

DOI: 10.58168/OpEq2025_113-127

УДК 622.76, 519.218.82

АНАЛИЗ ДАННЫХ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА
ANALYZING HYDRAULIC FRACTURING DATA

Максимов Максим Сергеевич

Хуснияров Руслан Маратович

студенты Института информатики, математики и робототехники

Уфимского университета науки и технологий, г. Уфа, Россия

Maximov Maxim Sergeevich

Khusniyarov Ruslan Maratovich

students of the Institute of Informatics, Mathematics and Robotics, Ufa University of
Science and Technology, Ufa, Russia.

Аннотация. В работе рассматривается анализ волн давления, регистрируемых при резкой остановке подачи жидкости разрыва в нефтяную скважину, их обработка, подготовка для получения информации об успешности проводимой операции гидроразрыва пласта. Изучается возможность применения для этих целей нейронных сетей.

Abstract. The paper deals with the analysis of pressure waves registered at an abrupt stop of fracturing fluid supply to an oil well, their processing, preparation for obtaining information on the success of the hydraulic fracturing operation. The possibility of application of neural networks for these purposes is studied.

Ключевые слова: нефтяная скважина, гидроудар, хаммер – эффект, собственные колебания, гидроразрыв, МГРП, большие данные, кепстр.

Keywords: oil well, water hammer, natural oscillations, hydraulic fracturing, big data, cepstrum.

В современной нефтегазовой промышленности создание высоко проводимых трещин в нефтяных и газовых пластах является основным методом повышения эффективности добычи нефти. Для этого в нефтяной пласт вводят специальный расклинивающий раствор под высоким давлением через перфорационные отверстия. Этот процесс приводит к образованию трещин в пласте. В работе рассматривается задача определения точек инициации трещин гидроразрыва пласта (ГРП) с помощью спектрального анализа данных устьевых датчиков давления.

При эксплуатации горизонтальных нефтяных скважин с применением технологии многостадийного гидроразрыва пласта (МГРП) с течением времени возникает необходимость оживления ставших малопродуктивными скважин. При этом часто применяется технология «слепого гидроразрыва», когда в скважину под большим давлением нагнетается расклинивающий раствор, какие-то из старых трещин при этом активируются. Возникают вопросы: как определить, какие из трещин активированы? Не следует ли провести дополнительные закачки раствора? Устанавливать контролирующие приборы на большой глубине в стволе скважины, если даже возможно, то получить с них оперативную информацию не удастся, т.к. необходимо поднять приборы на поверхность. Доступным методом контроля является измерение давления на устье скважины. Теоретические работы [1] – [5] дают информацию, что гидроудар (хаммер – эффект), наблюдаемый при остановке закачки жидкости разрыва, при остановке насосов может быть использован для диагностики трещин ГРП. Быстро затухающие колебания давления (примерно 30 – 40 секунд) с периодичностью 8 – 10 секунд в совокупности с более мелкими фиксируемыми колебаниями при анализе позволяют определить успешность проведенной операции ГРП.

На Рис. 1 показана схема ГРП на горизонтальной скважине, а на Рис.3 схема многостадийного гидроразрыва пласта (МГРП), когда перпендикулярно

оси скважине создается не одна трещина, а целая сеть высокопроизводительных трещин.

В работе основное внимание уделяется методам предсказания геометрии трещины. Рассматриваются подходы, основанные на использовании искусственного интеллекта и математических методов, таких как применение кепстра, интерполяции и различных методов преобразования сигналов. В рамках исследования выполнены эксперименты по преобразованию и очистке данных от шумов. Поставлены и проведены различные эксперименты для улучшения точности обработки данных и разработки эффективных подходов к интерпретации сигналов.

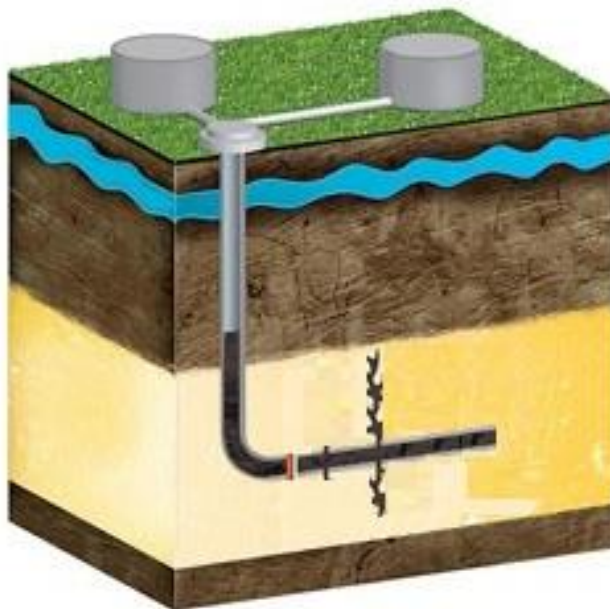


Рис. 1 Гидроразрыв пласта. Горизонтальная скважина.

