УДК 622.276 (06); https://doi.org/10.37878/2708-0080/2026-3.11
https://orcid.org/0000-0002-2309-464X
https://orcid.org/0009-0001-7640-084X

НОВЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА ПО СТУПЕНЧАТОМУ ТЕСТУ

Т.Е. ДЖАТЫКОВ[1],
PhD, ассистент профессора,
t.dzhatykov@kbtu.kz

Н.М. ОСПАНОВ[2],
магистр наук,
технический эксперт,
n.ospanov@kmge.kz

[1]АО «КАЗАХСТАНСКО-БРИТАНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Республика Казахстан, 050000, г. Алматы, ул. Толе би, 59

[2]ФИЛИАЛ ТОО «КМГ ИНЖИНИРИНГ» КАЗНИПИМУНАЙГАЗ
Республика Казахстан, 130000, г. Актау, 35 мкр., 6/1

Целью данного исследования является анализ роста давления на этапах ступенчатого понижения расхода при минигидроразрыве пласта (мини-ГРП) как потенциального индикатора значительных околоскважинных потерь давления, обусловленных недостаточной проводимостью перфорационных каналов в схеме колонна-в-колонне. Работа направлена на обоснование того, что выявленные аномалии могут быть устранены путём повторной перфорации, что позволяет снизить сопротивление в призабойной зоне и предотвратить возникновение технического стопа при проведении основного гидравлического разрыва пласта (ГРП).

В статье выполнен анализ результатов тестов на ступенчатое понижение давления на серии скважин, оборудованных дополнительной колонной, где наблюдался характерный рост давления при каждом снижении расхода. Проведённый анализ продемонстрировал, что корректная интерпретация аномального роста давления на ступенях теста позволяет заранее выявить риск технического стопа и предотвратить его за счёт своевременных превентивных действий.

Реализация предложенного подхода в инженерной практике позволит уменьшить число непроизводительных простоев, повысить операционную эффективность и снизить затраты на проведение ГРП.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *гидравлический разрыв пласта, ступенчатый тест, колонна-в-колонне, повышение нефтеотдачи, мини-ГРП.*

САТЫЛЫ СЫНАҚ НЕГІЗІНДЕ ГИДРАВЛИКАЛЫҚ ЖАРУДЫ ДИАГНОСТИКАЛАУДЫҢ ЖАҢА ӘДІСІ

Т. Е. ДЖАТЫКОВ[1], PhD, профессор ассистенті, *t.dzhatykov@kbtu.kz*
Н.М. ОСПАНОВ[2], MSc, техникалық сарапшы, *n.ospanov@kmge.kz*

[1]«ҚАЗАҚСТАН-БРИТАН ТЕХНИҚАЛЫҚ УНИВЕРСТИТЕТІ» АҚ
Қазақстан Республикасы, 050000, Алматы қ., Төле би көшесі, 59

[2]«КМГ ИНЖИНИРИНГ» ЖШС ФИЛИАЛЫ КАЗНИПИМУНАЙГАЗ
Қазақстан Республикасы, 130000, Ақтау қ., 35 ықш. ауд., 6/1

Осы зерттеудің мақсаты – миниқабатты гидравлиқалық жару (мини-ҚГЖ) кезінде сүйықты айдау жылдамдықты сатылы төмендету кезеңдеріндегі қысымның өсуін ««құбыр-құбырдың ішінде» аяқтау жүйелерінде перфорациялық каналдарын өткізгіштігінің жеткіліксіздігінен туындайтын ұңғыма маңындағы жоғары қысымның шығынына ықтимал индикаторы ретінде талдау. Жұмыс анықталған аномалияларды қайта перфорация жүргізу арқылы жоюға болатынын негіздеуге бағытталған, бұл түпмаңы аймағындағы кедергіні азайтып, негізгі қабатты гидравлиқалық жару (ҚГЖ) жүргізу кезінде техникалық стоптың алдын алуға мүмкіндік береді.

Зерттеу барысында қосымша колоннамен жабдықталған бірқатар ұңғымалардағы сатылы сынақ тесттер нәтижелері талданды, онда әрбір сүйық айдау жылдамдығы төмендетілген сайын қысымның сипаттық өсуі байқалды. Жүргізілген талдау сатылы сынағы сатыларындағы қысымның аномальды өсуін дұрыс интерпретациялау техникалық стоп қаупін алдын ала анықтауға және уақтылы алдын алу шараларын қолдану арқылы оның алдын алуға мүмкіндік беретінін көрсетті.

