

# СЕКЦИЯ 1

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

---

---

*Д. Ю. ШЕНГЕЛИЯ, И. Г. ЗАХАРОВА*

*Тюменский государственный университет, г. Тюмень*

**УДК 004.94**

### **АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗБРОСА В ДАННЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН СЛОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ**

**Аннотация.** В работе представлен комплексный анализ характеристик разброса в данных гидродинамических исследований скважин сложной конструкции, включающей горизонтальные участки и многостадийный гидроразрыв пласта. Рассмотрены факторы, вызывающие разброс данных и позволяющие выявлять их источники и оценивать влияние на точность определения пластовых параметров, а также приведены результаты применения методов фильтрации данных, позволивших успешно интерпретировать кривую восстановления давления скважины с многостадийным разрывом пласта.

**Ключевые слова:** гидродинамические исследования скважин, скважины сложной конструкции, факторы разброса в данных, фильтрация данных.

**Введение.** Гидродинамические исследования скважин являются одним из основных методов получения информации о фильтрационно-емкостных свойствах продуктивных пластов и эффективности работы скважин в нефтегазовой отрасли. Результаты этих исследований используются для уточнения геологических моделей, оптимизации режимов эксплуатации скважин, а также для принятия решений по разработке месторождений.

Традиционно гидродинамические исследования проводились в вертикальных скважинах с относительно простой конструкцией. Однако в последние десятилетия наблюдается тенденция к увеличению доли скважин со сложной архитектурой, таких как горизонтальные, многозабойные, многоствольные или разветвленные скважины. Подобные конструкции скважин позволяют значительно увеличить охват продуктивного пласта и дебит, но в то же время усложняют процесс проведения и интерпретации гидродинамических исследований.

В работах [1-2] рассматривается проблема шума в данных по давлению при исследовании скважин. В первом исследовании показано, что шум в данных по давлению и дебиту может влиять на расчетные параметры и их доверительные интервалы, причем последние линейно растут с увеличением величины шума. Однако исследование также показывает, что обычные методы анализа скважинных испытаний могут надежно справиться с дрейфом манометра и шумом дебита. С другой стороны, метод, описанный во втором исследовании, основан на полиномиальном разложении Лежандра для аппроксимации данных и усеченную стратегию для уменьшения шума с акцентом на получение стабильных численных производных. В работе [3] предлагает метод сглаживания приливного эффекта в данных по давлению при испытании скважин с помощью преобразования Фурье и дискретного синус-преобразования. Наконец, в работе [4] представлен метод интерпретации параметров пласта и ствола скважины при наличии шума, используя сегментированную экспоненциальную функцию и алгоритм деконволюции по давлению и дебиту.

**Проблема исследования.** Одной из ключевых проблем при исследовании скважин со сложной конструкцией является наличие повышенного уровня шумовых помех в получаемых данных. Источниками этих шумов могут быть турбулентные режимы течения флюида, вибрация оборудования, электрические наводки и другие факторы. Влияние шумовой составляющей на результаты гидродинамических исследований может быть весьма существенным, приводя к искажению кривых восстановления давления, неправильной оценке фильтрационно-емкостных свойств пласта и, как следствие, к принятию ошибочных решений при разработке месторождения.

В настоящей работе ставится цель провести комплексный анализ шумовой составляющей в данных ГДИС сложной конструкции, включая скважины с горизонтальным участком ствола и многостадийным гидроразрывом пласта. Для достижения данной цели определены следующие задачи:

1. Анализ факторов, влияющих на разброс данных манометрических замеров давления при ГДИС скважин сложной конструкции.
2. Обзор методов и подходов для выявления и устранения разброса данных, связанных с конструктивными особенностями скважин.
3. Применение наиболее результативных подходов для последующей интерпретации кривых снижения/восстановления давления (КСД/КВД) в ГДИС.