Вертикальная трещина, перпендикулярная оси скважины.

Изучение характеристик процесса ГРП с использованием анализа различных данных (например, использование данных с датчика устьевое давление) является одной из рассматриваемых тем. Из интересных работ можно отметить работу [6], в которой описан метод MWF, позволяющий отслеживать эффективность ГРП с использованием обработки сигналов. Анализ хаммера происходит с применением обратного преобразование Фурье от логарифма

спектра сигнала. Такое преобразование называют кепстральным. Слово «кепстр» образовано перестановкой букв в слове «спектр» и стало использоваться при обработке сигналов [7]. Методы кепстрального анализа применяются в данной работе.

Также можно выделить работу Shijie Deng, Liangping Yi [8], в которой также описываются методы обработки сигналов ГРП, в особенности с применением вейвлет фильтров, которые позволяют разделить хаммер на сумму частот, для того чтобы избавиться от высокочастотных частот. Данный подход также использовался для анализа сигналов в данной работе.

Не так давно (в 2024) в работе [9] были упомянуты попытки оценить, являются ли сигнальные характеристики (хаммеры), а также другие параметры ГРП информативными для использования их признаков для методов прогнозирования с использованием Машинного обучения.

Данные, снятые с высокочастотных датчиков, являются идеальными. А именно, встречаются различные помехи, обрывы и шумы в данных, которые могут повлиять на результаты анализа (Рис.2).

Для решения этой проблемы применяют методы очистки и предобработки данных, которые могут помочь выделить желательные компоненты сигнала, а также подавить нежелательные (разрывы, шумы и тд).

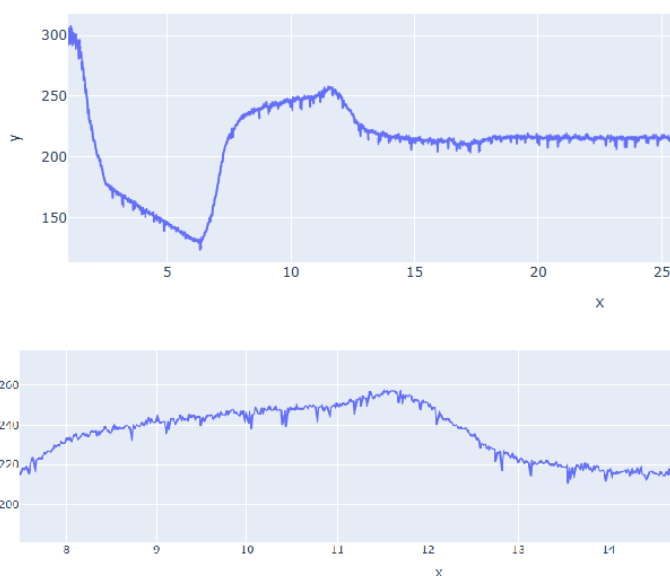


Рис. 2 Пример зашумленных данных

В исходных данных как раз имелись 2 проблемы – пропуски в данных (т.е. они были не равномерными по времени), а также, как видно на Рис. 2 – присутствовали шумы.

Для того, чтобы убрать пропуски, было решено использовать методы интерполяции. Чтобы убрать шумы, были опробованы различные фильтры для очистки сигнала. Для использования этих методов выбран язык программирования Python. Было проведено сравнение различных методов, были выбраны три метода из библиотеки SciPy: CubicSpline, Akima1DInterpolator, PchipInterpolator. Для очистки данных от шумов были использованы различные реализации фильтров на языке Python: скользящее среднее, медианный фильтр, экспоненциальное бегущее среднее, скользящее среднее + медианный фильтр, Фильтр Калмана.

Для дальнейшей обработки сигнала был использован вейвлет – анализ. Сигнал раскладывается на набор частот и остатка, сумма которых равна нашему сигналу. А значит, после разложения мы можем «выкинуть» «шумные» частоты, тем самым оставив только полезный для нас сигнал.