Ұсынылған тәсілді инженерлік тәжірибеге енгізу өндірістік-емес тоқтау санын азайтуға, операциялық тиімділікті арттыруға және ҚГЖ жүргізу шығындарын төмендетуге мүмкіндік береді.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: *қабатты гидравликалық жару, сатылы сынақ тесті, құбыр-құбырдың ішінде, мұнай бергіштігін арттыру, мини-ҚГЖ.*

A NEW METHOD FOR HYDRAULIC FRACTURING ON POWER TEST

T.E. JATYKOV[1], PhD, assistant professor, *t.dzhatykov@kbtu.kz*
N.M. OSPANOV[2], MSc., technical expert, *n.ospanov@kmge.kz*

[1]JSC “KAZAKH-BRITISH TECHNICAL UNIVERSITY”
Republic of Kazakhstan, 050000, Almaty, Tole bi str., 59

[2]KMG ENGINEERING, KAZNIPIMUNAIGAS LLP
Republic of Kazakhstan, 130000, Aktau, distr. 35, 6/1

The objective of this study is to analyze pressure increase during Step-Down Test (SDT) in mini-frac operations as a potential indicator of significant near-wellbore pressure losses caused by insufficient conductivity of perforation tunnels in casing-in-casing configurations. The work aims to substantiate that the identified anomalies can be eliminated through reperforation, thereby reducing near-wellbore resistance and preventing screen-out in main hydraulic fracturing job (HF).

The study includes an analysis of SDT results from a series of wells equipped with an additional casing string, where a characteristic pressure increase was observed at each rate reduction stage. The analysis demonstrated that proper interpretation of abnormal pressure growth during SDT enables early identification of screen-out risk and its prevention through timely corrective actions.

Implementation of the approach in engineering practice would reduce non-productive time, improve operational efficiency, and lower the overall cost of HF treatments.

KEYWORDS: *hydraulic fracturing, Step-Down Test, casing-in-casing, production enhancement, mini-frac.*

Введение. Гидроразрыв пласта (ГРП) остаётся одной из наиболее эффективных технологий интенсификации добычи углеводородов из низкопроницаемых коллекторов, однако успешность операций критически зависит от эффективности связи скважины с пластом через систему перфорационных каналов [1,2,3]. Технический стоп (screen-out) при проведении ГРП продолжает оставаться одной из главных причин неудачных операций.

Тест на ступенчатое понижение расхода (Step-Down Test, SDT), впервые предложенный в [4] в начале 1990-х годов, зарекомендовал себя как простой, но эффективный метод диагностики околоскважинных потерь давления перед основным ГРП. Методология SDT основана на последовательном ступенчатом снижении расхода закачки с фиксацией изменения давления на каждой ступени, что позволяет разделить общие потери трения в системе на составляющие компоненты: потери в стволе скважины, потери на перфорациях и потери в околоскважинной зоне (near-wellbore friction). Как отмечается в [5], корректная интерпретация SDT позволяет заранее идентифицировать риск технического стопа и принять превентивные меры для его предотвращения.

За последние два десятилетия методология анализа SDT претерпела значительную эволюцию. Если традиционный подход к анализу FEF (Fracture Entry Friction) имел существенные ограничения, приводящие к неоднозначным результатам, то современный Enhanced FEF Analysis, предложенный в [5], обеспечивает более точное разделение потерь давления за счёт корректного учёта коэффициентов трения флюидов, неоднородности коэффициента расхода перфораций (discharge coefficient) и применения методологии максимального снижения сопротивления (Maximum Drag Reduction asymptote).

Однако интерпретация SDT сталкивается с существенными вызовами, особенно в случае аномального поведения давления. Внимания требует проблема неоднозначности в определении количества открытых перфораций, особенно при высокой плотности перфорации, когда погрешность измерения потерь в стволе скважины может существенно превышать теоретические потери на перфорациях. В таких случаях расчётное количество открытых отверстий может варьироваться от нескольких десятков до теоретически бесконечного значения, что делает традиционную интерпретацию малополезной. В [6] предложили использовать анализ водяного удара (water hammer) для независимого определения потерь на перфорациях и в стволе скважины, что позволяет разрешить проблему неоднозначности стандартных тестов.

Особый интерес представляет аномальное поведение давления при SDT, когда вместо ожидаемого снижения давления при каждом уменьшении расхода наблюда-

ется его рост. Такое поведение противоречит базовым принципам гидравлики и указывает на наличие серьёзных ограничений в системе перфорации-скважина-пласт. В литературе описаны различные причины подобных аномалий, включая множественную трещиноватость, критическую извилистость околоскважинной зоны (tortuosity), эффекты переориентации трещины и недостаточную проводимость перфорационных каналов. При этом корректная диагностика механизма аномалии критически важна для выбора правильной стратегии корректирующих действий.

Проблема приобретает особую актуальность для скважин, прошедших капитальный ремонт с установкой дополнительной обсадной колонны внутри существующей (технология «**колонна-в-колонне**»). Такая конфигурация характеризуется малым диаметром внутренней колонны, что накладывает дополнительные ограничения на дизайн перфорации и может приводить к повышенным потерям давления даже при стандартной плотности перфорации. В доступной литературе практически отсутствуют систематические исследования особенностей проведения SDT и интерпретации результатов для скважин с двойной конфигурацией колонн, что делает данную тему особенно актуальной.

