

АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА

На правах рукописи

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОЛЬМАТАЦИИ ПОРИСТОЙ
СРЕДЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО
ОБУЧЕНИЯ**

Специальность: 2525.01 – Разработка и эксплуатация
нефтяных и газовых месторождений

Отрасль науки: Технические науки

Соискатель: Абдулмуталибов Тимур Эльманович

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора философии

Баку – 2026

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Нефтегазовая инженерия» Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности.

Научный
руководитель:

доктор философии по техническим
наукам, доцент

Шмончева Елена Евгеньевна

Официальные
оппоненты:

Доктор технических наук, доцент

Гусейнова Наида Исмет гызы

Доктор технических наук, доцент

Халилов Мубариз Севдималы оглы

доктор философии по техническим
наукам

Ахмедова Ульвия Тахир гызы

Диссертационный совет FD 2.03 Высшей Аттестационной Комиссии при Президенте Азербайджанской Республики, действующий на базе Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности.

Председатель
диссертационного
совета:

доктор технических наук, профессор

**Искендеров Эльман Хейрулла
оглы**

Ученый секретарь
диссертационного
совета:

доктор философии по техническим
наукам, доцент

Джаббарова Гюллю Валех гызы

Председатель
научного семинара:

доктор технических наук, доцент

Гамидов Натиг Нейман оглы

Подписи заверяю:

Ученый секретарь АГУНП, доктор философии техническим
наукам, доцент

Алиев Инглаб Намиг оглы



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень её разработанности.

Кольматация пористой среды призабойной зоны пласта относится к числу наиболее распространённых причин ухудшения фильтрационной связи между пластом и скважиной. Накопление твёрдых частиц, образование минеральных и органических осадков, миграция мелкодисперсной фазы, формирование фильтрационной корки, изменение смачиваемости и развитие биологических процессов приводят к уменьшению эффективного сечения поровых каналов. В результате возрастает гидродинамическое сопротивление, снижается проницаемость, ухудшается продуктивность добывающих скважин и приёмистость нагнетательных скважин.

Практическая сложность проблемы заключается в том, что кольматация развивается постепенно и на ранней стадии редко проявляется как однозначно распознаваемое нарушение. В производственных данных она отражается косвенно: через изменение дебита, давления, обводнённости, газового фактора, коэффициента продуктивности, приёмистости, перепада давления и дополнительного сопротивления в призабойной зоне. При этом аналогичные изменения могут возникать вследствие истощения пласта, смены режима работы, остановок скважины, фазовых превращений и технологических воздействий. Поэтому отдельный показатель не может служить достаточным доказательством кольматации; требуется совместная интерпретация нескольких признаков и истории эксплуатации.

Лабораторные исследования керна, гидродинамические исследования скважин, анализ восстановления давления и оценка скин-фактора позволяют диагностировать повреждение пласта, однако чаще характеризуют уже сформировавшееся состояние. Для предупреждения устойчивой потери продуктивности необходим переход от ретроспективной диагностики к ранней оценке риска. Такая постановка особенно важна для крупных фондов скважин, где проведение частых специальных исследований по каждому объекту ограничено экономическими и организационными условиями.

Современные системы промыслового учёта формируют значительные массивы временных рядов. Их использование совместно с методами машинного обучения позволяет выявлять сочетания параметров, предшествующие ухудшению фильтрационных свойств. Однако прямое применение алгоритмов без учёта временной направленности процесса, физического смысла признаков и качества исходных данных может приводить к завышенной оценке точности. Научная задача состоит не только в выборе алгоритма, но и в формировании физически обоснованной целевой переменной, причинно корректного признакового пространства, временной схемы проверки и понятной для инженера вероятностной интерпретации результата.

Анализ выполненных исследований показал, что механизмы повреждения пласта и методы диагностики изучены достаточно подробно, а методы машинного обучения активно применяются при прогнозировании дебита, давления, осложнений и технологических показателей. Вместе с тем недостаточно разработана единая методология, которая связывает производственные временные ряды, диагностические параметры призабойной зоны, раннее прогнозирование риска кольматации и регламент инженерного применения результатов. Указанное обстоятельство определяет актуальность диссертационной работы.

В опубликованных исследованиях физические модели кольматации обычно описывают перенос и удержание частиц, изменение пористости и проницаемости, формирование осадков и дополнительного гидродинамического сопротивления. Их преимуществом является причинная интерпретируемость, однако практическое применение ограничивается необходимостью задавать параметры порового пространства, кинетические коэффициенты и свойства частиц, которые редко измеряются в ходе обычной эксплуатации. Статистические и расчётно-аналитические методы проще использовать по промысловым данным, но они преимущественно фиксируют уже возникшее отклонение. Методы машинного обучения способны

учитывать многомерную и нелинейную динамику, однако без временной проверки и инженерного ограничения признаков могут давать завышенную оценку качества.

Поэтому в диссертации принят комбинированный подход. Физические представления используются для выбора диагностических показателей и объяснения результата, а производственные временные ряды — для формирования прогностических признаков. Такой подход не отождествляет снижение дебита с кольматацией и не рассматривает расчётный сигнал как окончательный диагноз. Его назначение состоит в раннем выявлении устойчивого сочетания изменений, которое требует проверки по истории эксплуатации, режиму работы, данным исследований скважины и состоянию призабойной зоны.

Существенная особенность принятого подхода состоит в том, что результат модели рассматривается не как самостоятельный технологический параметр, а как сигнал риска, подлежащий сопоставлению с историей работы скважины. На ранних этапах кольматации изменения дебита, давления, газового фактора и обводнённости могут быть слабо выраженными и неустойчивыми. Поэтому прогноз должен опираться не на резкое изменение одного показателя, а на согласованную динамику нескольких параметров во времени. Такая постановка снижает риск ошибочной диагностики и одновременно показывает инженеру, какие группы параметров требуют первоочередной проверки.

Принятое в работе понимание риска не заменяет классическую диагностику, а дополняет её. Оно позволяет целенаправленнее использовать гидродинамические исследования, режимные данные и сведения о состоянии призабойной зоны. Это особенно важно для крупного фонда скважин, где проведение частых специальных исследований по каждому объекту практически затруднено. Ранняя оценка риска помогает сначала выделять наиболее проблемные объекты и обосновывать очередность дополнительных исследований и профилактических мероприятий.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка и проверка методологии раннего прогнозирования риска кольтатации пористой среды призабойной зоны пласта на основе производственных временных рядов и методов машинного обучения для повышения эффективности контроля состояния скважин и обоснования технологических решений при разработке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. выполнен анализ механизмов кольтатации и установлено их влияние на фильтрационно-ёмкостные свойства коллектора, продуктивность добывающих и приёмистость нагнетательных скважин;

2. обоснована система диагностических параметров, характеризующих состояние призабойной зоны, включая проницаемость, скин-фактор, пластовое давление, коэффициент продуктивности, приёмистость, перепад давления и производные режимные показатели;

3. сформирована база производственных временных рядов, отражающая динамику работы скважины и изменение её фильтрационных характеристик;

4. разработан кольтатационный индекс, связывающий фактическую продуктивность скважины с её расчётным потенциалом;

5. сформировано причинно корректное признаковое пространство с учётом лаговых параметров, скользящих статистик, темпов изменения и режимных отношений;

6. выполнены подбор и временная проверка моделей-кандидатов; для итогового прогнозного конвейера выбрана L1-регуляризованная логистическая регрессия, прогнозирующая событие $IC < 0,90$ на горизонте 14 суток;

7. оценены ранжирующая способность, калибровка, чувствительность и межскважинная переносимость итоговой модели с использованием независимого тестового периода G12 и внешней выборки G09;

8. разработан практический регламент использования прогноза для мониторинга фонда скважин и формирования сигналов, требующих инженерной проверки.