На Рис. 3 можем заметить, что наш сигнал раскладывается на 10 частот и остаток. Первые 3-4 частоты можно убрать, так как по график видно, что они «зашумленные».

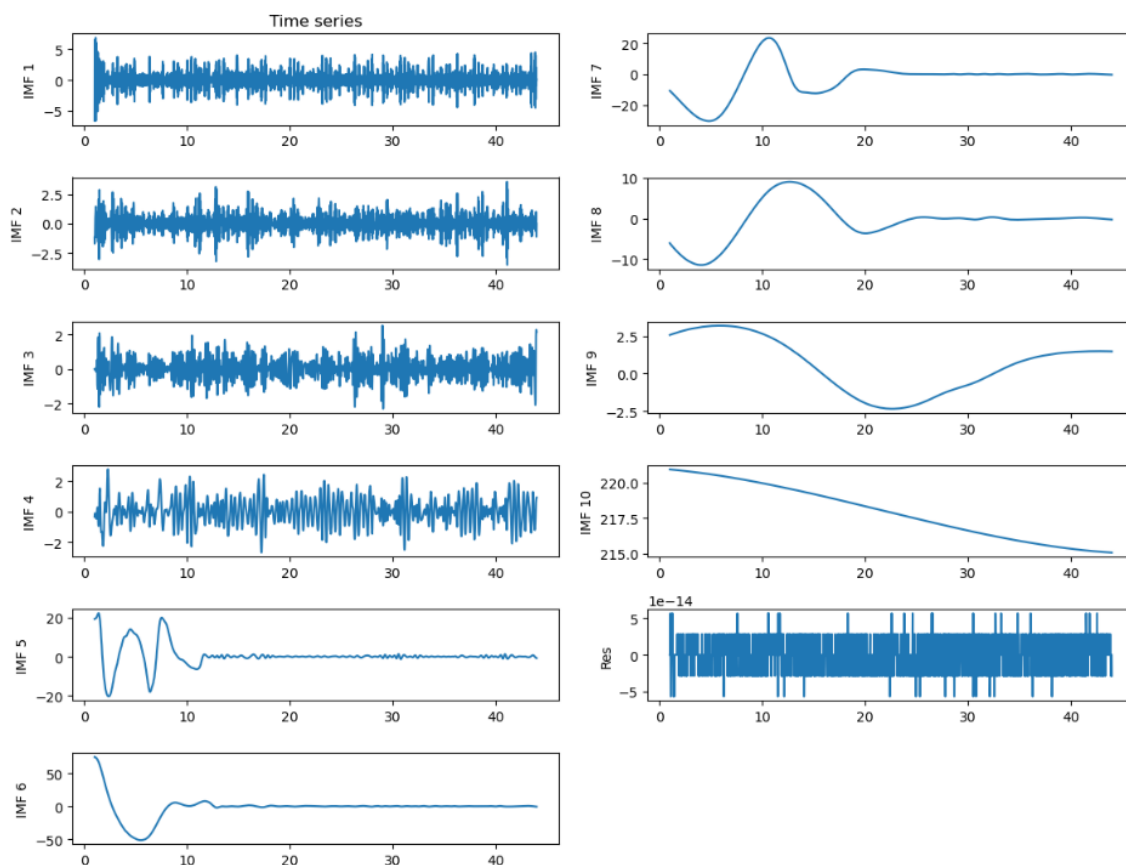


Рис. 3 Разложение нашего исходного зашумленного сигнала на частоты при помощи вейвлет преобразований

Следующей процедурой обработки сигнала является кепстральный анализ: вычисляется преобразование Фурье, берется логарифм образа и вычисляется обратное преобразование Фурье. В результате мы получаем кривую, на которой пики (максимумы, минимумы) соответствуют различным событиям в стволе скважины: изменение диаметра труб, НКТ, утечки, муфты дают отраженный сигнал. Зная геометрию скважины, мы определяем скорость волны (скорость звука в скважине) и приблизительно можем определить точки инициации трещин ГРП. Если расстояние между точками возможной инициации более 50 метров, метод дает неплохие результаты.

