

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2023.4.101-112>

EDN FVXMFY

УДК 622.276.66

Подготовка библиотеки геомеханических свойств для оптимизации дизайнов ГРП на объектах

АО «Самотлорнефтегаз»

¹Самойлов М.И., ²Совраненко А.Н., ¹Морева В.А., ^{1,3}Кулешов В.С.,

¹Павлюков Н.А., ¹Куркин П.А.

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

²ООО «РН-Центр экспертной поддержки и технического развития», Тюмень, Россия

³ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия

Preparation of geomechanical rock properties library for reservoir optimization of hydraulic fracturing design at the sites of JSC Samotlorneftegaz

¹M.I. Samoilov, ²A.N. Sovranenko, ¹V.A. Moreva, ^{1,3}V.S. Kuleshov,

N.A. Pavlyukov, ¹P.A. Kurkin

¹Tyumen Petroleum Research Center LLC, Tyumen, Russia

²RN-Center of Examining Assistance and Technical Development LLC, Tyumen, Russia

³Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

E-mail: vafadeeva@tnnc.rosneft.ru

Аннотация. В работе на основе данных акустического широкополосного каротажа (АКШ) и плотностного каротажа выполнено построение 1D геомеханических моделей на опорных вертикальных скважинах. Подготовлена база единообразных, физически обоснованных данных упругих свойств и напряжений для различных литофаций (механофаций) и стратиграфических единиц для последующего формирования дизайнов ГРП и повышения эффективности операций гидравлического разрыва пластов (ГРП) на объектах разработки месторождений АО «Самотлорнефтегаз» в вертикальных, наклонно-направленных и горизонтальных скважинах.

Ключевые слова: геомеханическое моделирование, ГРП, АКШ, кластеризация

Для цитирования: Самойлов М.И., Совраненко А.Н., Морева В.А., Кулешов В.С., Павлюков Н.А., Куркин П.А. Подготовка библиотеки геомеханических свойств для оптимизации дизайнов ГРП на объектах АО «Самотлорнефтегаз» // Нефтяная провинция.-2023.-№4(36).-С. 101-112. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2023.4.101-112>. - EDN FVXMFY

Abstract. This paper contains 1D geomechanical models of vertical evaluation wells which were developed based on full-wave sonic and density logging data. It also contains a ready database of uniform and physically based data on elastic properties and stresses for different lithofacies and stratigraphic units which later can be used in hydraulic fracturing design and improvement of fracturing efficiency during field development at vertical, directional and horizontal wells of JSC Samotlorneftegaz.

Keywords: *geomechanical modeling, reservoir fracturing, full-wave sonic logging, clustering*

For citation: M.I. Samoilov, A.N. Sovranenko, V.A. Moreva, V.S. Kuleshov, N.A. Pavlyukov, P.A. Kurkin Podgotovka biblioteki geomekhanicheskikh svoystv dlya optimizatsii dizaynov GRP na ob"yektakh АО «Samotlorneftegaz» [Preparation of geomechanical rock properties library for reservoir optimization of hydraulic fracturing design at the sites of JSC Samotlorneftegaz]. Neftyanaya Provintsiya, No. 4(36), 2023. pp. 101-112. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2023.4.101-112>. EDN FVXMFY (in Russian)

Введение

Пласты АВ и БВ Самотлорского месторождения являются низкопроницаемыми и в части районов характеризуются наличием тонких перемычек, где риск прорыва трещин ГРП в нежелательные зоны значителен. Повсеместное выполнение многостадийного ГРП в горизонтальных скважинах со значительным количеством стадий ведет к необходимости тщательного и взвешенного подбора дизайнов ГРП и технологии проведения работ для минимизации рисков прорыва в водо- и газонасыщенные зоны, что приводит к неоптимальному режиму работы скважин. В условиях массового проведения гидроразрыва пласта на объектах АО «Самотлорнефтегаз» с различными типами отложений важным является использование единообразных, физически обоснованных данных упругих свойств и напряжений.

Для формирования дизайна гидроразрыва пласта важное значение имеют результаты геомеханического моделирования, включающие в себя упругие свойства (Модуль Юнга и коэффициент Пуассона) и градиенты

напряжений. Данные параметры должны базироваться на полученных из численного моделирования величинах, подкрепленных конкретными производственными исследованиями и испытаниями.