Объект исследования. Добывающие и нагнетательные скважины нефтегазовых месторождений, в которых наблюдается ухудшение фильтрационных свойств призабойной зоны.

Предмет исследования. Методы формирования диагностических показателей и прогнозирования риска кольматации пористой среды на основе анализа производственных временных рядов.

Методы исследования. Использованы методы промыслового и гидродинамического анализа, статистической обработки и корреляционного анализа, причинно корректного формирования признаков, L1- и L2-регуляризованной логистической регрессии, линейного метода опорных векторов и случайного леса. Применены хронологическое разделение данных с двумя 30-суточными защитными интервалами, скользящая временная валидация с последовательным расширением обучающего окна (rolling-origin), медианная импутация, робастное масштабирование, автоматическое балансирование классов, калибровка вероятностей методом Платта, абляционный анализ, блочный бутстрэп и локальная интерпретация отдельных прогнозов.

При работе с данными основным принципом являлось сохранение временной причинности. Для даты прогноза t использовались только сведения, доступные к этой дате, а целевая переменная определялась по будущему интервалу (t ; $t+14$]. Итоговая конфигурация модели, калибратор и эксплуатационный порог выбирались по обучающей и валидационной частям; тестовая выборка не использовалась для настройки.

Достоверность результатов обеспечивается использованием фактических производственных данных, проверкой физической согласованности параметров, строгой разметкой будущего события, хронологическим разделением с защитными интервалами, независимой тестовой выборкой G12,

сравнением моделей-кандидатов, анализом временных подпериодов, блочной оценкой неопределённости и внешним переносом зафиксированного конвейера $G12 \rightarrow G09$ без переобучения на $G09$.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методология раннего прогнозирования риска кольматации, объединяющая промысловые временные ряды, диагностические параметры и вероятностную модель.

2. Кольматационный индекс как инженерно интерпретируемый показатель отклонения фактической продуктивности скважины от её расчётного потенциала.

3. Причинно корректное признаковое пространство, формируемое только по информации, доступной к моменту прогноза.

4. Итоговая $L1$ -регуляризованная логистическая модель с калибровкой Платта и эксплуатационным порогом, выбранным на предсобытийной части валидационной выборки при ограничении $FPR \leq 0,15$.

5. Подход к оценке устойчивости и инженерной интерпретации модели на основе абляционного анализа, ненулевых коэффициентов, локальных вкладов признаков и проверки последовательных временных подпериодов.

6. Регламент ежедневного применения и переноса прогностического конвейера, включающий контроль данных, расчёт 19 признаков, получение калиброванной вероятности, формирование предупреждения и обязательную инженерную проверку.

Научная новизна исследования:

1. Для рассматриваемого объекта предложена строгая схема формирования целевой переменной: событие фиксируется, если кольматационный индекс IC становится ниже 0,90 в будущем интервале $(t; t+14]$, при полном исключении текущей даты и будущей информации из признаков.

2. Сформирован компактный набор из 19 причинно допустимых признаков, объединяющий режим эксплуатации, дебиты нефти, газа и воды, обводнённость, газовые отношения,

расчётный потенциал, текущий и предыдущий IC, его изменение и признаки нерегулярности наблюдений.

3. Обоснован выбор L1-регуляризованной логистической регрессии с $C = 0,1$ как итоговой модели, обеспечивающей встроенное разреживание коэффициентов, вероятностный выход и прямую инженерную интерпретацию при ограниченном объёме временного ряда.

4. Предложена последовательная процедура выбора модели, калибровки Платта и эксплуатационного порога на предсобытийном подмножестве валидации с последующей независимой оценкой на G12 и внешним переносом на G09.

5. Выполнена совместная оценка ранжирования, калибровки, чувствительности к составу признаков, временной неоднородности и межскважинной переносимости, что позволило количественно определить границы практического применения модели.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическое значение работы состоит в формализации кольматационного ухудшения как будущего вероятностного события, связанного с динамикой инженерно интерпретируемого индекса IC. Практическое значение определяется возможностью ежедневного ранжирования дат и скважин по риску на горизонте 14 суток с контролем ложных ранних предупреждений.

Разработанный конвейер может использоваться как дополнительный аналитический модуль промыслового мониторинга. Основной порог $\tau^* = 0,4446$ формирует сигнал для проверки, но не является автоматическим диагнозом или командой на технологическое воздействие. Инженер сопоставляет предупреждение с режимом работы, качеством измерений, дебитами, давлением, обводнённостью, газовыми отношениями и историей операций.

Практическое применение предусматривает ежедневное обновление данных, расчёт неизменного набора признаков, медианную импутацию и масштабирование параметрами обучения, получение исходного скоринга L1-модели, калибровку Платта, сравнение с порогом и ведение журнала

предупреждений. При изменении распределений выполняются контроль калибровки, проверка порога и, при необходимости, переобучение.

Личный вклад соискателя. Соискателем выполнены постановка задачи, систематизация механизмов кольматации, подготовка и объединение исходных производственных данных, расчёт кольматационного индекса, формирование временных признаков и целевых переменных, построение и проверка моделей, интерпретация результатов, а также разработка эксплуатационного регламента. В работах, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежат анализ данных, основные расчёты и обобщение результатов по теме диссертации.

Организация, в которой выполнена работа. Кафедра «Нефтегазовая инженерия» Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследования докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

1. Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в нефтегазовом деле – 2023», посвящённая 75-летию УГНТУ, Уфа, 2023;

2. VII Международная научно-практическая конференция «Булатовские чтения», Краснодар, 2023;

3. Республиканская научная конференция молодых исследователей и докторантов, посвящённая 100-летию со дня рождения общенационального лидера Гейдара Алиева, Баку, 4–5 мая 2023;

4. VI Всероссийская научно-практическая конференция «Нефтегазовое дело, техносферная безопасность, рациональное природопользование: современные реалии», Махачкала, 16–17 мая 2023;

5. научно-практическая конференция «Гейдар Алиев и нефтяная стратегия Азербайджана: достижения нефтегазовой геологии и геотехнологий», Баку, 23–26 мая 2023;

6. международная научно-практическая конференция «Технологии разработки месторождений и моделирование

процессов в нефтегазодобыче», посвящённая памяти академика А.Х. Мирзаджанзаде, Уфа, 2023;

7. SPE Caspian Technical Conference and Exhibition, Баку, 21–23 ноября 2023.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 научных трудов, в том числе 4 научные статьи, 6 материалов конференций и 1 евразийский патент. Две статьи опубликованы в журналах, индексируемых одновременно в базах Scopus и Web of Science, одна работа представлена в материалах конференции, индексируемых в Scopus.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка использованной литературы и двух приложений. Работа включает 9 рисунков, 25 графиков, 51 таблицу, список использованной литературы из 150 наименований и 2 приложения. Диссертационная работа включает в себя следующее количество символов: введение — 13 657, глава I — 52 546, глава II — 90 708, глава III — 41 856, глава IV — 33 121, выводы — 2334. Общее количество символов — 234 222.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность раннего прогнозирования кольматации призабойной зоны пласта, сформулированы цель и задачи, определены объект, предмет и методы исследования. Показано, что применение методов машинного обучения имеет инженерный смысл только при физически обоснованном формировании целевой переменной, строгом соблюдении временной причинности и понятной интерпретации вероятностного результата.