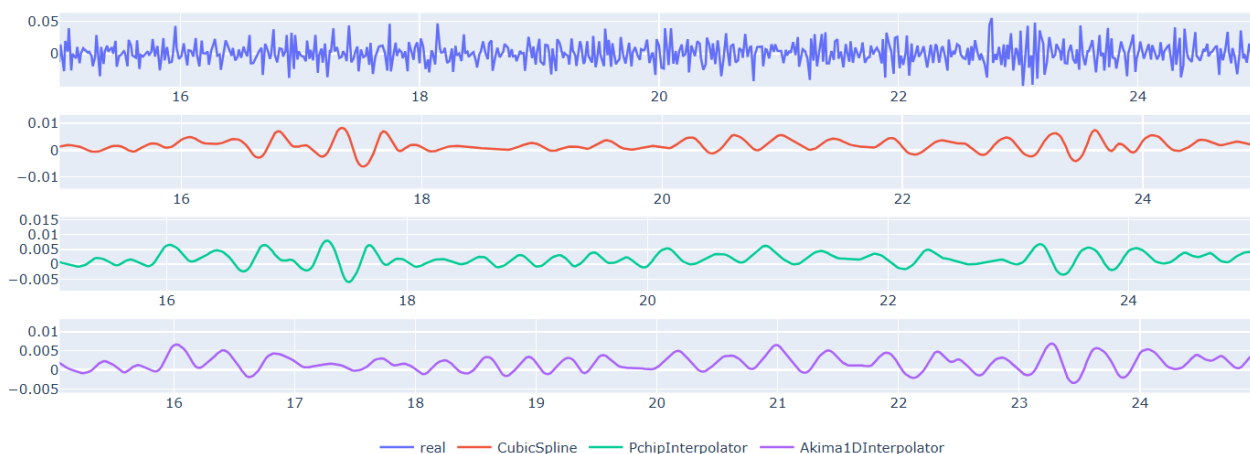


Рис. 4 Сравнение кепстров до очистки хаммера и после применения вейвлет – анализа и различных методов интерполяции

Для моделирования основного сигнала при ГРП была использована функция вида:

$$y(t) = Ae^{-\tau t} \cos(\omega t + \phi) + Qe^{-pt} + D \quad (1)$$

где A – амплитуда, τ – постоянная затухания синусоиды, ω – угловая частота или скорость изменения угла колебаний, ϕ – фазовый угол при $t=0$, используемый для сдвига функции в целях соответствия начальным условиям данных. Коэффициенты Q , p и D – дополнительные параметры для лучшей аппроксимации.

Нахождение неизвестных коэффициентов было сделано с помощью метода наименьших квадратов, реализованного в библиотеке `scipy` на языке Python.

На основе экспериментальных данных был собран датасет из 90 хаммер-эффектов, в котором для каждого хаммера имелись данные: тип ГРП (замещение, мини, ОГРП), НКТ, верхняя и нижняя перфорация, номер скважины, время хаммера, значения давления. Были применены методы интерполяции, вейвлет-очистки, каждому очищенному хаммеру были найдены коэффициенты для кривой.

Перед поиском корреляции из датасета коэффициентов были выкинуты выбросы, а именно строки данных, в которых значения коэффициентов выбивались из среднего значения, для этого визуально оценивались данные при

помощи гистограммы, построенной библиотекой seaborn методом `displot` (Рис.5). Построен график `scatter plot`, на котором визуально можно оценить зависимость данных между друг другом. В конечном итоге, наибольшая зависимость геометрии трещины с коэффициента была выявлена только с коэффициентами ω и τ , диаграмма и численные значения корреляции изображены на рисунках 6 (а-б).

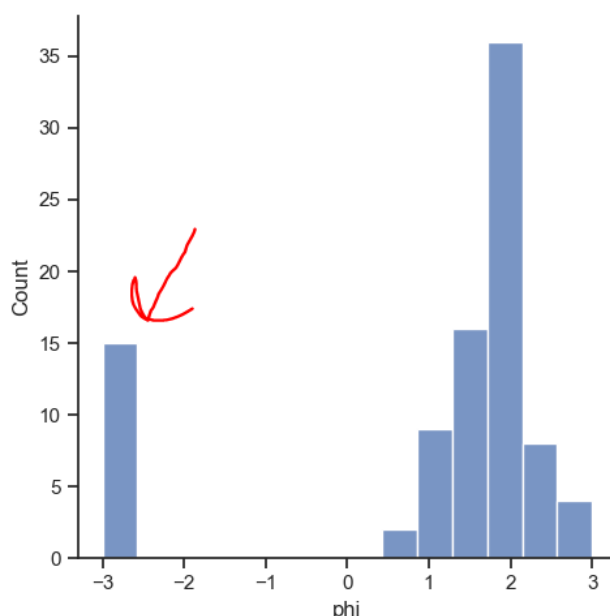


Рис. 5 Гистограмма для коэффициента ϕ . Виден выброс, который может исказить информацию о его корреляции с перфорацией.