1D геомеханическое моделирование

Процедура построения одномерных геомеханических моделей, в зависимости от поставленной задачи может включать в себя до 12 последовательных шагов с различным набором необходимой входной и калибровочной информации [1].

В рамках работ по разработке и оптимизации дизайнов ГРП граф может быть ограничен 5 шагами (Рис. 1), а качестве входной информации необходим следующий набор данных:

- Расширенные комплексы ГИС (плотность, скорость пробега продольной и поперечной волн);
- Результаты исследований керна (статические и динамические упругие свойства);
- Калибровочная информация (данные замеров пластового давления, замеры высоты трещин ГРП, мини-ГРП, и т.д.).

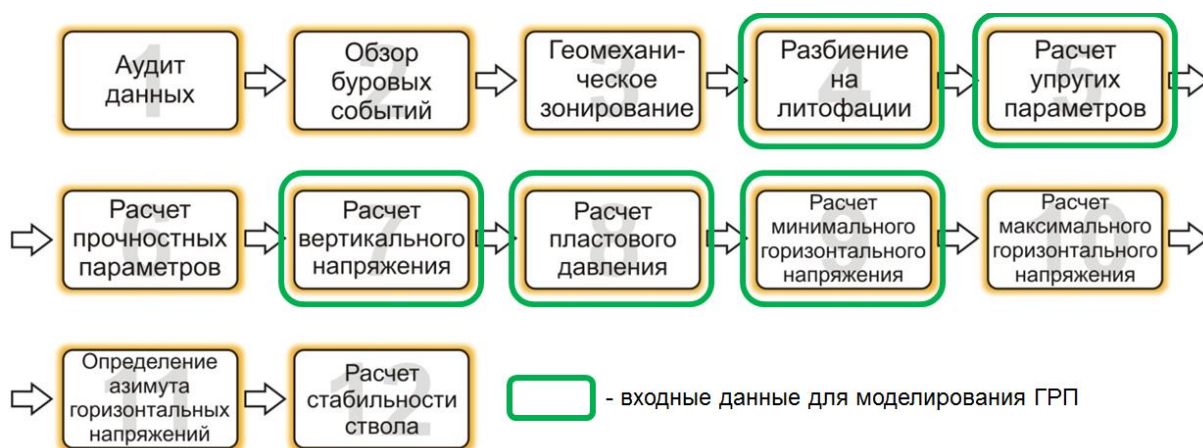


Рис. 1. Граф построения одномерной геомеханической модели

Результатом 1D геомеханического моделирования для подготовки основы дизайнов ГРП являются непрерывные профили упругих свойств горной породы, таких как модуль Юнга и коэффициент Пуассона вдоль

ствола скважины, и непрерывных профилей минимального и максимального горизонтальных напряжений, рассчитанных в рамках пороупругой модели с учетом константы Био и заданных региональных тектонических деформаций.

Для целей геомеханического моделирования на территории Самотлорского месторождения использованы вертикальные скважины с наличием расширенного комплекса ГИС (АКШ+Плотность): 4 скважины с данными в пласте АВ и 2 скважины с данными, охватывающими пласт БВ. Для перехода от динамических к статическим упругим свойствам использованы корреляционные зависимости, полученные на основе лабораторных исследований керна по целевым пластам. Одним из главных шагов геомеханического моделирования является расчет пластового давления. На территории Самотлорского месторождения имеется большое количество скважин с замерами начального пластового давления. В результате анализа данных прямых замеров, в том числе с привлечением данных акустического каротажа, наличие зон АВПД и АНПД на территории месторождения не выявлено. По причине активной разработки целевых пластов АВ и БВ для калибровки геомеханических моделей в интервалах коллектора использованы значения пластового давления, полученные на момент выполнения ГРП. Для калибровки геомеханических моделей в интервалах неколекторов и перемычек пластовые давления заданы значением гидростатического давления рассчитанного для заданной глубины.