В первой главе систематизированы представления о кольматации пористой среды и повреждении призабойной зоны. Показано, что термин «кольматация» характеризует уменьшение пропускной способности пористой среды вследствие закупоривания или сужения поровых каналов, тогда как повреждение пласта является более широким понятием и включает механические, физико-химические, фазовые, термические и геомеханические причины ухудшения продуктивности. Скин-фактор отражает суммарное дополнительное сопротивление вблизи скважины и не определяет конкретный механизм этого сопротивления.¹

Механическая кольматация связана с проникновением и осаждением частиц, просеиванием в поровых горлышках, образованием мостиков и миграцией тонкодисперсной фазы. Химическая кольматация возникает при выпадении солей и продуктов несовместимости вод. Органические отложения представлены асфальтенами, смолами и парафинами. Коллоидные и эмульсионные процессы определяются устойчивостью дисперсной системы, солёностью, кислотностью и составом флюидов. Биологическая кольматация развивается вследствие роста микроорганизмов и образования биоплёнок. В реальном пласте указанные механизмы часто действуют совместно и усиливают друг друга.²

¹ Civan F. Reservoir Formation Damage: Fundamentals, Modeling, Assessment, and Mitigation. 4th ed. Amsterdam: Elsevier, 2023.

² Khilar K.C., Fogler H.S. Migrations of Fines in Porous Media. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. DOI: 10.1007/978-94-017-0967-6.

В главе рассмотрены модели переноса и осаждения частиц, глубинной фильтрации, изменения проницаемости и дополнительного сопротивления. Физические модели обеспечивают причинное объяснение, но требуют параметров, которые не всегда доступны в промышленных условиях (рис.1).

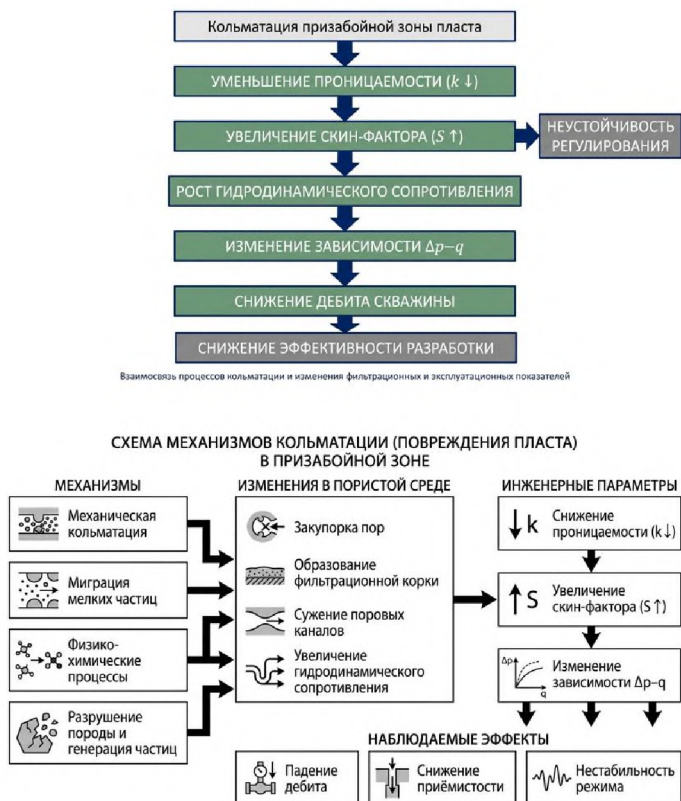


Рисунок 1 – Основные механизмы кольтматации и их связь с фильтрационными параметрами

Модели, основанные на данных, способны выявлять нелинейные взаимосвязи, однако их результат зависит от качества разметки, объёма наблюдений и корректности проверки. Поэтому обоснован гибридный подход: физика процесса определяет допустимые признаки, ограничения и смысл целевой

переменной, а машинное обучение используется для оценки скрытого состояния и вероятности его ухудшения.

Анализ механизмов показал, что одинаковые промышленные проявления могут иметь различную природу. Снижение продуктивности может быть обусловлено механической закупоркой, миграцией собственной мелкодисперсной фазы, набуханием глинистых минералов, соле- и парафиноотложением, эмульсионной или водной блокировкой, а также изменением режима эксплуатации. Поэтому диагноз не может основываться на одном параметре. Для различения причин необходимо сопоставлять динамику дебита, давления, обводнённости, газового фактора, коэффициента продуктивности, приёмистости и дополнительного сопротивления, а также учитывать ремонты, обработки и смену режима работы.

Рассмотренные методы диагностики разделены на прямые и косвенные. Прямые лабораторные методы позволяют оценивать изменение проницаемости, структуру порового пространства, состав осадков и возвратную проницаемость. Гидродинамические исследования и анализ восстановления давления дают интегральную оценку состояния системы «пласт — скважина», но требуют специальных операций и не обеспечивают непрерывного наблюдения. Производственные временные ряды обладают меньшей диагностической однозначностью, однако доступны регулярно и поэтому пригодны для раннего мониторинга. На этой основе сформулировано требование: модель должна оценивать вероятность риска, а окончательное заключение должно приниматься инженером после проверки сигнала.

Выполнен анализ диагностических методов. Керновые фильтрационные испытания позволяют непосредственно определить изменение проницаемости и возвратной проницаемости. Рентгеновская томография, микроскопия и ядерно-магнитный резонанс характеризуют поровое пространство и распределение флюидов. Гидродинамические исследования дают интегральную оценку состояния системы «пласт — скважина». Производственные временные ряды

уступают специальным исследованиям по прямоте физической интерпретации, но обладают преимуществом непрерывного накопления и могут использоваться для раннего скрининга фонда скважин.

Определены основные требования к задаче прогнозирования: целевая переменная должна отражать ухудшение фильтрационной связи; признаки должны быть доступны на момент прогноза; обучающая и проверочная выборки должны разделяться хронологически; вероятность риска должна быть откалибрована; результат должен сопровождаться инженерным объяснением. На основании проведённого обзора сформирована общая последовательность исследования: подготовка данных – диагностический индекс – временные признаки – модель – калибровка – порог тревоги – инженерная проверка (рис. 2).



Рисунок 2 – Гибридная схема прогнозирования кольматации на основе физических параметров и промысловых данных

Во второй главе выполнен переход от общих механизмов к системе инженерных параметров. Показано, что диагностика состояния призабойной зоны должна учитывать проницаемость, скин-фактор, пластовое и забойное давление, коэффициент

продуктивности или приёмистости, перепад давления, фактический дебит и режимные изменения. Ни один из этих показателей отдельно не является достаточным основанием для заключения о кольтатации, однако их согласованная динамика позволяет обнаружить формирование устойчивого фильтрационного ограничения.³

Рассмотрена роль управляемых технологических факторов: состава и дисперсности бурового раствора, качества фильтрационной корки, совместимости жидкости с минералами коллектора, концентрации твёрдой фазы, времени контакта, очистки ствола и режима вскрытия продуктивного пласта. Снижение фильтрации и формирование малопроницаемой, но тонкой и удаляемой корки уменьшают глубину проникновения частиц. Одновременно чрезмерная вязкость, агрегация частиц или неустойчивость системы могут ухудшать транспорт шлама и повышать риск инвазии [1, 2, 5–7].