Ключевым параметром, определяющим потери давления на перфорациях, является коэффициент расхода (discharge coefficient, Cd), который, как было показано в [7], зависит от диаметра перфорации и вязкости флюида. Для линейных гелей Cd может варьироваться от 0.6-0.7 для малых диаметров и высокой вязкости до 0.85-0.95 для больших диаметров и низкой вязкости. Это означает, что различные типы перфораторов с разными характеристиками проникновения и диаметром формируемых каналов будут создавать существенно различающиеся потери давления при одинаковой плотности перфорации.

Потери давления на перфорациях описываются уравнением, учитывающим геометрию системы:

$$\Delta P_{\text{перф}} = \frac{0.2369 \cdot \rho \cdot Q^2}{Cd^2 \cdot d^4 \cdot N^2} \quad (1)$$

Где $\Delta P_{\text{перф}}$ в psi, ρ – плотность флюида (фунт/галлон), Q – расход закачки (баррель в минуту), d – диаметр перфорации (дюймы), N – количество открытых отверстий, Cd – коэффициент расхода (безразмерный), 0,2369 – коэффициент перевода из Field Units в СИ. Рекомендуется использовать данный вариант формулы в Field Units и затем, получив значение давления в psi, далее перевести в другую, удобную систему единиц. Это связано с тем, что Cd, являясь безразмерной величиной, является все же эмпирической величиной, полученной в специальных лабораторных или полевых условиях в зависимости от других формул и величин, которые, в свою очередь, могут быть в других единицах.

Из данного уравнения (1) следует, что потери давления обратно пропорциональны четвёртой степени диаметра и квадрату количества отверстий, что объясняет критическую важность обеих этих характеристик. Существует множество исследований по теме STD и его применения в различных ситуациях, что делает данный метод теста весьма интересным и требующим дальнейших изучений [8,9,10,11,12,13,14,15].

Исходя из вышеописанного, целью настоящего исследования является систематический анализ аномального поведения давления при SDT в скважинах с конфигурацией «колонна-в-колонне» и обоснование необходимости специализированного подхода к дизайну перфорации для таких скважин. В работе будет показано, что аномальный рост давления при каждом снижении расхода является индикатором недостаточной проводимости перфорационных каналов, а не околоскважинных эффектов, и может быть эффективно устранён путём повторной перфорации с использованием зарядов с улучшенными характеристиками проникновения.

Исследование базируется на анализе реальных данных с серии скважин, где систематически наблюдалась следующая последовательность событий: аномальное поведение SDT при первичной перфорации → screen-out при попытке закачки проппанта даже в малых концентрациях (100 кг/м³) → нормализация поведения SDT после повторной перфорации → успешное проведение основного ГРП без осложнений.

Практическая значимость работы заключается в разработке диагностического критерия, позволяющего на этапе мини-ГРП идентифицировать скважины (в частности, с дополнительной колонной) с высоким риском технического стопа и реализовать превентивные меры в виде повторной перфорации до начала закачки основного объёма проппанта. Это позволяет избежать дорогостоящих операций по ликвидации последствий технических стопов, сократить время простоя оборудования и повысить общую эффективность программы ГРП.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– системно установлено, что аномальный рост давления при ступенчатом снижении расхода в Step-Down Test в скважинах с системой «колонна-в-колонне» обусловлен преимущественно недостаточной проводимостью перфорационных каналов, а не околоскважинными эффектами;

– обоснована причинно-следственная связь между характером изменения давления на ступенях Step-Down Test и вероятностью возникновения технического стопа при проведении основного гидроразрыва пласта;

– разработан дополнительный диагностический подход к интерпретации результатов Step-Down Test, позволяющий на раннем этапе мини-ГРП выявлять критические ограничения входной проводимости и принимать обоснованные решения о необходимости повторной перфорации;

– сформированы диагностические критерии интерпретации Step-Down Test для скважин с конфигурацией «колонна-в-колонне», учитывающие величину прироста давления и наличие гидроударного эффекта;

– экспериментально подтверждена эффективность предложенного подхода на основе анализа полевых данных, включая устранение аномального поведения давления и предотвращение технических стопов за счёт оптимизации параметров перфорации.

Материалы и методы исследования

Особенности скважин типа "колонна-в-колонне". Технология установки дополнительной обсадной колонны внутри существующей широко применяется при капитальном ремонте скважин для изоляции проблемных зон, восстановления

целостности заканчивания или доступа к новым продуктивным горизонтам. Типичные диаметры внутренней колонны составляют 102-114 мм, что существенно меньше диаметра первичной колонны (обычно 168-178 мм для эксплуатационных колонн).

В данной работу исследовались скважины с нефтегазовых месторождений, находящихся в Западных регионах Казахстана, принадлежащих к терригенным отложений песчаников, алевролитов, глин. Данные залежи в основном разрабатываются путем применения ГРП как в старом, так и новом фонде скважин.