**Материалы и методы.** В работах [5-6] рассматриваются факторы, которые влияют на разброс данных при замерах с манометра. Среди них наиболее влияющими являются следующие:

***Нестационарность потока.*** Нестационарность потока, вызванная пульсациями давления от насосов, турбулентностью, приводящей к флуктуациям скорости и давления, а также переходными режимами при запуске или остановке элементов системы, является ключевым фактором, влияющим на разброс данных в замерах с манометра.

***Неравномерность поля скоростей и давлений.*** Этот фактор также может существенно влиять на разброс данных в замерах с манометра. Причинами этого могут быть локальные сопротивления в трубопроводе, влияние входных/выходных участков и осесимметричность потока. Отклонения от распределения скоростей и давлений в потоке могут возникать из-за неравномерности входного потока, геометрических особенностей трубопровода или других факторов. Это также может влиять на показания манометра.

***Физические свойства среды.*** Показания манометра могут изменяться и иметь значительный разброс из-за влияния различных факторов, связанных с физическими свойствами и составом протекающей среды, таких как изменения вязкости, плотности, наличие газовой фазы и изменения температуры, которые, в свою очередь, приводят к неравномерному распределению скоростей и давлений в потоке измеряемой среды.

***Внешние воздействия.*** Колебания атмосферного давления, температурные деформации элементов трубопровода и воздействие внешних акустических полей являются внешними воздействиями, которые могут вносить дополнительный разброс в показания манометра при измерениях.

Таким образом, для обеспечения точности и стабильности замеров с использованием манометра необходимо учитывать и, по возможности, минимизировать влияние всех перечисленных факторов. Это может быть достигнуто путем тщательного проектирования и

настройки экспериментальной установки, а также применения соответствующих методов обработки данных.

**Результаты исследования.** На рис. 1 приведен график замеров с манометра по скважине X (ось абсцисс — время работы скважины, ось ординат — давление, измеряемое в кгс/см<sup>2</sup>).

Предварительный анализ графика показывает, что присутствие свободного газа в притоке скважины приводит к значительному искажению данных забойного давления. Забойное давление оказывается выше, чем оно должно быть в период КВД, когда скважина остановлена. Наличие газа влияет на плотность флюида и, следовательно, на градиент давления, что приводит к завышенным значениям забойного давления.

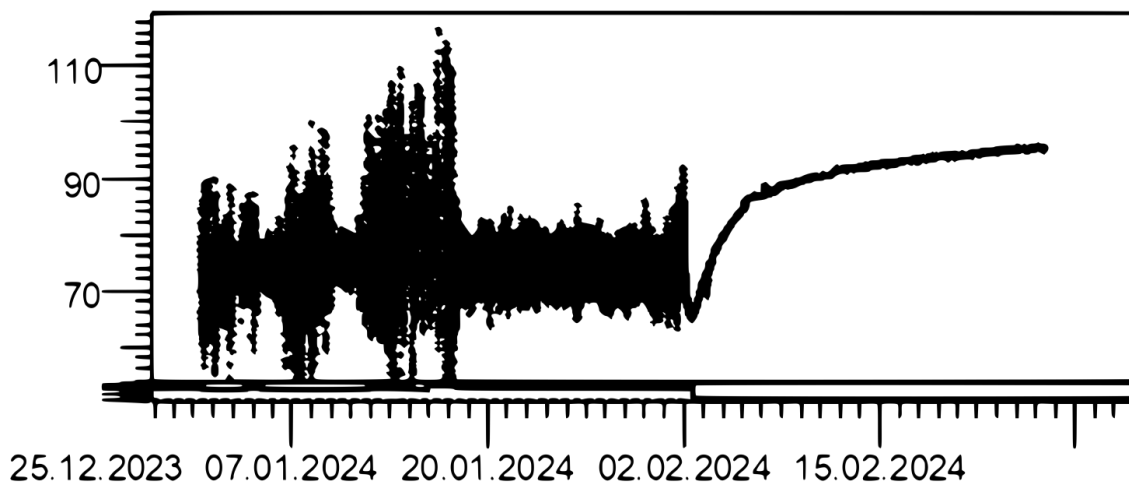


Рис. 1. График замеров с манометра по скважине X

Также, на кривой давления присутствуют множественные искажения. Это указывает на то, что кривая забойного давления имеет значительные отклонения от ожидаемой формы. Эти отклонения или искажения могут быть вызваны различными факторами, такими как неоднородности в притоке, нарушения режима течения, влияние газа или механические проблемы с оборудованием. Это приводит к тому, что жидкость поступает в скважину неравномерно из разных участков пласта, искажая форму кривой давления.