Отдельно рассмотрены нанодобавки как средство регулирования структуры корки и межфазного взаимодействия. Их применение должно оцениваться не по факту наличия нанофазы, а по совокупности критериев: снижению фильтрации, устойчивости дисперсии, совместимости с породой, сохранению реологических свойств и отсутствию образования крупных агрегатов. Такой подход подчёркивает необходимость технологической, а не только лабораторной оценки противокольматационного эффекта.

В качестве промежуточного этапа показана возможность восстановления интегральных параметров пласта по данным интерпретации и моделям искусственных нейронных сетей. Для шести скважин выполнено сопоставление оценок проницаемости, скин-фактора и начального пластового давления. Наименьшая относительная ошибка получена для давления, более высокая – для проницаемости и скин-фактора. Эти результаты подтверждают, что модели могут использоваться как вспомогательное средство оценки, но не отменяют

³ Bourdet D. Well Test Analysis: The Use of Advanced Interpretation Models. Amsterdam: Elsevier, 2002. 438 p.

необходимость контроля исходных данных и сопоставления с гидродинамической интерпретацией [3, 8].

Диагностическая система построена вокруг параметров, имеющих непосредственный физический смысл. Проницаемость характеризует проводимость пористой среды; коэффициент продуктивности и приёмистость отражают фактическую связь между расходом и перепадом давления; скин-фактор суммирует дополнительное сопротивление в околоскважинной зоне. Пластовое и забойное давления позволяют отделить общее истощение пласта от локального ухудшения притока. При отсутствии регулярных гидродинамических исследований используются расчётные и восстановленные показатели, однако их погрешность учитывается при интерпретации и не должна скрываться за высокой формальной точностью прогностической модели.

Расчётный потенциал скважины определяется для сопоставимых условий работы и служит базой для оценки отклонения фактической продуктивности. В диссертации подчёркивается, что этот показатель не является неизменной паспортной величиной: он зависит от давления, режима отбора, свойств флюида и доступной истории эксплуатации. Поэтому перед построением признаков выполняются контроль единиц измерения, проверка временных меток, обработка пропусков, выявление остановок, ремонтов и резких технологических изменений. Значения, полученные в несопоставимых режимах, не должны автоматически использоваться как подтверждение повреждения пласта.

На основе анализа сформирована физически согласованная схема: производственные данные проходят контроль качества; затем рассчитываются диагностические и временные признаки; модель формирует вероятность риска; после сравнения с рабочим порогом результат направляется инженеру. В схеме подчёркнуто, что машинное обучение не устанавливает механизм кольматации автоматически. Высокий риск является основанием для проверки режима, истории воздействий, результатов последних исследований и дополнительных диагностических мероприятий.

Признаки формируются только из информации, известной на момент выдачи прогноза. Используются предыдущие значения параметров, изменения за один и несколько временных шагов, скользящие средние и стандартные отклонения, отношения фактического и расчётного дебитов, а также признаки устойчивости режима. Такая схема исключает попадание будущей информации в обучающую выборку. Окна 3, 7 и 14 суток отражают соответственно краткосрочную реакцию, недельную динамику и более устойчивое изменение режима; их совместное применение позволяет отделять единичный выброс от развивающейся тенденции.

В третьей главе кольматация рассматривается как скрытое эксплуатационное состояние, которое проявляется через устойчивое ухудшение фактической продуктивности относительно расчётного потенциала. Для количественного анализа объединены производственные данные скважины G12: фактический и теоретический дебиты нефти, дебиты воды и газа, обводнённость, газовый фактор, устьевое давление, положение штуцера, расход газлифта и результаты последних скважинных исследований. Проведены синхронизация временных отметок, унификация единиц измерения, обработка пропусков, маркировка остановок и контроль физически невозможных значений.⁴

Выбор скважины G12 связан с наличием по ней достаточно продолжительного ряда наблюдений и набора режимных показателей, необходимых для проверки расчётной схемы. На этом объекте отработана последовательность расчёта индекса, разметки событий риска и формирования признакового пространства. В анализе основное внимание уделялось не только абсолютному уровню индекса, но и устойчивости его снижения, скорости последующего восстановления и совместной динамике с другими режимными параметрами. Это позволило отделять

⁴ Tariq Z., Abdulraheem A., Mahmoud M. et al. Data-driven analytics and machine learning applications in petroleum engineering. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2021. Vol. 11. P. 4339–4374.

кратковременные технологические изменения от более устойчивого фильтрационного ограничения.

Ключевым диагностическим показателем принят кольтматационный индекс:

$$I_k(t) = Q_{\text{факт}}(t) / Q_{\text{теор}}(t),$$

где $Q_{\text{факт}}(t)$ – фактический дебит нефти, $Q_{\text{теор}}(t)$ – расчётный потенциал скважины на ту же дату. Значения, близкие к единице, характеризуют соответствие фактической работы расчётному уровню. Снижение индекса указывает на рост расхождения, однако само по себе не доказывает кольтматацию. Для анализа динамики дополнительно используется относительное изменение:

$$\Delta I_k(t) = [I_k(t) - I_k(t-1)] / I_k(t-1) \times 100 \, \%.$$

На первых пяти датах наблюдений индекс изменялся от 0,983 до 0,946 с последующим частичным восстановлением до 0,963. Пример показывает чувствительность показателя к изменению режима и одновременно демонстрирует необходимость анализа длительного временного ряда и дополнительных параметров (табл.1, граф.1).

Таблица 1 – Пример расчёта кольтматационного индекса

Дата	Qфакт, барр./сут	Qтеор, барр./сут	Ik
20.12.2015	8521	8668	0,983
22.12.2015	9425	9660	0,976
30.12.2015	6738	7045	0,956
05.01.2016	6790	7178	0,946
07.01.2016	7238	7514	0,963

Полный ряд охватывает период 2015–2017 гг. Фактический дебит в начале наблюдений достигал приблизительно 8000–9500 stb/сут, затем изменялся неравномерно и к последующим периодам снижался. Динамика кольтматационного индекса в большинстве точек находилась вблизи единицы, но включала отдельные глубокие и продолжительные просадки. Часть экстремальных значений могла быть связана с остановками или

особенностями расчёта теоретического дебита и потому не интерпретировалась автоматически как физическая кольтация (граф 2).