Систематический анализ добывающих скважин, прошедших капитальный ремонт с установкой внутренней колонны на исследуемом месторождении, выявил устойчивую закономерность: в большинстве случаев наблюдалось аномальное поведение давления при проведении первичного SDT после стандартной перфорации. Данная статистика резко контрастирует со скважинами одинарного заканчивания, где аномальное поведение SDT встречается значительно реже и обычно связано с неоптимальным выбором параметров перфорации или неблагоприятными геомеханическими условиями.

Диагностика аномального поведения SDT. Нормальное поведение давления при SDT характеризуется снижением давления при каждом уменьшении расхода, при этом величина снижения зависит от соотношения компонентов потерь. Если потери на перфорациях доминируют, наибольшее падение давления наблюдается при первом снижении расхода (переход с максимального расхода на вторую ступень). Если доминируют околоскважинные потери, наибольшее падение происходит при последнем снижении расхода (переход с минимального расхода к остановке). В промежуточных случаях падения давления на разных ступенях сопоставимы по величине.

Аномальное поведение характеризуется ростом давления при снижении расхода на одной или нескольких ступенях SDT. Такое поведение физически противоречит уравнениям потерь трения и указывает на наличие критических ограничений в системе.

Дифференциальная диагностика между этими причинами критически важна для выбора корректирующих мероприятий. Ключевым диагностическим признаком является **реакция на повторную перфорацию**: если аномалия полностью исчезает после увеличения количества и/или качества перфорационных каналов без каких-либо изменений в пласте, это однозначно указывает на то, что первичная причина заключалась именно в недостаточной проводимости перфорации, а не в околоскважинных эффектах или многотрещинности.

Результаты и обсуждение

Анализ скважин с аномальным поведением SDT. Скважина 6551: детальный анализ базового кейса. Скважина 6551 представляет собой типичный пример скважины с конфигурацией "колонна-в-колонне", демонстрирующей классический паттерн аномального поведения SDT и его успешного устранения путём дострела. Типовая схема заканчивания скважины представляет собой 114 мм колонна в 168 мм колонне, прострелянная при плотности перфорации 20 отв/м, средним диаметром 10 мм, глубиной проникновения до 500 мм.

После первичной перфорации (1446,8-1452,6 м) был проведён SDT, результаты которого показаны на *рисунке 1*. График демонстрирует явную аномалию: при каждом снижении расхода (видно, как ступенчатое падение синей линии расхода) наблюдается не снижение, а **рост давления** (показаны зелеными стрелками). Данное поведение противоречит базовым принципам гидравлики и однозначно указывает на наличие критических ограничений в системе. Визуально можно выделить минимум четыре ступени снижения расхода, на каждой из которых давление возрастает на 10-20 атм. Помимо этого, отсутствует гидроудар на последней ступени.

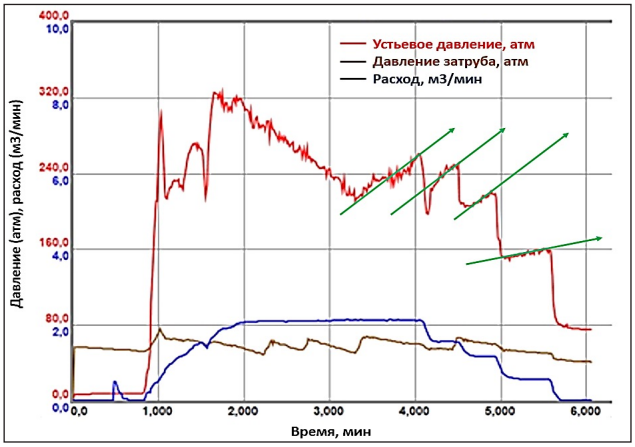

Рисунок 1 - **График первичного SDT скважины 6551, показывающий рост давления при каждом снижении расхода**

Несмотря на то, что SDT проводился с закачкой только линейного геля без проппанта, что исключает эффекты забивки каналов твёрдыми частицами, аномальное поведение проявилось отчётливо. Это важное наблюдение исключает гипотезу о том, что проблема возникает только при наличии проппанта в системе. После завершения SDT была предпринята попытка закачки проппанта в концентрации 100 кг/м³. Уже через 1-2 минуты после начала закачки суспензии (что соответствует объёму около 3-5 м³ или 300-500 кг проппанта) произошёл технический стоп, характеризующийся резким ростом давления с 280 атм до 350+ атм и падением расхода несмотря на работу насосов на полной мощности.

Важно отметить, что концентрация 100 кг/м³ является крайне низкой по сравнению с типичными значениями в дизайне ГРП (до 1000 кг/м³), а объём закачанного проппанта (менее 1 тонны) – ничтожным по сравнению с плановым (обычно 30-40 тонн). Тот факт, что техстоп произошёл при столь минимальных параметрах, указывает на критическую недостаточность проводимости системы перфорация-скважина-пласт.

Дострел: после промывки скважины и удаления проппанта из ствола была выполнена повторная перфорация (дострел) интервала 1455-1458 м перфораторами Скорпион ПП-20ГП, добавившая 60 перфорационных отверстий к существующим 116, в результате чего общее количество достигло 176 отверстий.