Нарушения режима течения могут быть связаны с изменениями в скорости потока жидкости или газа, возникновением турбулентности или образованием газовых карманов в стволе скважины. Эти явления вносят дополнительные возмущения в показания забойного давления.

После остановки скважины газовая фаза начинает отделяться от жидкой фазы и всплывать к устью скважины. Это явление называется сегрегацией фаз. Указание на «длительную сегрегацию фаз» означает, что процесс разделения фаз занимает значительное время, что может повлиять на характер кривой восстановления давления. Чем дольше происходит сегрегация фаз, тем больше искажения могут возникнуть в данных давления при восстановлении.

Таким образом, предварительный анализ указывает на наличие проблем с влиянием газа, нарушениями режима течения и сегрегацией фаз, что приводит к искажениям данных забойного давления. Эти факторы необходимо учитывать при дальнейшей интерпретации данных для получения достоверной информации о пласте и скважине.

В ходе исследования, проведенного в работах [7-8], были рассмотрены различные методы и подходы к фильтрации данных ГДИС. После тщательного сравнительного анализа были выявлены наиболее эффективные и результативные методы фильтрации. Для оценки качества фильтрации были использованы две метрики — отношение «сигнал–шум» (SNR) и среднеквадратичная ошибка (RMSE). Первая метрика характеризует степень подавления случайных шумов и помех при обработке замеров давления, а вторая — отражает среднее отклонение отфильтрованных значений давления от истинных.

В табл. 1 приведены результаты фильтрации для сегмента КВД. Среди классических методов наиболее результативным оказался фильтр Калмана. Данный метод, основанный на рекурсивном байесовском оценивании, продемонстрировал высокую точность и устойчивость в задаче фильтрации данных ГДИС, позволяя эффективно отфильтровывать шумы при сохранении истинного сигнала.

В категории современных численных методов наилучшие результаты показали метод опорных векторов, применяемый в задаче регрессии, и методы на основе автокодировщиков — мощного класса нейронных сетей для обучения без учителя. В частности, полносвязный автокодировщик (Dense [Denoising] Autoencoder, DAE) и сверточный автокодировщик (Convolutional Autoencoder, CAE) продемонстрировали высокую эффективность в задаче фильтрации и восстановления зашумленных данных ГДИС. Они способны обучаться на больших объемах данных и выделять существенные признаки/паттерны, позволяющие эффективно реконструировать «очищенный» сигнал.

Таблица 1

Сравнительная таблица результатов фильтрации сегмента КВД

Метод фильтрации	Параметры	SNR, дБ	RMSE, кгс/см <sup>2</sup>
Фильтр Калмана	Q = 0.8, R = 4	64.1564	0.1621
	Q = 0.7, R = 3.7	64.1315	0.1643
	Q = 0.8, R = 4.3	64.1253	0.1652
Метод опорных векторов (ядро — «rbf»)	C = 76000, ε = 0.001	63.7512	0.1693
	C = 74000, ε = 0.001	63.7479	0.1704
	C = 68000, ε = 0.01	63.7443	0.1713
DAE	–	66.3274	0.1465
CAE	–	66.3563	0.1453

Рассмотрим случай интерпретации КВД, отфильтрованной при помощи сверточного автокодировщика.

На рис. 2-4 приведены графики интерпретации КВД при 4 трещинах (длина трещины на малом эллипсе, расстояние между трещинами на большом эллипсе, а также фазовая проницаемость). Согласно графикам, длина трещины составляет 80 метров, расстояние между трещинами — 345 метров, фазовая проницаемость — 0.74 мД. Скин-фактор, который учитывает дополнительное сопротивление притоку флюида в ствол скважины, равен 0.33.