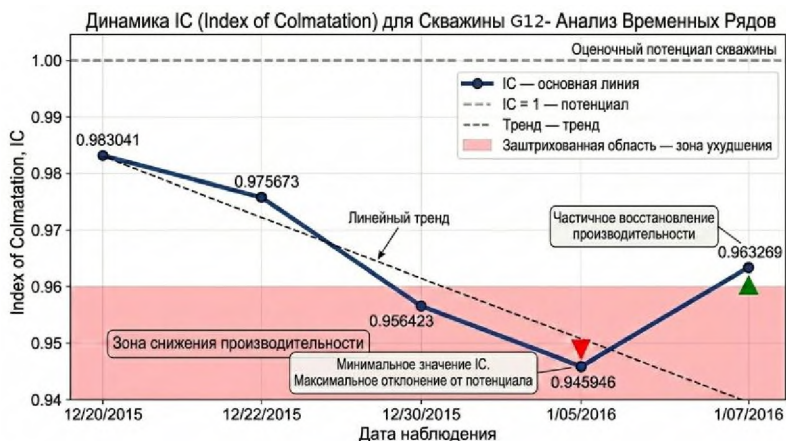


График 1 – Иллюстрация расчёта и динамики кольтационного индекса по первым датам скважины G12



График 2 – Динамика кольтационного индекса по скважине G12 за период наблюдений

В массиве получено 308 согласованных наблюдений. Среднее значение индекса составило 0,932, медиана – 0,938. Доля

наблюдений ниже принятого диагностического уровня составила около 17,3 %, число локальных просадок – 78. Выделены интервалы устойчивого снижения длительностью от 3 до 13 суток. Наиболее выраженный эпизод наблюдался в августе 2017 г., когда минимальное значение индекса достигало 0,428.

Ранговый корреляционный анализ показал положительную связь индекса с дебитом газа и устьевым давлением и отрицательную связь с обводнённостью, дебитом воды, открытием штуцера и расходом газлифта. Корреляции не используются как доказательство причинности, но помогают определить направления формирования признаков и выявить параметры, сопровождающие отклонение фактической продуктивности от расчётного уровня (табл.2).

Таблица 2 – Связь режимных параметров с кольтатационным индексом

Параметр	Коэффициент ранговой корреляции с I_k
Дебит газа	0,419
Устьевое давление	0,391
Газовый фактор	0,245
Расход газлифта	–0,210
Открытие штуцера	–0,289
Дебит воды	–0,366
Обводнённость	–0,419

Для анализа использованы 308 согласованных наблюдений, полученных после объединения производственных и расчётных данных по датам. Помимо общего уровня индекса рассматривались локальные просадки, продолжительность нахождения ниже диагностического уровня и скорость последующего восстановления. Кратковременное снижение, совпадающее с остановкой или резкой сменой штуцера, трактовалось иначе, чем постепенное ухудшение при

относительно стабильном режиме. Такой подход позволил сформировать события риска без утверждения, что каждое снижение индекса имеет единственную физическую причину.

Корреляционный анализ использовался только как предварительный этап. Положительная связь индекса с дебитом газа и устьевым давлением, а также отрицательная связь с обводнённостью, дебитом воды и открытием штуцера показывают согласованность с изменением режима притока, но не доказывают причинность. Поэтому признаки не отбирались исключительно по величине парной корреляции. Учитывались их физический смысл, доступность до момента прогноза, устойчивость во времени и отсутствие прямой связи с будущей меткой.

Такая структура обеспечивает переход от инженерного анализа к причинно корректной задаче прогнозирования.

В четвёртой главе целевая переменная сформирована причинно корректно. Для каждой даты t положительная метка присваивается, если хотя бы в одну из последующих 14 суток, то есть в интервале $(t; t+14]$, кольтматационный индекс становится ниже 0,90. Текущая дата в целевое окно не входит, а показатели будущего периода не используются при построении признаков.⁵

Итоговый горизонт прогноза зафиксирован равным 14 суткам. Дополнительная метка относительного падения ИС использовалась только как вспомогательная проверка и не входила в итоговый эксплуатационный конвейер. Такое разделение исключает смешение основной задачи раннего предупреждения с альтернативными вариантами разметки (граф.3).

Основной метрикой качества принята площадь под кривой «точность–полнота» (PR-AUC), дополнительной — площадь под ROC-кривой (ROC-AUC). Для вероятностного прогноза использованы оценка Брайера и ожидаемая ошибка калибровки

⁵ Bergmeir C., Benítez J.M. On the use of cross-validation for time series predictor evaluation. Information Sciences. 2012. Vol. 191. P. 192–213. DOI: 10.1016/j.ins.2011.12.028.

(ECE); для рабочей точки — точность предупреждений, полнота и доля ложноположительных решений (FPR).



График 3 – Динамика IC и разметка будущего события по скважине G12 при горизонте 14 суток

Итоговое признаковое пространство включает 19 переменных: порядковый день наблюдения, время работы, штуцер, устьевое давление, фактический дебит нефти, дебиты газа и воды, газовый фактор NGOR, обводнённость, газожидкостное отношение GLR, расчётные дебит, газовый фактор и обводнённость, текущий IC, темп его изменения, предыдущий IC, приближённый индекс продуктивности, относительное изменение GLR и число дней с предыдущего наблюдения. Будущие метки и служебные поля исключены.

После строгой разметки данные G12 разделены хронологически: обучение — 20.12.2015–01.12.2016, валидация — 01.01.2017–03.06.2017, тест — 04.07.2017–06.11.2017. Между обучением и валидацией, а также между валидацией и тестом предусмотрены 30-суточные защитные интервалы. В итоговых частях содержатся соответственно 108, 35 и 126 наблюдений (табл.3).

Таблица 3 – Хронологическое разделение ряда G12 с защитными интервалами

Выборка	Начало	Окончание
Обучающая	20.12.2015	01.12.2016
Валидационная	01.01.2017	03.06.2017
Тестовая	04.07.2017	06.11.2017

На валидационной выборке сопоставлялись L1- и L2-регуляризованные логистические модели, линейный метод опорных векторов и случайный лес. Наибольшее значение PR-AUC показала L1-регуляризованная логистическая регрессия с $C = 0,1$: PR-AUC = 0,8355 и ROC-AUC = 0,7961. Случайный лес на полном наборе из 157 признаков дал PR-AUC = 0,4249 и не обеспечил преимущества, соответствующего его сложности.

Итоговая модель была зафиксирована до обращения к тестовой выборке. На независимом тестовом интервале G12 получены PR-AUC = 0,8328 и ROC-AUC = 0,7721 при базовом уровне PR-AUC 0,5317. Таким образом, модель сохраняет ранжирующую способность на последующем временном периоде и существенно превосходит тривиальное ранжирование по доле положительного класса (граф.4).

Для дополнительной временной проверки использовалась скользящая валидация с расширением обучающего окна и защитным интервалом. Все этапы предобработки — импутация, масштабирование, обучение модели и калибровка — оценивались только на соответствующих более ранних данных. Такая схема имитирует реальное поступление наблюдений и предотвращает утечку информации из будущего.

Калибровка вероятностей выполнялась после выбора модели. Сопоставлялись исходные оценки, метод Платта и изотоническая регрессия. Для итогового конвейера выбрана калибровка Платта: на тестовой выборке оценка Брайера составила 0,2248, ECE — 0,1350.