Повторный SDT, выполненный после дострела, продемонстрировал кардинально иное поведение (*рисунок 2*). График показывает, что при каждом снижении

расхода давление почти стабильное (имеется небольшой рост в пределах 5 атм), что соответствует нормальному гидравлическому поведению. Величины падения давления на различных ступенях сопоставимы, что указывает на умеренное соотношение между потерями на перфорациях и околоскважинными потерями. Максимальное давление закачки снизилось с 330 атм (до реперфорации) до 280 атм (после реперфорации), что указывает на снижение общих потерь трения в системе примерно на 50 атм или 15-20%. Также отчетливо виден гидроудар на последней ступени.

После получения нормальных результатов повторного SDT был выполнен основной ГРП с закачкой проппанта по полному дизайну. Закачка прошла без осложнений, и скважина была успешно запущена в эксплуатацию с дебитом, превышающим достимуляционный.

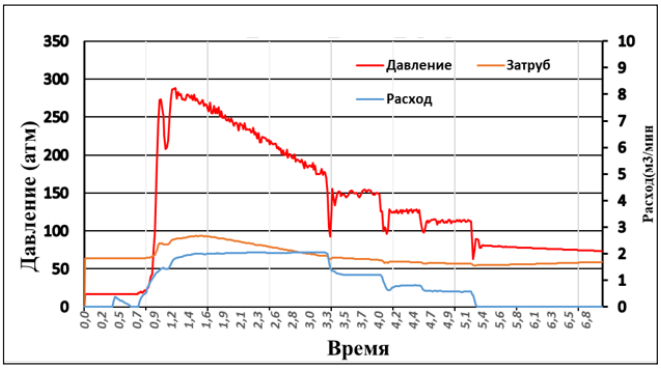

Рисунок 2 – **График повторного SDT скважины 6551 после реперфорации, показывающий нормальное снижение давления при каждом снижении**

Интерпретация ситуации на скважине 6551. Аномальный рост давления при снижении расхода на этапах Step-Down Test указывает на критически недостаточную гидравлическую проводимость системы «перфорация – скважина – пласт». Устранение данной аномалии возможно как за счёт увеличения проводимости существующих перфорационных каналов (перестрел), так и за счёт вовлечения дополнительных интервалов продуктивного пласта (дострел). В обоих случаях наблюдаемая нормализация поведения SDT отражает не способ воздействия, а сам факт увеличения эффективной проводимости системы. В нашем случае имел место дострел.

Нормализация поведения SDT после проведения повторных перфорационных работ обусловлена увеличением суммарной площади фильтрации и снижением удельных потерь давления, независимо от того, было ли это достигнуто за счёт перестрела существующего интервала или за счёт подключения дополнительных интервалов пласта.

В рамках настоящего исследования Step-Down Test рассматривается как диагностический инструмент выявления недостаточной проводимости, но не как метод дифференциации между перестрелом и дострелом, поскольку оба подхода приводят к сходному гидравлическому эффекту на кривых SDT.

Количественный анализ изменений параметров перфорации. Для скважины 6551 (базовый кейс) доступны детальные данные о параметрах первичной и вторичной перфорации, что позволяет провести количественный анализ изменений и оценить вклад каждого фактора в снижение потерь давления.

Оценки коэффициента расхода выполнены по формуле согласно [7] для линейного геля. Параметры первичной перфорации (глубина и диаметр ЗКПО) являются оценочными на основании типичных характеристик зарядов класса "повышенное проникновение".

Расчёт влияния на потери давления: используя уравнение потерь на перфорациях, проведём оценку для типичного расхода Q = 2.0 м³/мин и плотности флюида ρ = 1000 кг/м³: **Первичная перфорация (ЗКПО): (**N = 116 отв, d = 9.5 мм (среднее предполагаемое), Cd = 0.86 (расчётное), ΔP = 1 атм (расчет проведен по формуле (1) с использованием полевой системы единиц). То есть при такой конфигурации перфораций потери давления на них должны были быть незначительными. Но фактические замеры SDT показывают примерные потери на перфорациях в диапазоне 90 атм. Для того, чтобы получить такие потери в 90 атм, необходимо, чтобы либо было меньше отверстий (например, меньше 10 шт) при меньшем диаметре (меньше половины от проектного). То есть, наблюдается значительное отклонение реальных измерений от теоретически расчетного, что, в свою очередь, также подтверждает, что в системе «колонна-в-колонне», возможно, перфорации не достигают своего проектного значения.

После реперфорации (комбинация ЗКПО + Скорпион): для упрощённой оценки примем средневзвешенные параметры с учётом того, что добавлено 60 отверстий с улучшенными характеристиками. По расчетам (формула 1) было известно, что реальные перфорации не достигали проектного значения, а добавление 60 отверстий позволило улучшить сообщение с пластом. То есть наблюдалось снижение потерь на SDT.