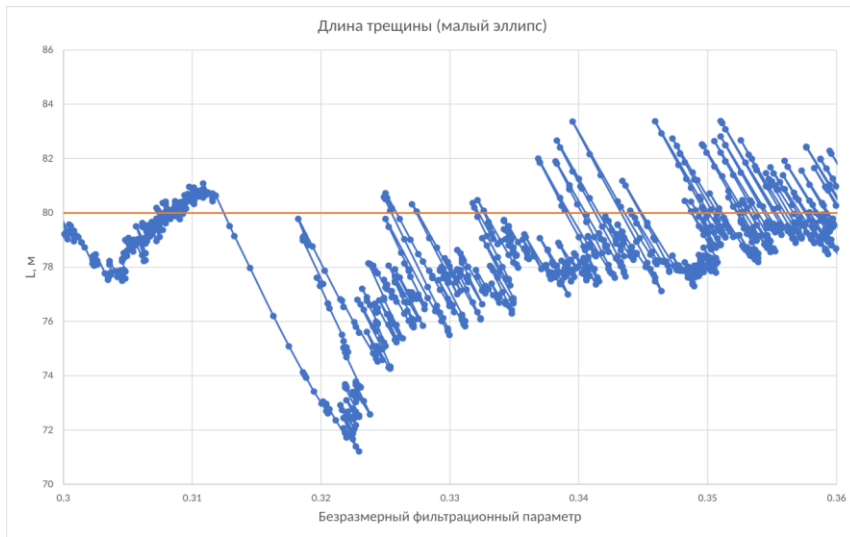


Рис. 2. Длина трещины (малый эллипс)

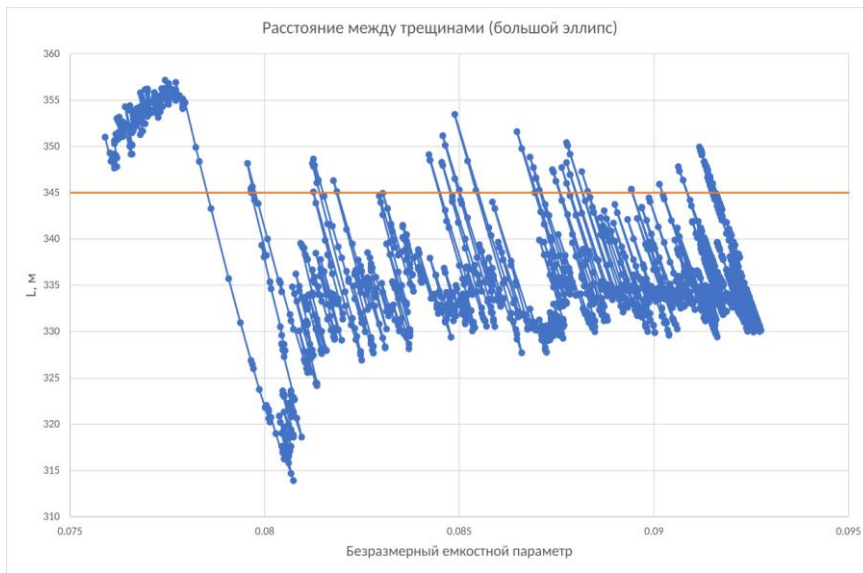


Рис. 3. Расстояние между трещинами (большой эллипс)