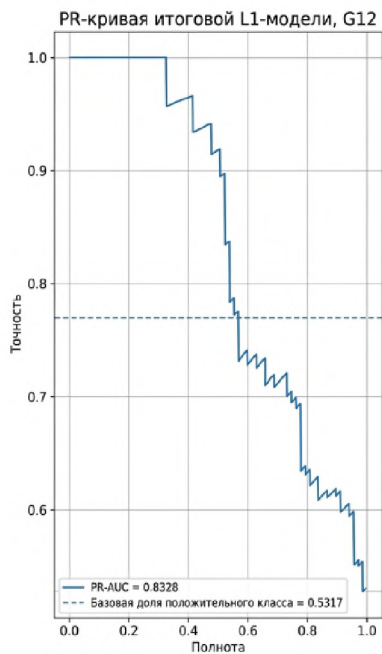
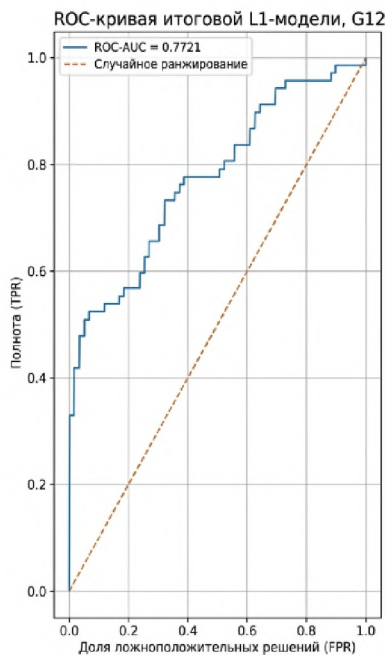


График 4 – ROC- и PR-кривые итоговой L1-регуляризованной модели на тестовой выборке G12

Изотоническая калибровка дала нулевую ECE на малой валидационной выборке, но ухудшила тестовые PR-AUC, ROC-AUC и ECE, что свидетельствует о переобучении.

Основной эксплуатационный порог $\tau^* = 0,4446$ выбран на предсобытийном подмножестве валидации, где текущий IC ещё не ниже 0,90, по правилу максимизации полноты при $FPR \leq 0,15$. Дополнительно сохранена консервативная контрольная точка $\tau = 0,5028$, выбранная на полной валидационной выборке. Порог применяется к прогнозной вероятности $p(t)$, а условие $IC < 0,90$ определяет фактическое событие.

На полной тестовой выборке G12 при $\tau^* = 0,4446$ выявлено 36 из 67 положительных наблюдений, сформировано 7 ложных тревог и пропущено 31 наблюдение; точность равна 0,8372, полнота — 0,5373, FPR — 0,1186. В предсобытийном подмножестве выявлено 14 из 44 положительных наблюдений

при 6 ложных тревогах; $FPR = 0,1034$. Консервативный порог исключает ложные тревоги, но снижает полноту до 0,3134 (граф.5).

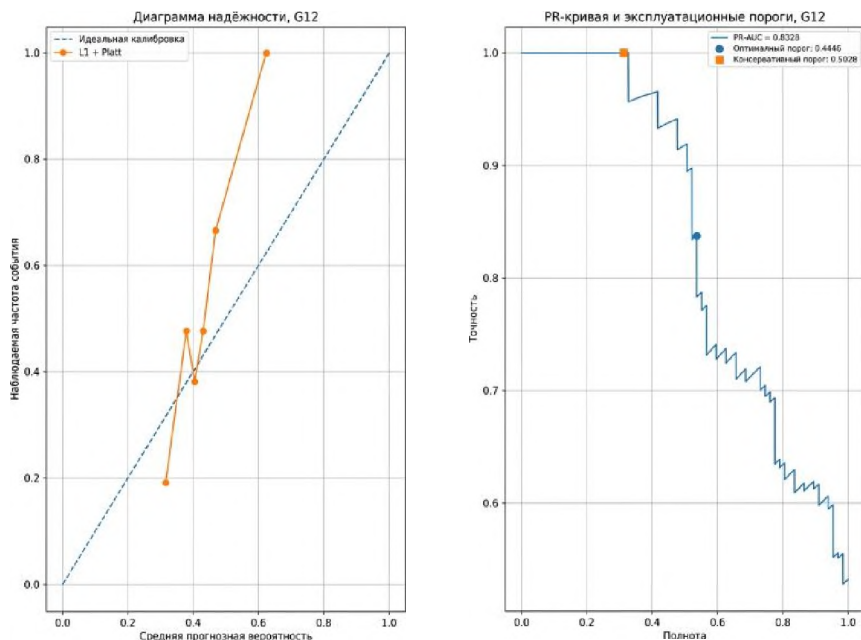


График 5 – Калибровка вероятностей и эксплуатационные пороги итоговой модели G12

Абляционный анализ показал, что из 19 входных переменных L1-регуляризация оставила четыре ненулевых коэффициента: текущий IC, дебит воды, относительное изменение GLR и предыдущий IC. Исключение текущего IC снижает PR-AUC до 0,8054, а исключение текущего и предыдущего IC — до 0,5924 при ROC-AUC = 0,4908. Следовательно, основной прогностический вклад связан с семейством IC, а вклад режимных признаков ограничен имеющимся объёмом данных.

Качество неоднородно во времени. В трёх последовательных тестовых подпериодах полнота составила

0,6923; 0,8235 и 0,1667, а FPR — 0; 0,2000 и 0,1111 соответственно. Блочный бутстрэп с длиной блока 14 суток дал широкий 95%-й интервал PR-AUC 0,5565–0,9598, что требует осторожной интерпретации единственного точечного значения (граф.6).

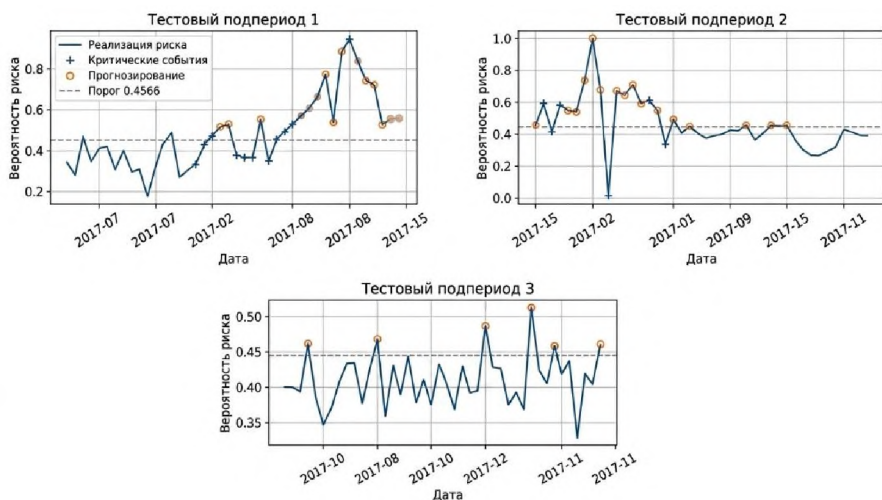


График 6 – Вероятность риска и предупреждения по последовательным тестовым подпериодам G12

Знак коэффициента показывает направление влияния после робастного масштабирования. Отрицательный коэффициент текущего IC означает повышение риска при снижении индекса. Существенно меньшие по модулю коэффициенты дебита воды, изменения GLR и предыдущего IC дополняют основной сигнал. Ненулевой коэффициент не является доказательством физической причинности, а характеризует вклад признака в решение модели (граф. 7).