Данная оценка хорошо согласуется с экспериментально наблюдаемым снижением максимального давления с 330 атм (*рисунок 1*) до 280 атм (*рисунок 2*). Разница 50 атм включает как снижение потерь на перфорациях, так и некоторое снижение околоскважинных потерь. Данный расчёт подтверждает, что **доминирующими** факторами являются увеличение количества отверстий и увеличение диаметра.

Дострел дополнительных интервалов приводит к увеличению суммарного числа перфорационных отверстий N и перераспределению расхода между ними, что снижает удельные потери давления на каждом канале и стабилизирует гидравлический режим закачки.

Согласно уравнению потерь давления на перфорациях, ключевыми параметрами, определяющими гидравлическую проводимость системы, являются диаметр перфорационных каналов *d*, количество открытых отверстий *N,* и коэффициент расхода *Cd.* Дострел дополнительных интервалов, в свою очередь, обеспечивает увеличение *N* и перераспределение расхода между каналами.

С точки зрения уравнения потерь давления на перфорациях (Уравнение 1) перестрел и дострел являются разными инженерными мерами, реализующими один

и тот же физический механизм – увеличение эффективной проводимости системы за счёт роста параметров d, N и Cd. В таком случае альтернативой дострелу может служить и перестрел путем пересчета плотности отверстий на погонный метр. По проведенным расчетам, плотность отверстий рекомендуется увеличивать до 30-40 отв/м при изначальной плотности отверстий 20 отв/м.

Скважина 4910: подтверждение закономерности. Скважина 4910, также имеющая конфигурацию "колонна-в-колонне" (114 мм в 168 мм материнской колонне), продемонстрировала идентичное поведение. После первичной перфорации с параметрами, аналогичными скважине 6551, SDT показал характерный рост давления при снижении расхода (*рисунок 3*). Попытка закачки проппанта в концентрации 100 кг/м³ также привела к быстрому техстопу.

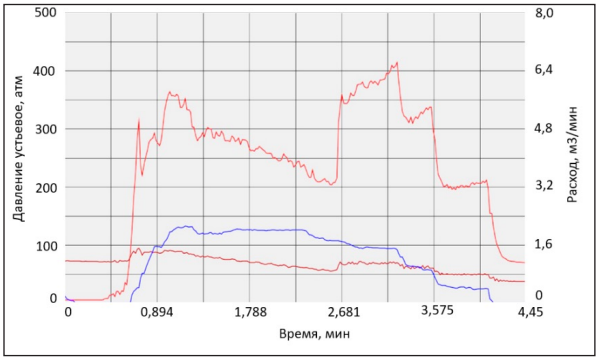

Рисунок 3 – **Графики SDT для скважины 4910. Первый SDT (1182,6-1185,2**

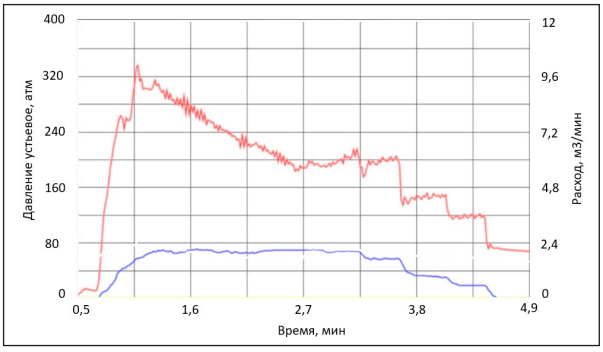

Рисунок 4 – **SDT после 1-го повторного перестрела и дострела (1173,3 – 1176,8 м (дострел), 1182,6-1185,2 м (перестрел))**

После выполнения реперфорации и добавления дополнительных перфорационных отверстий, повторный SDT продемонстрировал нормальное поведение с падением давления на всех ступенях в пределах роста в 5 атм на шаг (*рисунок 4*), что указывало на частичное устранение гидравлических ограничений. Однако последующая попытка закачки проппанта в концентрации 100 кг/м³ завершилась техническим стопом, что свидетельствует о том, что достигнутая проводимость была достаточной для закачки чистого геля, но оставалась пограничной для устойчивого транспорта твёрдой фазы. Только после второго дополнительного дострела

и значительного увеличения суммарного числа перфорационных отверстий (*рисунок 5*) была получена достаточная гидравлическая проводимость ПЗП (наблюдаемый гидроудар на каждом шаге). Была обеспечена стабильная закачка проппанта и успешное проведение основного ГРП.

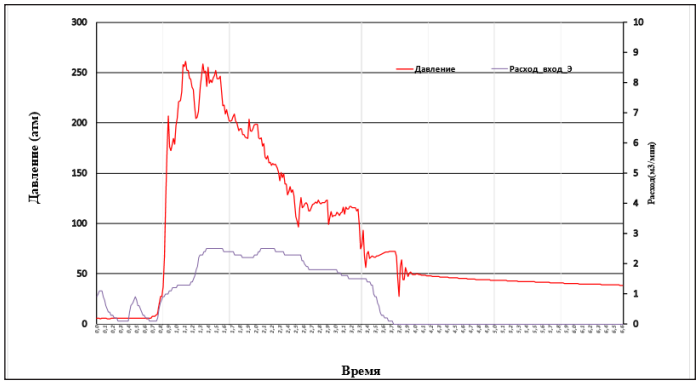

Рисунок 5 – **SDT после 2-го повторного дострела (1118,6-1142 м чистыми 10,9 м)**

SDT в данном случае следует рассматривать как эффективный инструмент выявления грубых гидравлических ограничений, в то время как его нормализация не гарантирует достаточную проводимость системы для закачки проппанта и должна дополняться пробной закачкой геля с проппантом.