Рассчитанные динамические упругие модули коррелируют с РИГИС – интервалы коллектора характеризуются повышенными значениями модуля Юнга и пониженными – коэффициента Пуассона, интервалы неколектора, наоборот, пониженными значениями модуля Юнга и повышенными коэффициента Пуассона. На основе полученных упругих свойств вдоль опорных скважин для целевых пластов

Самотлорского месторождения были выделены механические фации (литотипы): «песчаники», «заглинизированные песчаники» или «алевролиты» - коллектор; «аргиллиты», «глины» и «плотный» - неколлектор (Рис. 2).

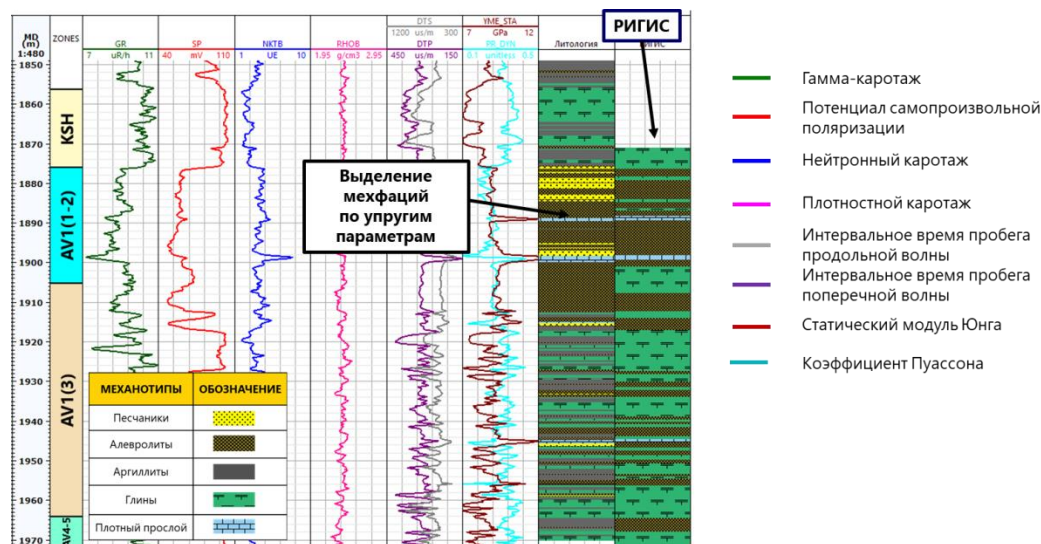


Рис. 2. Выделение механических фаций и сравнение с РИГИС по опорной скважине

Калибровка профиля минимального горизонтального напряжения выполнена на замеры давления закрытия трещин при проведении мини-ГРП при различных пластовых давлениях и получаемые величины чистого давления, а также на замеры высоты трещины ГРП. Профили напряжений в опорных скважинах посчитаны в рамках единого графа работ с одинаковыми настройками. Наличие исследований по оценке высоты сформированной трещины ГРП [2] в вертикальных скважинах является дополнительным способом верификации созданной геомеханической модели и позволяет снять неопределенности в полученных величинах моделирования. Данный шаг позволит оценить взаимосвязь моделирования в различных программных продуктах по геомеханическому моделированию и дизайну ГРП на фактически получаемые значения высот трещин ГРП. Необходимость выполнения таких замеров связана с тем, что геометрия трещин ГРП зависит не только от геомеханических параметров,

но также от вязкости жидкости, режимов закачки и прочих технологических параметров.

Замер высоты трещины ГРП на территории Самотлорского месторождения успешно выполнен на 17 скважинах, в двух опорных скважинах оценка высоты трещины производилась с использованием аппаратуры дипольного широкополосного акустического каротажа.

Выполнена дискретизация непрерывных профилей 1D геомеханической модели на заданные кластера или группы и выделены характерные значения упругих свойств, таких как модуль Юнга и коэффициент Пуассона, и градиента напряжений внутри кластера. Под кластеризацией понимается формирование выборок с единообразными механическими свойствами по определенному числу механических фаций. Подробное описание подходов к применению методов кластеризации изложены в работах [3-6].