Численное значение корреляции равно -0.69, а также p -value равно 4.965×10^{-11} , то есть, оно меньше 0.05, что говорит о том, что мы можем отвергнуть нулевую гипотезу, и говорить о том, что значение этой корреляции статистически значима. С другими коэффициентами корреляции не было обнаружено.

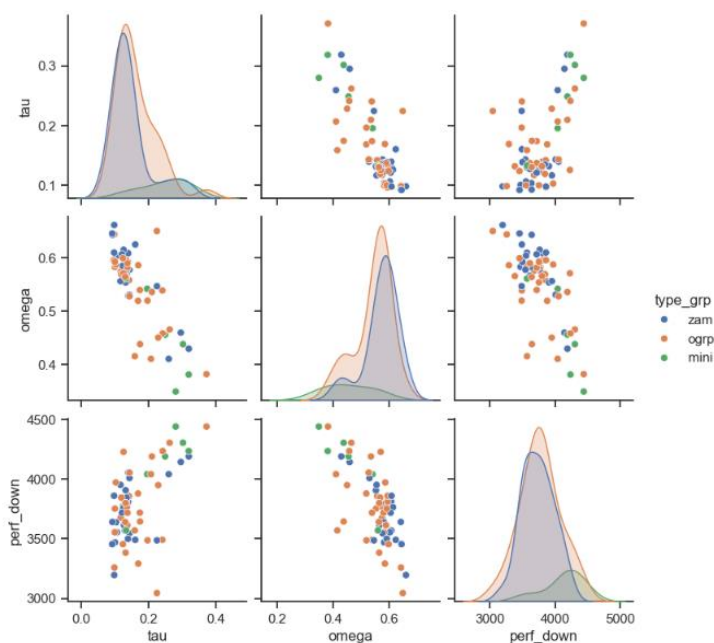


Рис. 6(а) Scatter plot для данных ω , τ и нижней перфорации

	nkt	perf_down	perf_up	a	<u>omega</u>	phi	<u>tau</u>	Q	p	D
nkt	1.000000	0.156094	0.154510	0.094372	-0.052796	-0.129449	-0.317267	0.163955	0.130157	0.015542
<u>perf_down</u>	0.156094	1.000000	0.999996	0.376104	<u>-0.698528</u>	0.374676	<u>0.565170</u>	-0.242295	0.103585	0.220112
perf_up	0.154510	0.999996	1.000000	0.375680	-0.698377	0.374594	0.565550	-0.242368	0.102648	0.219872
a	0.094372	0.376104	0.375680	1.000000	-0.732671	0.383429	0.647990	-0.002652	-0.149614	0.101717
omega	-0.052796	-0.698528	-0.698377	-0.732671	1.000000	-0.584136	-0.809716	0.196885	0.107733	-0.249138
phi	-0.129449	0.374676	0.374594	0.383429	-0.584136	1.000000	0.449746	-0.222497	0.086682	0.147046
tau	-0.317267	0.565170	0.565550	0.647990	-0.809716	0.449746	1.000000	-0.152810	-0.122660	0.134363
Q	0.163955	-0.242295	-0.242368	-0.002652	0.196885	-0.222497	-0.152810	1.000000	-0.477769	-0.922068
p	0.130157	0.103585	0.102648	-0.149614	0.107733	0.086682	-0.122660	-0.477769	1.000000	0.456341
D	0.015542	0.220112	0.219872	0.101717	-0.249138	0.147046	0.134363	-0.922068	0.456341	1.000000

Рис. 6(б) Численные значения корреляций для данных коэффициентов и геометрии трещины

На данном этапе были получены коэффициенты кривой (1) к хаммер-эффектам в количестве 90. Проведен анализ этих коэффициентов, очищенные выбросы. Было выявлено, что коэффициент ω имеет линейную зависимость от размера перфорации трещины.

Работа была продолжена с показаниями датчиков давления во время ГРП и рассмотрены другие параметры ГРП, которые имеются в отчетах.

В нашей базе имелось было 168 отчетов по ГРП с различных месторождений. Сложность автоматического сбора была в том, что отчеты имели разный формат. Поэтому сбор данных осуществлялся вручную.

Были собраны следующие параметры: тип ГРП (замещение, мини ГРП, ОГРП), ISIP, эффективность жидкости, давление закрытие устье, давление закрытие забой, потери давление на трение, градиент разрыва, азимут, общий объем закаченной жидкости, давление начальное, давление конечное, давление среднее, перфорация верхняя\нижняя, НКТ, разность между 1 и последним портом скважины.