Локальная интерпретация выполнена для корректного раннего предупреждения 23.07.2017 и пропущенного положительного наблюдения 16.10.2017. В первом случае вероятность 0,4604 превысила порог за 11 суток до события; во втором вероятность 0,4322 не достигла порога, хотя событие наступило через 12 суток. Сопоставление эпизодов показывает,

почему эксплуатационный порог должен рассматриваться вместе с инженерным контекстом.

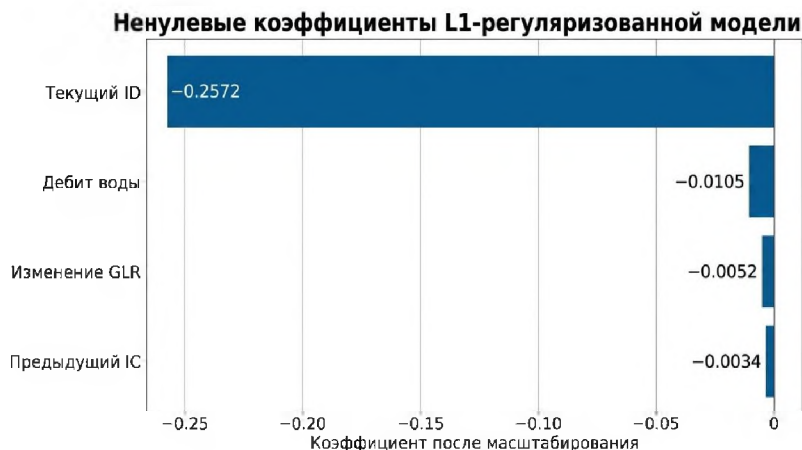


График 7 – Ненулевые коэффициенты итоговой L1-регуляризованной модели

Сопоставление валидации и теста показало небольшое изменение ранжирующих метрик: PR-AUC снизилась с 0,8355 до 0,8328, ROC-AUC — с 0,7961 до 0,7721. Оценка Брайера увеличилась с 0,2024 до 0,2248, тогда как ECE уменьшилась с 0,2358 до 0,1350 (граф.8). Следовательно, ранжирование сохранилось, но вероятностное качество должно контролироваться отдельно и не выводится только из ROC- или PR-кривой. Для внешней проверки зафиксированный конвейер G12 применён к G09 без переобучения, изменения 19 признаков и подбора нового порога. Внешняя выборка включает 238 наблюдений, из которых 114 положительные. На полной выборке получены PR-AUC = 0,7722, ROC-AUC = 0,7663, оценка Брайера = 0,2167 и ECE = 0,1128 (граф.9).

При переносе основного порога $\tau^* = 0,4446$ на полную выборку G09 выявлено 59 событий, сформирована 21 ложная тревога и пропущено 55 событий; точность составила 0,7375, полнота — 0,5175, FPR — 0,1694. В предсобытийном

подмножестве с текущим $IC \geq 0,90$ полнота равна 0,2763, а FPR — 0,1271.

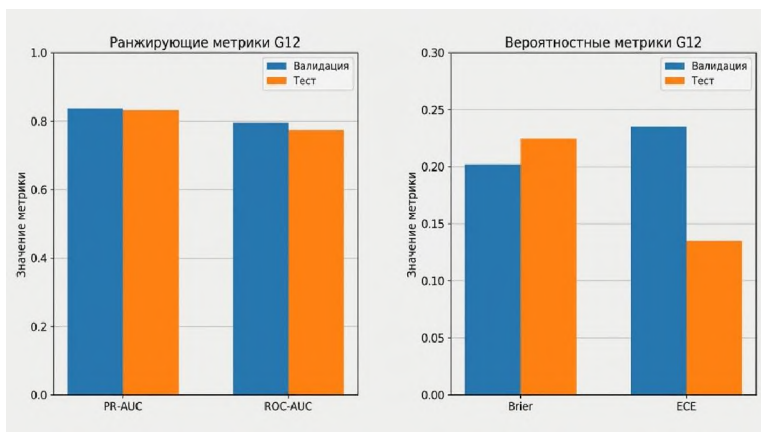


График 8 – Сопоставление ранжирующих и вероятностных метрик на валидации и тесте G12

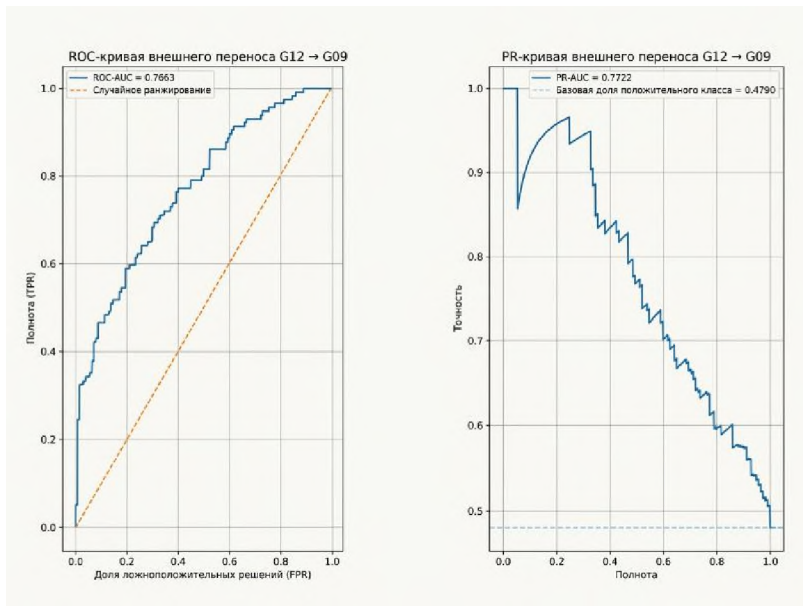


График 9 – ROC- и PR-кривые внешнего переноса итоговой модели G12 → G09

Результаты показывают, что общая ранжирующая способность сохраняется на другой скважине, однако рабочая точка не полностью переносит ограничение FPR на всю внешнюю выборку. Поэтому перенос на новый объект должен включать проверку состава данных, распределений признаков, калибровки и стоимости ложных предупреждений; при необходимости выполняется локальная перекалибровка или повторный выбор порога.

Данные G09 использовались только для внешней оценки и не участвовали в подборе модели G12. Это сохраняет независимый характер проверки и позволяет различать перенос готовой скоринговой функции и перенос общей методологии. Универсальность неизменной модели для любых скважин в работе не заявляется.

Для практического применения разработан ежедневный конвейер: загрузка и проверка новых данных; расчёт 19 признаков в фиксированном порядке; медианная импутация и робастное масштабирование параметрами обучения; получение скоринга L1-модели; калибровка Платта; сравнение вероятности с $\tau^* = 0,4446$; запись предупреждения в журнал (табл. 4).

Предупреждение не является окончательным диагнозом. Инженер проверяет текущий и предыдущий IC, дебиты, давление, штуцер, обводнённость, газовые отношения, пропуски и недавние операции, после чего принимает решение о продолжении наблюдения, дополнительном исследовании, корректировке режима или восстановительном мероприятии. Для снижения одиночных и повторных сигналов эксплуатационная логика может включать подтверждение n из m последовательных расчётов, гистерезис между включением и снятием тревоги и период блокировки повторного уведомления. Эти правила настраиваются на отдельном валидационном периоде и не меняют определения целевого события.