В дополнение, в случае скважины 4910 нельзя полностью исключить вклад загрязнения призабойной зоны в ранее перфорированных интервалах, особенно с учётом истории капитального ремонта и повторных закачек гелевых систем. Однако наблюдаемая последовательность событий указывает на то, что доминирующим фактором являлась недостаточная суммарная проводимость системы. Подключение новых интервалов посредством дострела привело как к увеличению числа перфорационных каналов, так и к вовлечению менее повреждённой призабойной зоны, что в совокупности обеспечило устойчивую закачку проппанта. Таким образом, в практических условиях увеличение проводимости системы при помощи дострела может одновременно компенсировать как геометрические ограничения перфорации, так и эффекты локального загрязнения призабойной зоны, что делает данный подход особенно эффективным в скважинах после КРС.

Стоит заметить, что после выполнения дострела (*рисунок 5*) дополнительный Step-Down Test показал качественно иное поведение системы. Незначительный рост давления (порядка 5 атм) на отдельных промежуточных ступенях сопровождался устойчивой стабилизацией на первой ступени и выраженными колебаниями давления на максимальном расходе, что указывает на формирование упругого объёма и хорошую гидравлическую связь с пластом. В отличие от предыдущих операций характер роста давления носил переходный, а не ограничительный характер, и не препятствовал устойчивой закачке проппанта. То есть, *абсолютная величина изменения давления и характер его колебаний* оказываются более информативными, чем сам факт роста давления на отдельных ступенях SDT.

Технический стоп до SDT на скважине 5218. Скважина 5218 также имеет конфигурацию колонна-в-колонне с интервалом перфораций в 1251-1253,1 м, 1255-1258,1 м. Перед 1-м подходом перфорирована 5,2 м с числом отверстий 104, марка заряда Скорпион-20ГП. В данной скважине проведение Step-Down Test оказалось невозможным вследствие резкого роста давления уже на этапе мини-ГРП без проппанта. Такое поведение указывает на критическое ограничение входной проводимости системы перфораций. Выполненная после этого реперфорация существующего интервала (*перестрел*) привела к радикальному изменению гидравлического отклика: последующий Step-Down Test продемонстрировал стабильное давление на всех ступенях (*рисунок 6*). Здесь перед 2-м подходом провели реперфорацию (количество отверстий - 104, в сумме 208 отверстий., марка заряда Скорпион+АКВ пласт 64 ГП). Основной ГРП был успешно выполнен. Данный пример подтверждает, что невозможность выполнения SDT сама по себе может служить диагностическим признаком необходимости повторной перфорации.

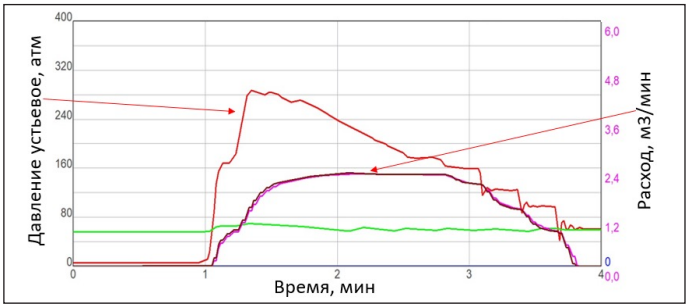

Рисунок 6 – **SDT после перестрела (1251-1253,1 м, 1255-1258,1 м)**

В частности, SDT является не только диагностическим инструментом, но и фильтром применимости: в условиях критического ограничения входной проводимости невозможность его проведения должна рассматриваться как самостоятельный индикатор необходимости изменения системы перфорации.

SDT на скважине 1237 без повторной перфорации. В одном из случаев на скважине 1237 Step-Down Test демонстрировал стабильное давление на всех ступенях с незначительным ростом порядка 5 атм, что указывало на достаточную проводимость системы перфораций (*рисунок 7*). Данная скважина также имела систему «колонна-в-колонне». Однако отсутствие выраженных колебаний давления (хаммер эффект) и высокий уровень трений (порядка 150 атм) свидетельствовали о недостаточной развитости трещины. В данной ситуации было принято решение отказаться от повторной перфорации и выполнить мини-ГРП с проппантом. Переходить на перестрел интервала в данном случае не был приоритетным, так как на всех ступенях SDT наблюдался лишь незначительный рост давления до 5 атм на шаг. Последовательное проведение мини-ГРП привело к существенному снижению трений и обеспечило возможность успешной закачки основного ГРП. Данный пример подчёркивает, что SDT может использоваться не только для выявления необходимости перфорационных работ, но и для обоснованного выбора альтернативных методов улучшения гидравлической проводимости.