Подготовка библиотеки геомеханических свойств

На основе статистического анализа данных определены характерные значения упругих свойств (Модуль Юнга и коэффициент Пуассона) и градиенты напряжений для каждого из литотипов. Выполнен анализ чувствительности характерных значений модуля Юнга, коэффициента Пуассона и градиента давления закрытия на профиль трещины ГРП при фиксированных значениях общих и мгновенных коэффициентов утечки жидкости в пласт (Рис. 3). На рисунке представлено изменение длины, высоты и ширины трещины ГРП при вариации параметров до +/-25 %. Видно, что изменения коэффициента Пуассона в меньшей степени влияет на параметры трещины ГРП. Максимальное отклонение не превышает 2 %. Вариации модуля Юнга на 25 % приводят к изменениям геометрических параметров трещины ГРП не более чем на 7 %. При этом наибольший вклад в изменения параметров трещины ГРП вносит градиент напряжения (до 30 %).

Поэтому, при планировании операций ГРП, табличные значения градиентов напряжений рекомендуется использовать в качестве начального приближения при построении дизайнов ГРП с дальнейшей их калибровкой на результаты анализа мини-ГРП скважин окружения.

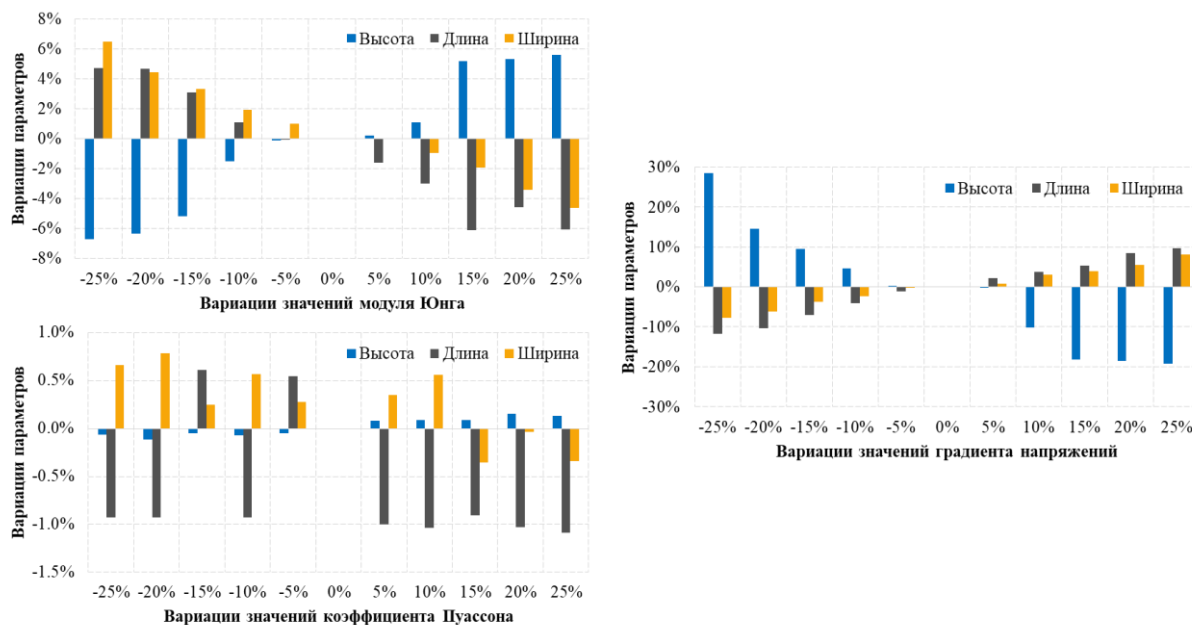


Рис. 3. Анализ чувствительности к величине модуля Юнга, коэффициента Пуассона, градиента напряжений для пласта БВ10(0)

Полученный набор характерных значений в дальнейшем загрузился в соответствующие базы данных корпоративных симуляторов РН-ГРИД и РН-СИГМА (Рис. 4). На рисунке представлен пример заполнения вкладки «Задание свойств по литотипам» упругих свойств, напряжений, общего и мгновенного коэффициентов утечки во вкладке «геомеханика и утечки» в корпоративном ПО «РН-ГРИД».