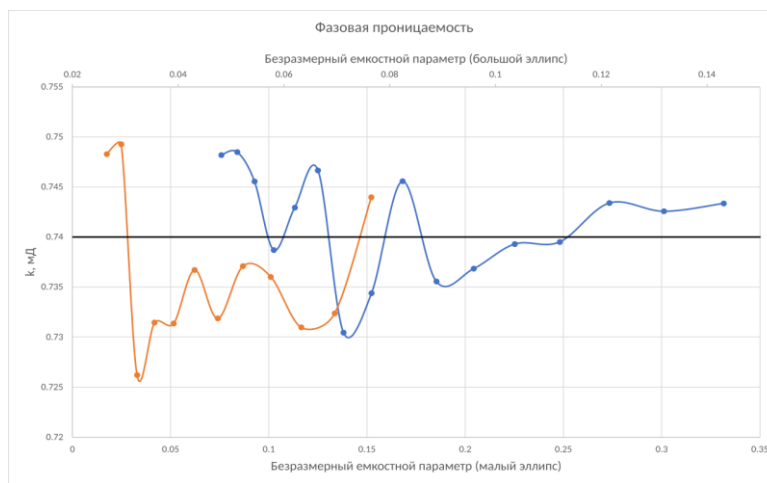


Рис. 4. Фазовая проницаемость

Для того, чтобы удостовериться в корректности интерпретации, был проведен прямой расчет при помощи ПО для исследования ГДИС на неустановившемся давлении KARPA Saphir. На рис. 5 и 6 приведены фактические замеры КВД и билогарифмический график производной Бурде как классический инструмент интерпретации ГДИС. Прямой расчет позволяет проверить соответствие интерпретированных параметров пласта реальным замерам давления в процессе испытания. Билогарифмический график наглядно демонстрирует характерные особенности и переходные периоды кривой давления (различные режимы притока, такие как чисто радиальный приток, плоскопараллельный приток из трещин, сферический приток из трещин и др.), что облегчает диагностику моделей пласта и трещин. Анализ формы производной помогает определить тип модели пласта — однородный или составной, с трещинами или без, а также оценить параметры трещин и границ пласта.

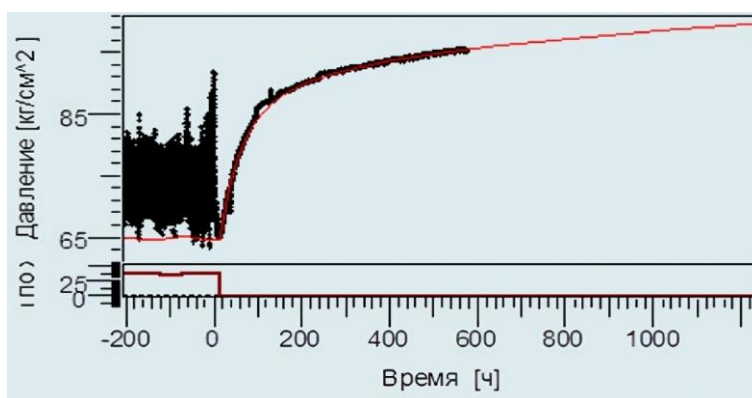


Рис. 5. График фактических замеров КВД

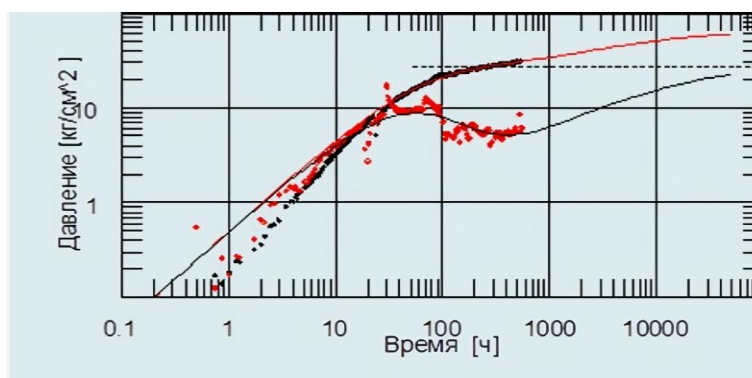


Рис. 6. График фактических замеров КВД и билогарифмический график производной Бурде

Результаты прямого компьютерного моделирования, проведенного в программном обеспечении KARPA Saphir, выявили высокий уровень соответствия между расчетными данными и фактическими замерами кривой восстановления давления (КВД), а также ее билогарифмической производной, что свидетельствует о точности интерпретации параметров пласта и скважины, полученных с помощью данного ПО.

