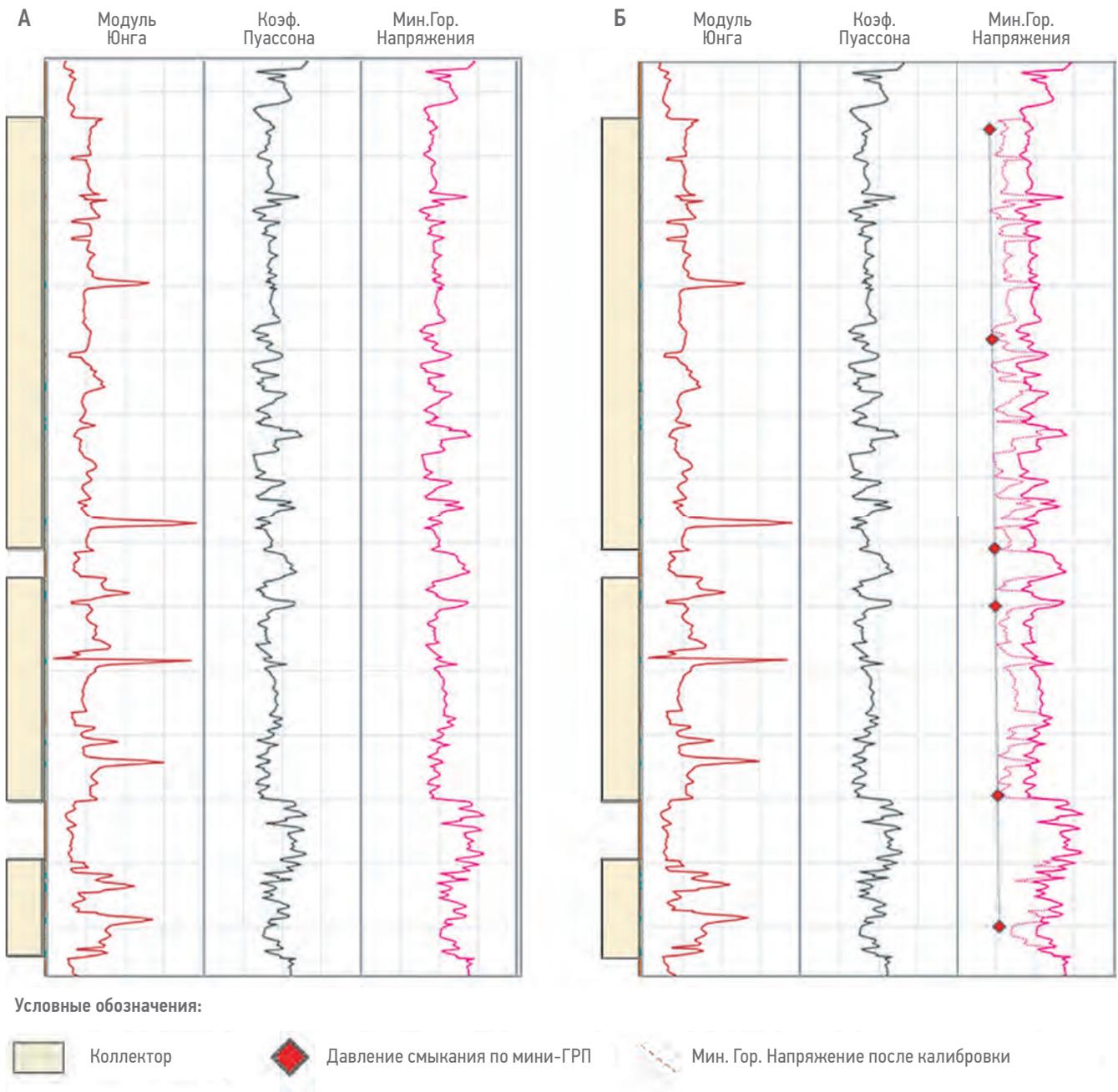


Рис. 3. Геомеханическая модель: А) до калибровки напряжений; Б) после калибровки напряжений по мини ГРП с учетом просадки порового давления. Составлено авторами

Fig. 3. Geomechanical model: A) before stress calibration; Б) after calibrating stresses using mini-fracturing, taking into account pore pressure drawdown. Compiled by the authors

ключевым параметрам ГРП производится финальная калибровка геомеханической модели — по значению давления смыкания трещины уточняется минимальное горизонтальное напряжение в интервалах коллектора (рис. 3). Стоит отметить, что на данном этапе ранее определенные упруго-прочностные свойства пород пласта остаются неизменными. После калибровки напряжений геомеханическая модель приобретает свой законченный вид и впоследствии не подлежит изменению или корректировке.

После проведения основной закачки готовится финальный дизайн с адаптацией расчетных давлений к фактическим. Стоит подчеркнуть, что ни здесь, ни далее, изменения геомеханических свойств пласта не допускаются. На данном этапе корректировке могут быть подвергнуты только технологические и смежные параметры (свойства жидкостей, проппанта, параметры трения и утечки).