В результате кластеризации приняты следующие характерные значения упругих свойств пород (модуль Юнга и коэффициент Пуассона) и градиента напряжений для пластов АВ(1-2) (Таблица 1), БВ8(0) (Таблица 2) и БВ10(0) (Таблица 3).

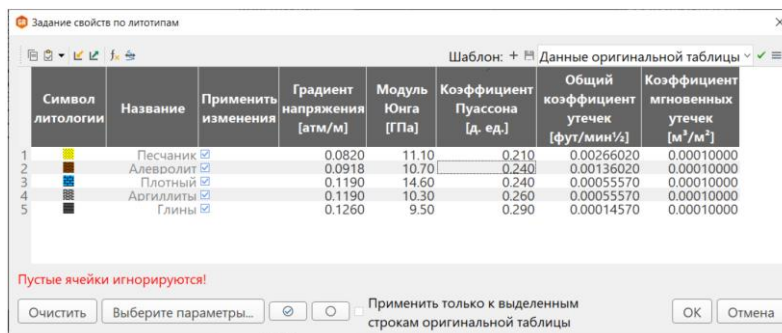


Рис. 4. Пример базы данных в корпоративном ПО «РН-ГРИД» [7]

Таблица 1

Характерные значения упругих свойств пород (модуль Юнга и коэффициент Пуассона) и градиента напряжений для выделенных механофаций в пласте АВ1(1-2)

Средние значения для группы пластов АВ1(1-2)			
РИГИС	Модуль Юнга (стат), ГПа	Коэфф. Пуассона (стат)	Градиент напряжений, атм/м
Песчаник*	6,2	0,20	0,6357 GRAD_PP+0,0544
Алевролит**	6,0	0,27	1,12·GRAD_SH_песчаник
Аргиллит	5,1	0,31	0,146
Глины	3,3	0,36	0,161
Плотный прослой	12	0,28	0,134

* - градиент напряжения в «песчанике» зависит от градиента ожидаемого пластового давления (GRAD_PP, атм/м).

** - градиент напряжения в «алевролите» или «заглинизированном песчанике» зависит от градиента давления закрытия в «песчанике» (GRAD_SH_песчаник, атм/м).

Таблица 2

Характерные значения упругих свойств пород (модуль Юнга и коэффициент Пуассона) и градиента напряжений для выделенных механофаций в пласте БВ8(0)

Средние значения для группы пластов БВ8(0)			
РИГИС	Модуль Юнга (стат), ГПа	Коэфф. Пуассона (стат)	Градиент напряжений, атм/м
Песчаник*	9,2	0,21	0,6357 GRAD_PP+0,0544
Алевролит**	8,9	0,24	1,12·GRAD_SH_песчаник
Аргиллит	8,8	0,26	0,118
Глины	8,7	0,29	0,126
Плотный прослой	16,6	0,24	0,118

* - градиент напряжения в «песчанике» зависит от градиента ожидаемого пластового давления (GRAD_PP, атм/м).

** - градиент напряжения в «алевролите» или «заглинизированном песчанике» зависит от градиента давления закрытия в «песчанике» (GRAD_SH_песчаник, атм/м).

Таблица 3

Характерные значения упругих свойств пород (модуль Юнга и коэффициент Пуассона) и градиента напряжений для выделенных механофаций в пласте БВ10(0)

Средние значения для группы пластов БВ10(0)			
РИГИС	Модуль Юнга (стат), ГПа	Коэфф. Пуассона (стат)	Градиент напряжений, атм/м
Песчаник*	11,1	0,21	0,6357 GRAD_PP+0,0544
Алевролит**	10,7	0,24	1,12·GRAD_SH_песчаник
Аргиллит	10,3	0,26	0,119
Глины	9,5	0,29	0,126
Плотный прослой	14,6	0,24	0,113

* - градиент напряжения в «песчанике» зависит от градиента ожидаемого пластового давления (GRAD_PP, атм/м).

** - градиент напряжения в «алевролите» или «заглинизированном песчанике» зависит от градиента давления закрытия в «песчанике» (GRAD_SH_песчаник, атм/м).

Выполнено сравнение результатов моделирования кластеризованных профилей с фактическими данными (Таблица 4). В результате совмещенного моделирования ГЕОМЕХАНИКА-ГРП установлено, что для кластеризованных профилей отклонения значений давлений закрытия и МДОЗ не превышают 2 % и 3 % соответственно.