В связи с разными форматами отчетов, не все параметры для каждой скважины удалось собрать. Поэтому в датасете присутствует различное количество пропусков по параметрам: ISIP – 13, эффективность жидкости – 110, давление закрытия устье – 109, давление устье забой - 139, азимут – 129, градиент разрыва – 144, давление начальное\конечное – 67. Можно заметить, что некоторые параметры имеют больше половины пропусков, мы не обращали на них сильного влияние, но ниже по ним будет построения матрица корреляций.

На Рис. 7 приведена тепловая карта корреляции Пирсона параметров между друг другом.

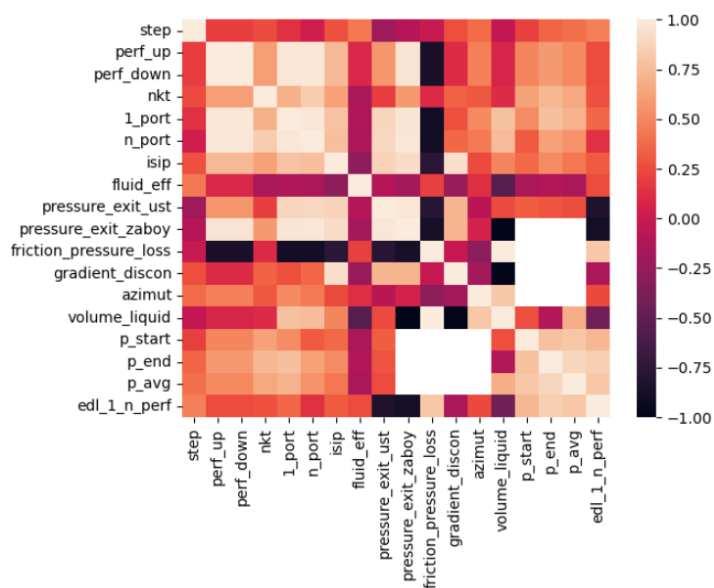


Рис. 7 Heatmap корреляции Пирсона между собранными параметрами

Обратив внимание на корреляцию данных с верхней перфорацией (perf_up) по абсолютному значению можно выделить ISIP, начальное давление, среднее давление и конечное давление. Остальные заметные по корреляции параметры не были выделены в связи большого количества в них пропусков (то есть, не репрезентативностью).

Ниже на Рис. 8 (а-б) приведены Scatter plots и численное значение корреляции выделенных параметров и нижней перфорации.

Проведен статистический тест, в рамках которого была посчитана корреляция Спирмана, Пирсона и Кендала между вышеперечисленными параметрами, и оценена p-value для каждого из них. В качестве α было взято значение 0.05, выше которого мы отклоняли нулевую гипотезу о том, что корреляции нет. Таким образом, вычисляли статистически значимые корреляции.

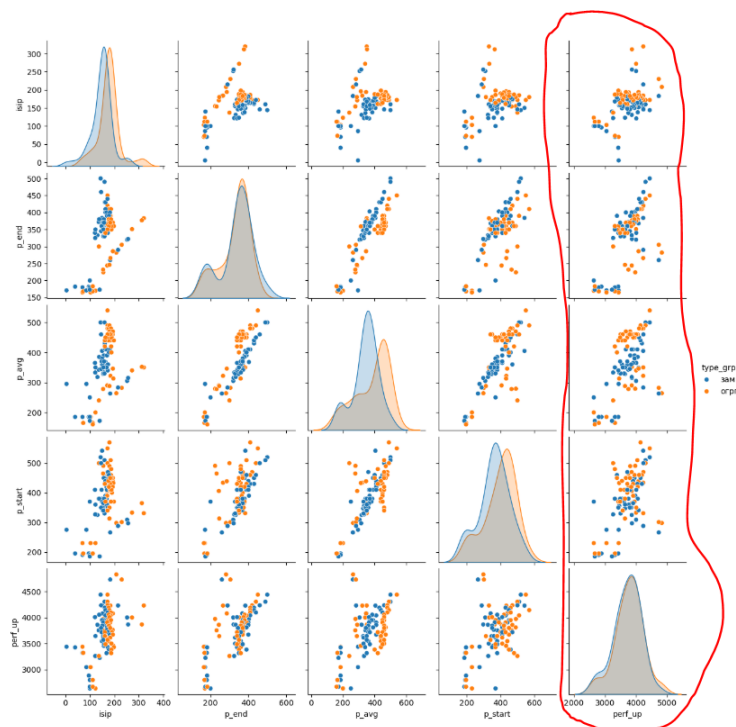


Рис. 8 (а) Pairplot зависимости ISIP, начального\среднего\конечного давления и верхней перфорации. Оранжевым выделены значения на ОГРП, синим – на замещении.