Для классического метода интерпретации КВД с целью однозначного определения параметров пласта и скважины необходимо, чтобы скважина находилась в остановленном со-

стоянии на кривой восстановления давления в течение около 30 000 часов. Такой продолжительный период остановки требуется для получения достоверных результатов интерпретации стандартными методами и обусловлен выходом на радиальный режим фильтрации.

Однако при использовании собственного программного обеспечения компании для интерпретации кривой восстановления давления достаточно гораздо меньшего времени остановки скважины — около 1000 часов, что дает возможность быстрее получить необходимые данные о параметрах пласта и скважины.

**Заключение.** В работе был проведен комплексный анализ факторов разброса данных при гидродинамических исследованиях скважин сложной конструкции. Были рассмотрены такие факторы как нестационарность потока, неравномерность поля скоростей и давлений, влияние физических свойств среды и внешние воздействия.

Для фильтрации зашумленных данных были применены различные методы, включая классические фильтры (фильтр Калмана), методы машинного обучения (метод опорных векторов, автокодировщики). Наилучшие результаты по метрикам отношения сигнал-шум и среднеквадратичного отклонения показали сверточный и полносвязный автокодировщики.

Интерпретация отфильтрованной КВД при помощи собственного ПО позволила определить ключевые параметры пласта и скважины с многостадийным гидроразрывом: длину трещин, межтрещинное расстояние, фазовую проницаемость. Результаты были верифицированы прямым компьютерным моделированием в специализированном ПО Kappa Saphir, продемонстрировав высокую точность интерпретации.

Таким образом, применение современных методов фильтрации данных в сочетании с продвинутыми алгоритмами интерпретации позволяет успешно проводить гидродинамические исследования на скважинах сложной конструкции и получать достоверную информацию о пластовых параметрах, необходимую для оптимизации разработки месторождений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ennaifer A.M. Pressure transient measurement statistics and gauge metrology / A.M. Ennaifer, F. J. Kuchuk — Direct text // Journal of Petroleum Science and Engineering. — Vol. 166. — 2018. — Pp. 531-545.
2. Zhang F. A New Method for De-Noising of Well Test Pressure Data Base on Legendre Approximation / F. Zhang, Y. Zheng, Z. Zhao, Z. Li — Direct text // Mathematics. — Vol. 7. — 2019. — P. 989.
3. Smoothing Tidal Effects in Well Test Pressure Data / de Oliveira, F., Lins, A., Barreto, A. [et al]. — Direct text // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. — 2019. — Vol. 17, № 5. — Pp. 899-902.
4. Hydraulic fracturing test with prefabricated crack on anisotropic shale: Laboratory testing and numerical simulation / Da'an Liu, Xiaoshan Shi, Xin Zhang [et al]. — Direct text // Journal of Petroleum Science and Engineering. — Vol. 168. — 2018. — Pp. 409-418.
5. Есипов Д.В. Математические модели гидроразрыва пласта / Д.В. Есипов, Д.С. Куранаков, В.Н. Лапин, С.Г. Чёрный. — Текст: непосредственный // Вычислительные технологии. — 2014. — Т. 19, № 2. — С. 33-61.
6. Сулейманов Б.А. Интерпретация кривых восстановления давления на основе анализа детерминированных моментов забойного давления / Б.А. Сулейманов, О.А. Дышин, Р.Ж. Исаев. — Текст: непосредственный // Нефтепромысловое дело. — 2014. — № 1. — С. 12-23.
7. Ansari H.R. An improved support vector regression model for estimation of saturation pressure of crude oils / H. R. Ansari, A. Gholami — Direct text // Fluid Phase Equilibria. — Vol. 402. — 2015. — Pp. 124-132.
8. Jiang J. A convolutional autoencoder method for simultaneous seismic data reconstruction and denoising / J. Jiang, H. Ren, M. Zhang. — Direct text // IEEE geoscience and remote sensing letters. — 2021. — Vol. 19.— Pp. 1-5.