Таблица 4

Результаты моделирования

Опорная скважина	Пласт	Рр	Мгновенное давление остановки закачки (ISIP)			Давление закрытия			
		Хорнер (атм)	Миник (атм)	Разница (%)	Разница (%)	Миник (атм)	Кластер (атм)	Разница (%)	Разница (%)
1	AB1(1-2)	105	187	2%	-2%	151	149	4%	3%
2	AB1(1-2)	160	239	3%	-1%	206	203	0%	-2%
3	AB1(1-2)	158	231	0%	-1%	207	207	0%	0%
4	AB1(1-2)	150	234	2%	1%	207	209	1%	0%
5	БВ10(0)	85	240	2%	-2%	180	181	1%	-1%
6	БВ8(0)	125	234	1%	1%	187	192	1%	2%
5	БВ8(0)	134	211	10%	3%	175	185	2%	8%

Выводы

Для Самотлорского месторождения выполнено создание библиотеки геомеханических свойств для оптимизации дизайнов ГРП. Отработан алгоритм подготовки и передачи инженерам ГРП данных по упругим свойствам и напряжениям пород пласта, оценка которых выполнена на основании одномерной геомеханической модели. Указанный подход к организации работ показал свою востребованность, улучшил оперативность взаимодействия инженерно-научного штата мультифункциональной группы и послужил основой высокого качества проектирования ГРП на основе достоверных геомеханических данных. Реализован механизм комплексной оценки рисков проведения гидроразрыва пласта по площади месторождения с калибровкой методики по результатам выполненных операций ГРП.

Список литературы

1. Фадеева В.А., Самойлов М.И., Павлов В.А., и др. Использование предварительной 1D геомеханической модели для планирования исследований ядра // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. 2020. №7 (343). С.29-35.
2. Морева В.А., Кулешов В.С., Павлов В.А., Самойлов М.И. Замер высоты трещины гидроразрыва пласта как метод верификации геомеханической модели // НТВ «Каротажник» 2021. №8(314). С. 93-109.
3. Воронцов К.В. Лекции по алгоритмам кластеризации и многомерного шкалирования // М.: МГУ. 2007.
4. Павлюков Н.А., Павлов В.А., Меликов Р.Ф., и др. Подбор оптимальных методик кластеризации данных по результатам геомеханического моделирования для планирования дизайнов ГРП // Нефтяная провинция. № 2(14). 2018. С. 88-99.
5. Ельцов И.Н., Самойлов М.И., Торопецкий К.В., Борисов Г.А. Построение петрофизических зависимостей с использованием кластерного анализа // SPE-201970-MS. 2020.
6. Самойлов М.И., Павлов В.А., Павлюков Н.А., Тимиртдинов А.Ю. Интегрированное геомеханическое моделирование и проектирование ГРП: от частных случаев к общему результату // SPE - 206641-RU. 2021.
7. Павлюков Н. А., Павлов В. А., Самойлов М. И. Адаптация геомеханической модели на замер высоты трещины гидроразрыва пласта с использованием акустического каротажа. // НТВ «Каротажник» 2022. №6(320). С. 93-103.