	perf_up	isip	p_start	p_avg	p_end
perf_up	1.000000	0.737119	0.498248	0.511998	0.584464
isip	0.737119	1.000000	0.372157	0.436847	0.520657
p_start	0.498248	0.372157	1.000000	0.811634	0.773809
p_avg	0.511998	0.436847	0.811634	1.000000	0.883614
p_end	0.584464	0.520657	0.773809	0.883614	1.000000

Рис. 8 (б) Численное значение зависимости ISIP, начального\среднего\конечного давления и верхней перфорации.

Этот результат наталкивает на мысль, что с увеличением количества данных есть вероятность того, что мы сможем наблюдать корреляцию перфорации скважины с ISIP, а также с начального, среднего и конечно давления после ГРП.

Помимо вышесказанного, была проделана работа по сопоставлению графиков кепстра и хаммер-эффекта, для нахождения «интересных точек».

Сопоставив графики хаммер-эффекта и кепстра после очистки от шумов, а также используя информацию о конструкции скважины, становится возможно определить скорость распространения звуковой волны и обнаружить точки инициации трещины при проведении повторного ГРП.

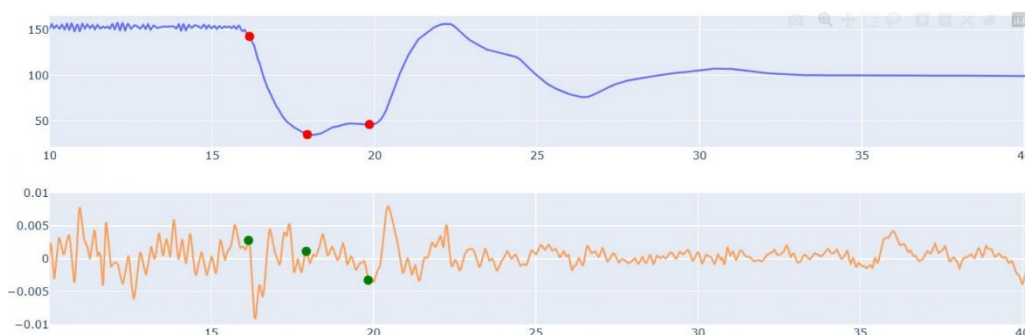


Рис. 9 Анализ хаммер-эффекта.

Для наилучшего результата требуется запись с высокочастотного датчика давления с характеристиками порядка 100Гц.

Ведется исследовательская работа по уточнению модели определения точек образования трещин, для чего требуется большой объем практических данных.

В этой части работы было обработано 168 скважин, с которых были собраны различные параметры после ГРП. В связи с различными форматами отчета, в данных было значительное количество пропусков по различным параметрам, поэтому были проанализированы ISIP, начальное\среднее\конечное давление. Анализ и статистические тесты показали, что на небольшом количестве данных видна численная и визуальная корреляция этих параметров с перфорацией скважины. Для уточнения данных требуется увеличения данных и создание более репрезентативной выборки.

Список литературы

1. Байков В.А. К оценке геометрических параметров трещины гидроразрыва пласта / В.А. Байков, Г.Т. Булгакова, А.М. Ильясов, Д.В. Кашапов // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2018. – № 5. – С. 64–75.
2. Ляпидевский В. Ю., Неверов В. В., Кривцов А. М. Математическая модель гидроудара в вертикальной скважине // Сиб. электрон. матем. изв. 2018. №15. С. 1687–1696
3. Башмаков Р.А. Собственные колебания жидкости в скважине, сообщающейся с пластом, при наличии трещины ГРП / Р.А. Башмаков, Д.А. Насырова, В.Ш. Шагапов // Прикладная математика и механика. – 2022. – Т. 86. – № 1. – С. 88–104.
4. Шагапов В.Ш. Затухающие собственные колебания жидкости в скважине, сообщающейся с пластом / В.Ш. Шагапов, Р.А. Башмаков, Г.Р. Рафикова, З.З. Мамаева // Прикладная механика и техническая физика. – 2020. – №. 4. – С. 1–14.