Мониторинг предусматривает контроль PR-AUC, ROC-AUC, оценки Брайера, ECE, предсобытийных полноты и FPR, доли тревог и распределений входных признаков. При ухудшении калибровки выполняется перекалибровка; при потере

ранжирующей способности — повторная временная проверка и переобучение с сохранением горизонта, целевой метки и причинной структуры.

Таблица 4 – Регламент ежедневного применения прогноза

Этап	Основное содержание	Результат
Контроль данных	Полнота, единицы измерения, даты, пропуски и смена режима	Проверенный временной ряд
Расчёт признаков	Фиксированный набор из 19 причинно допустимых признаков	Вектор признаков
Прогноз	L1-логистическая модель и калибровка Платта	Вероятность риска на 14 суток
Порог и предупреждение	Сравнение с $\tau^* = 0,4446$ и запись в журнал	Сигнал для инженерной проверки
Инженерное решение	Проверка режима и диагностических данных	Наблюдение, исследование или мероприятие

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. В работе показано, что кольматация призабойной зоны является одним из факторов, способных ухудшать фильтрационную связь между пластом и скважиной и снижать эффективность эксплуатации. Поэтому для своевременного контроля состояния скважины важна не только последующая диагностика, но и ранняя оценка возможного риска [1, 6].

2. Для количественной оценки изменения работы скважины использован кольматационный индекс $IC = Q_{\text{факт}}/Q_{\text{теор}}$. Установлено, что данный показатель может применяться как инженерный индикатор отклонения фактической продуктивности от расчётного потенциала, но не должен рассматриваться как единственное и прямое доказательство кольматации [6, 10].

3. Сформирована целевая переменная для раннего прогноза риска: событием риска принято снижение IC ниже 0,90 в течение последующих 14 суток. Такой горизонт выбран как практически удобный интервал, позволяющий заранее обратить внимание на возможное ухудшение состояния скважины [10].

4. На основе производственных временных рядов сформирован набор признаков, включающий дебиты нефти, газа и воды, обводнённость, газовые отношения, расчётный потенциал, текущие и предыдущие значения IC , а также показатели изменения режима работы скважины. При построении признаков учитывалось, чтобы в модель не попадала информация из будущего [3, 8, 10].

5. По результатам сравнения моделей для практического применения выбрана логистическая регрессия с L1-регуляризацией и калибровкой вероятностей. На тестовом интервале скважины G12 модель показала способность выделять периоды повышенного риска и ранжировать наблюдения по степени неблагоприятности [8, 10].

6. Установлено, что наибольшее влияние на прогноз оказывает динамика кольматационного индекса, однако режимные параметры скважины также важны для инженерной интерпретации результата. Это показывает, что прогноз должен

строиться не по одному показателю, а по совокупности промысловых признаков [6, 10].

7. Проверка на скважине G09 показала, что предложенный подход может быть применён к другой скважине, однако при таком переносе необходимо дополнительно проверять качество данных, порог риска и калибровку модели. Поэтому универсальное применение модели без адаптации не рекомендуется [10].

8. Разработан порядок практического использования прогноза в системе мониторинга: регулярное обновление данных, расчёт признаков, получение вероятности риска, фиксация предупреждений и обязательная инженерная проверка полученного сигнала [8, 10].

9. Рекомендуется использовать предложенную методологию как инструмент поддержки инженерного решения: для ранжирования скважин по уровню риска, выбора объектов для дополнительной диагностики, анализа режима эксплуатации и планирования профилактических мероприятий [3, 8, 10].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Абдулмуталибов, Т.Э. Исследование механизмов повреждения пласта в песчанике // Материалы Республиканской научной конференции молодых исследователей и докторантов, посвящённой 100-летию со дня рождения Гейдара Алиева. Баку, 4–5 мая 2023. С. 1–5.

2. Абдулмуталибов, Т.Э., Шмончева, Е.Е. Уменьшение повреждения пласта за счёт проектирования и выбора буровых растворов // Нефтегазовое дело, техносферная безопасность, рациональное природопользование: современные реалии: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. Махачкала: ДГТУ, 16–17 мая 2023.

3. Абдулмуталибов, Т.Э., Шмончева, Е.Е., Джаббарова, Г.В. Возможность использования больших данных и машинного обучения для повышения эффективности бурения // Гейдар Алиев и нефтяная стратегия Азербайджана: достижения нефтегазовой геологии и геотехнологий. Баку, 23–26 мая 2023. С. 1002–1007.

4. Абдулмуталибов, Т.Э., Джаббарова, Г.В. Нанотехнология в буровых растворах // Булатовские чтения: материалы VII Международной научно-практической конференции. Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2023. Т. 1. С. 328–329.

5. Абдулмуталибов, Т.Э., Шмончева, Е.Е. Экспериментальное исследование эрозии образцов соленосных пород // Современные технологии в нефтегазовом деле – 2023: материалы международной научно-технической конференции. Уфа: УГНТУ, 2023. С. 542–545.

6. Абдулмуталибов, Т.Э., Джаббарова, Г.В. Оценка начального давления, проницаемости и скин-фактора пласта с использованием методов машинного обучения // Технологии разработки месторождений и моделирование процессов в нефтегазодобыче. Уфа: УГНТУ, 2023. С. 224–225.

7. Abdulmutalibov, T.E., Shmoncheva, Y.Y., Jabbarova, G.V. Drilling fluids in complicated conditions: a review. Nafta-Gaz. 2023. No. 10. P. 660–669. DOI: 10.18668/NG.2023.10.03.

8. Abdulmutalibov, T.E., Jabbarova, G.V., Shmoncheva, Y.Y. Advancements in applications of machine learning for formation damage predictions. SPE Caspian Technical Conference and Exhibition. Баку, 21–23 November 2023. DOI: 10.2118/217610-MS.

9. Абдулмуталибов, Т.Э., Салаев, М.Т., Шмончева, Е.Е., Джаббарова, Г.В., Кузнецов, В.А. Превентор универсальный. Евразийский патент № 045267B1. 2023.

10. Abdulmutalibov, T.E., Malikov, H.Kh., Jabbarova, G.V., Tashmenov, R.R. Forecasting the risk of formation damage (colmatation) with a 14-day horizon using calibrated probabilistic models. Journal of SRI “Geotechnological Problems of Oil, Gas and Chemistry”. 2025. Issue 2. P. 106–120.

11. Abdulmutalibov, T.E., Jabbarova, G.V., Shmoncheva, Y.Y. Universal BOP with built-in grinding tool. Nafta-Gaz. 2025. No. 7. P. 474–481. DOI: 10.18668/NG.2025.07.06.

Личный вклад соискателя:

Работа [1] - выполнена самостоятельно (без соавторов);

[2, 3, 5, 7, 8, 9, 11] - участие авторов в работах является равным;

[4, 6, 10] - постановка задачи, участие в проведении исследований, обобщении и анализе полученных результатов.



Защита диссертации состоится 29 сентября 2026 года в 11:00 на заседании Диссертационного совета FD 2.03, действующего на базе Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности.

Адрес: AZ1010, г. Баку, проспект Азадлыг, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности.

Электронная версия диссертации и автореферата размещена на официальном сайте Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности

Автореферат разослан по соответствующим адресам
“ 28 ” августа 2026 года.

Подписано в печать: 27.08.2026

Формат бумаги: А5

Объём: 38554

Тираж: 70