References

1. Fadeeva V.A., Samoilov M.I., Pavlov V.A., et al. Using preliminary 1D geomechanical model for core research planning. *Geologiya, Geofizika i Razrabotka Neftyanykh i Gazovykh Mestorozhdeniy* [Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields]. 2020, No. 7 (343), pp. 29-35. (in Russian)
2. Moreva V.A., Kuleshov V.S., Pavlov V.A., Samoilov M.I. A hydrofrac fracture height measurement as a method for geomechanical model verification. *Karotazhnik* [Well Logging]. 2021, No. 8 (314), pp. 93-109. (in Russian)
3. Vorontsov K.V. *Lektsii po algoritmam klasterizatsii i mnogomernogo shkalirovaniya* [Lectures on clustering and multidimensional scaling algorithms]. Moscow, Moscow State University, 2007. (in Russian)
4. Pavlyukov N.A., Pavlov V.A., Melikov R.F., et al. Selecting optimal procedure of clustering data from geomechanical modeling for hydraulic fracturing design. *Neftyanaya Provintsiya* [Oil Province]. 2018, No. 2(14), pp. 88-99. (in Russian)
5. Eltsov I.N., Samoilov M.I., Toropetsky K.V., Borisov G.A. Evaluation of petrophysical relations by using cluster analysis. SPE-201970-MS, 2020. (in English)
6. Samoilov M.I., Pavlov V.A., Pavlyukov N.A., Timirtdinov A.Yu. Integrated geomechanical modeling and hydraulic fracturing design: from particular cases to the overall result. SPE-206641-MS, 2021. (in English)
7. Pavlyukov N.A., Pavlov V.A., Samoilov M.I. Adaptation of geomechanical model to the formation hydrofrac fracture height measurement using sonic log. *Karotazhnik* [Well Logging]. 2022, No. 6 (320), pp. 93-103. (in Russian)

Сведения об авторах

Самойлов Михаил Иванович, старший эксперт экспертного отдела, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»
Россия, 625002, Тюмень, ул. Осипенко, 79/1
E-mail: MI_Samoylov2@tnnc.rosneft.ru

Совраненко Александр Николаевич, менеджер отдела инженерной поддержки ГРП, ООО «РН-Центр экспертной поддержки и технического развития»
Россия, 625023, Тюмень, ул. Одесская, 7Б
E-mail: ansovranenko@ceptr.rosneft.ru

Морева Виктория Александровна, главный специалист отдела разработки проектов геомеханики, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»
Россия, 625002, Тюмень, ул. Осипенко, 79/1
E-mail: vafadeeva@tnnc.rosneft.ru

Кулешов Василий Сергеевич, кандидат физико-математических наук, менеджер отдела разработки проектов геомеханики, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»
Россия, 625002, Тюмень, ул. Осипенко, 79/1
доцент, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»
Россия, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38
E-mail: kuleshovvs@gmail.com

Павлюков Николай Алексеевич, эксперт отдела разработки проектов геомеханики, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»
Россия, 625002, Тюмень, ул. Осипенко, 79/1

E-mail: napavlyukov@tnnc.rosneft.ru

Куркин Пётр Анатольевич, менеджер отдела разработки проектов геомеханики,
ООО «Тюменский нефтяной научный центр»
Россия, 625002, Тюмень, ул. Осипенко, 79/1
E-mail: pakurkin@tnnc.rosneft.ru

Authors

M.I. Samoilov, Chief Examiner, Examining Division, Tyumen Petroleum Research Center LLC
79/1, Osipenko st., Tyumen, 625002, Russian Federation
E-mail: MI_Samoylov2@tnnc.rosneft.ru

A.N. Sovranenko, Manager, Hydraulic Fracturing Engineering Support Department, RN-Center of Examining Assistance and Technical Development LLC
7b, Odesskaya st., Tyumen, 625023, Russian Federation
E-mail: ansovranenko@ceptr.rosneft.ru

V.A. Moreva, Chief Specialist, Geomechanics Projects Development Department, Tyumen Petroleum Research Center LLC
79/1, Osipenko st., Tyumen, 625002, Russian Federation
E-mail: vafadeeva@tnnc.rosneft.ru

V.S. Kuleshov, PhD, Manager, Geomechanics Projects Development Department, Tyumen Petroleum Research Center LLC
79/1, Osipenko st., Tyumen, 625002, Russian Federation
Assistant Profesor, Tyumen Industrial University
38, Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation
E-mail: kuleshovvs@gmail.com

N.A. Pavlyukov, Examiner, Geomechanics Projects Development Department, Tyumen Petroleum Research Center LLC
79/1, Osipenko st., Tyumen, 625002, Russian Federation
E-mail: napavlyukov@tnnc.rosneft.ru

P.A. Kurkin, Manager, Geomechanics Projects Development Department, Tyumen Petroleum Research Center LLC
79/1, Osipenko st., Tyumen, 625002, Russian Federation
E-mail: pakurkin@tnnc.rosneft.ru

Статья поступила в редакцию 17.08.2023
Принята к публикации 20.12.2023
Опубликована 30.12.2023