5. Шагапов В.Ш. Анализ коллекторских характеристик призабойной зоны пласта, подверженного гидравлическому разрыву по собственным колебаниям столба жидкости в скважине / В.Ш. Шагапов, Г.Р. Рафикова, Р.А. Башмаков, З.З. Мамаева // Инженерно–физический журнал. – 2023. – Т. 96. – № 2. – С. 281–288.

6. Korkin R. High Frequency Pressure Monitoring and Data Analytics for Stimulation Efficiency Determination: New Perspectives or Potential Limits / R. Korkin, S. Parkhonyuk, A. Fedorov, D. Badazhkov, A. Kabannik // The Woodlands, Texas, USA. – February 2020. doi: <https://doi.org/10.2118/199762-MS>

7. Oppenheim A. V. Digital Signal Processing / Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer. - PRENTICE HALL, INC. , New Jersey, 1979

8. Shijie, D. A diagnostic model for hydraulic fracture in naturally fractured reservoir utilising water-hammer signal /D. Shijie, Y. Liangping, L. Xiaogang. Text: electronic. / Research Square, 2024. – P.45 URL: https://www.researchgate.net/publication/379798861_A_diagnostic_model_for_hydraulic_fracture_in_naturally_fractured_reservoir_utilising_water-hammer_signal

9. Sheludko, S. Machine-Learning Assisted Analysis of Frac Water Hammer / S. Sheludko, E. Crawford, M. Oparin, F. Aleid Text: electronic. // Paper presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, 2024.–P. 11 – URL: <https://onepetro.org/SPEHFTC/proceedings-abstract/24HFTC/24HFTC/D031S007R005/540625>

References

1. Baikov V.A. To the estimation of the geometric parameters of the hydraulic fracturing crack / V.A. Baikov, G.T. Bulgakova, A.M. Ilyasov, D.V. Kashapov // Izvestiya of the Russian Academy of Sciences. Fluid Mechanics. – 2018. – No. 5. – Pp. 64–75.

2. Lyapidevsky V. Yu., Neverov V. V., Krivtsov A. M. Mathematical model of hydro-impact in a vertical well // Sib. electron. mat. izv. 2018. No. 15. Pp. 1687–1696

3. Bashmakov, R.A. Natural Oscillations of a Fluid in a Well Communicating with a Reservoir in the Presence of a Hydraulic Fracture / R.A. Bashmakov, D.A. Nasyrova, and V.Sh. Shagapov // *Applied Mathematics and Mechanics*. – 2022. – V. 86. – No. 1. – Pp. 88–104.

4. Shagapov V.Sh. Damped natural oscillations of a fluid in a well communicating with a reservoir / V.Sh. Shagapov, R Bashmakov, G.R. Rafikova, Z.Z. Mamaeva // *Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2020. – No. 4. – Pp. 1–14.

5. Shagapov, V.Sh. Analysis of the reservoir characteristics of the bottom-hole zone of a fractured reservoir based on the natural oscillations of the fluid column in the well / V.Sh. Shagapov, G.R. Rafikova, R.A. Bashmakov, and Z.Z. Mamaeva // *Engineering and Physics Journal*, 2023, Vol. 96, No. 2, pp. 281-288.

6. Korkin R. High Frequency Pressure Monitoring and Data Analytics for Stimulation Efficiency Determination: New Perspectives or Potential Limits / R. Korkin, S. Parkhonyuk, A. Fedorov, D. Badazhkov, A. Kabannik // The Woodlands, Texas, USA. – February 2020. doi: <https://doi.org/10.2118/199762-MS>

7. Oppenheim A. V. Digital Signal Processing / Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer. - PRENTICE HALL, INC., New Jersey, 1979

8. Shijie, D. Diagnostic model of hydraulic fracturing of a reservoir with natural fracturing using a hydrodynamic shock signal /D. Shijie, Yu. Liangping, L. Xiaogang. Text: electronic. / Research Square, 2024. – P.45 URL: https://www.researchgate.net/publication/379798861_A_diagnostic_model_for_hydraulic_fracture_in_naturally_fractured_reservoir_utilising_water-hammer_signal

9. Sheludko, S. Analysis of Hydraulic Shock During Hydraulic Fracturing Using Machine Learning / S. Sheludko, E. Crawford, M. Oparin, and F. Aleid. // Report presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, 2024. - P. 11 - URL: <https://onepetro.org/SPEHFTC/proceedings-abstract/24HFTC/24HFTC/D031S007R005/540625>