Предложенный геомеханический подход к разработке дизайна/редизайна МГРП опробован на горизонтальных скважинах в ачимовских отложениях Западной Сибири. Успешно проведены пяти-, шести-стадийные ГРП на ГС. 3D геомеханическое моделирование позволило свести к решению 1D-задачи для псевдоскважин, проходящих через муфты или зону перфорации, которые затем калибровались на результаты мини-ГРП. Высокая точность прогнозируемых параметров трещины ГРП обеспечила минимальные изменения в процессе основной закачки, иногда без проведения мини-ГРП, начиная со второй стадии. Построенные в рамках предложенного подхода геомеханические модели значительно повышают

эффективность ретроспективного анализа ГРП и являются незаменимым инструментом при геомеханическом сопровождении ГРП в реальном времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый геомеханический подход позволяет реализовать единый алгоритм при моделировании трещин ГРП, построении дизайна и редизайна, а также выполнить надежный прогноз продуктивности трещины и оптимизировать проведение ГРП еще на этапе его планирования. Ключевым моментом описанного подхода является последовательное выполнение процесса: моделирование свойств материала (горная порода) и параметров среды (напряженно-деформированное состояние горного массива), определение технологических параметров закачки в контексте планируемых целей проводимого ГРП и, наконец, моделирование самого ГРП в одном из симуляторов. В отличие от традиционного подхода, в котором построенная геомеханическая модель может быть усреднена по литотипам и откорректирована на любом из этапов ГРП, при реализации предлагаемого подхода осуществляется последовательная корректировка соответствующих параметров, не предполагающая их дальнейшего изменения. Построенные в рамках такого подхода геомеханические модели имеют прогнозную силу и являются эффективным инструментом, который после обновления может использоваться как на последующих стадиях при проведении МГРП, так и на других скважинах месторождения.

### Список литературы

1. Буденный С.А. Численное моделирование многостадийного гидроразрыва пласта в горизонтальной скважине: дис. ... канд. физ.-мат. наук. — МФТИ, 2019.
2. Анкушев Я.Е. Роль механики горных пород при проектировании гидравлического разрыва пласта // Наука, техника и образование. — 2019. — № 5 (58). — С. 34–36.
3. Низаметдинова М., Бурков М., Смирнов Н. Геомеханика: свежий взгляд на дизайн/редизайн и ретроспективу ГРП // Российская отраслевая энергетическая конференция, 3–5 октября 2023 г., Москва, Россия. Сборник материалов конференции. — 2023. — С. 5200.

### References

1. Budyonny S.A. *Numerical modeling of multi-stage hydraulic fracturing in a horizontal well*. Dissertation for the scientific degree of candidate of physical and mathematical sciences. MIPT, 2019. (In Russ.)
2. Ankushev Ya.E. The role of rock mechanics in the design of hydraulic fracturing. *Science, technology and education*. 2019, no. 5(58), pp. 34–36. (In Russ.)
3. Nizametdinova M., Burkov M., Smirnov N. Geomechanics: a fresh look at the design/redesign and retrospective of hydraulic fracturing. Russian Industry Energy Conference, October 3–5, 2023, Moscow, Russia. *Conference materials collection*. 2023, p. 5200. (In Russ.)

## ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

**В.А. Стародубов** — разработал концепцию статьи, подготовил текст статьи, принял активное участие в работах по комплексному геомеханическому моделированию ГРП/МГРП в горизонтальных скважинах.

**Р.К. Непоп** — принял активное участие в организации и координации работ по комплексному геомеханическому моделированию ГРП/МГРП в горизонтальных скважинах, разработал концепцию статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи.

**Н.Ю. Смирнов** — оказал экспертную поддержку в области гидродинамического моделирования, принял активное участие в организации и координации работ по комплексному геомеханическому моделированию ГРП/МГРП в горизонтальных скважинах, окончательно утвердил публикуемую версию статьи.

**Vladislav A. Starodubov** — developed the concept of the article, prepared the text of the article, took an active part in the work on complex geomechanical modeling of hydraulic fracturing/multi-stage fracturing in horizontal wells.

**Roman K. Nepop** — took an active part in organizing and coordinating work on complex geomechanical modeling of hydraulic fracturing/multi-stage fracturing in horizontal wells, developed the concept of the article, and finally approved the published version of the article.

**Nikolay U. Smirnov** — provided expert support in the field of hydrodynamic modeling, took an active part in organizing and coordinating work on complex geomechanical modeling of hydraulic fracturing/multi-stage fracturing in horizontal wells, and finally approved the published version of the article.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Владислав Алексеевич Стародубов\*** — руководитель отдела геомеханического моделирования, ООО «ПетроГМ»  
630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 2/2.  
e-mail: starodubov.va@petrogm.com

**Роман Кириллович Непоп** — ведущий инженер, ООО «ПетроГМ»

**Николай Юрьевич Смирнов** — главный инженер, ООО «ПетроГМ»

**Vladislav A. Starodubov\*** — Head of the geomechanical modeling department of PetroGM LLC  
2/2, Akademika Lavrentyev Ave., 630090, Novosibirsk, Russia.  
e-mail: starodubov.va@petrogm.com

**Roman K. Nepop** — Leading engineer, PetroGM LLC

**Nikolay Y. Smirnov** — Chief Engineer, PetroGM LLC

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author