Скважина 1768: превентивное применение оптимизированного дизайна перфорации. Скважина 1768 является показательным примером превентивного подхода к проектированию перфорации, при котором на основе анализа предыдущих операций был сразу применён оптимизированный дизайн, позволивший избежать необходимости последующей реперфорации. С самого начала была реализована перфорация с повышенной плотностью, что обеспечило достаточную входную проводимость системы ещё до проведения стимулирующих операций.

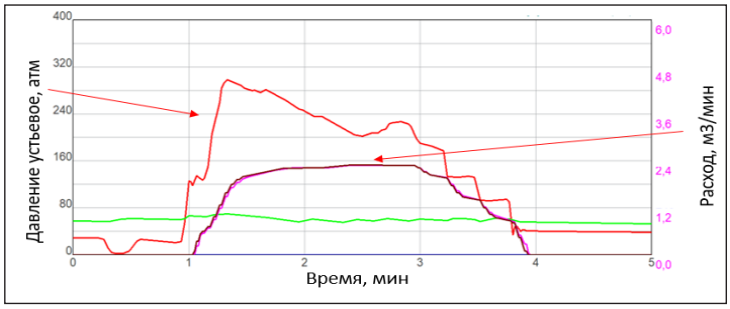

Рисунок 7 – **1237 скважина, SDT без перестрела после закачки проппантной пачки**

Для перфорации использовался перфоратор ЗКПО-73 с диаметром корпуса 73 мм. Плотность перфорации составила 40 отверстий на метр, что в два раза превышает стандартно применяемые значения. При длине перфорируемого интервала порядка 7,5 м общее количество отверстий достигло 300 при стандартной фазировке 60°. Такой подход был направлен на максимальное снижение потерь давления на входе в пласт и равномерное распределение расхода между перфорационными каналами.

После выполнения перфорации был проведён мини-ГРП с пробной закачкой проппанта в концентрации 100 кг/м³. В ходе закачки не наблюдалось роста давления, а проппант был закачан стабильно, что подтвердило адекватность выбранного дизайна перфорации. В связи с этим проведение Step-Down Test было признано необязательным, поскольку пробная закачка проппанта уже продемонстрировала отсутствие гидравлических ограничений.

Дополнительным подтверждением хорошей проводимости системы стало наличие чёткого гидроударного отклика при остановке насосов. Наблюдаемый water hammer свидетельствовал о формировании упругого объёма и надёжной гидравлической связи скважины с пластом. Основной гидроразрыв пласта был выполнен без осложнений, с успешной закачкой полного расчётного объёма проппанта и достижением максимальной концентрации 1000 кг/м³. Операция прошла в штатном режиме, что подтвердило эффективность превентивного применения оптимизированного дизайна перфорации.

Наличие чёткого гидроударного отклика (water hammer) при остановке насосов является важным независимым индикатором хорошей гидравлической связи скважины с пластом. Чёткий water hammer подтверждает, что перфорация с плотностью 40 отв/м обеспечивает достаточно низкие потери для беспрепятственного течения флюида и создания высокопроводящей трещины.

Диагностические сценарии Step-Down Test в системе колонна-в-колонне. Таким образом, анализ поведения давления при проведении Step-Down Test на скважинах с системой колонна-в-колонне позволяет выделить несколько характерных сценариев, отражающих различные лимитирующие механизмы закачки (*таблица 1*).

Таблица 1 – **Диагностические сценарии Step-Down Test в системе колонна-в-колонне**

Сценарий	SDT	Гидроудар	Решение
Критическое ограничение	невозможен / жёсткий рост	нет	перестрел
Входное ограничение	рост 10–20+ атм	нет	перестрел / дострел
Пограничный режим	~5 атм	есть	не трогать
Недоразвитая трещина	~5 атм	нет	мини-ГРП с проппантом

Заключение и выводы

В работе рассмотрены характерные сценарии поведения давления при Step-Down Test и их связь с лимитирующими механизмами закачки при гидроразрыве пласта в системе колонна-в-колонне. На основании выполненного анализа и обобщения полевого опыта сформулированы следующие выводы:

1. Step-Down Test является ключевым диагностическим инструментом для определения лимитирующих механизмов закачки при гидроразрыве пласта в системе колонна-в-колонне.
2. Невозможность выполнения Step-Down Test или резкий рост давления на минимальных расходах указывают на критическое ограничение входной проводимости и обосновывают необходимость повторной перфорации.
3. Рост давления более чем на 10–20 атм при отсутствии гидроудара свидетельствует о недостаточной проводимости системы перфораций и требует перестрела или дострела.
4. Незначительный рост давления порядка 5 атм в сочетании с выраженным гидроударным эффектом указывает на хорошую гидравлическую связь с пластом и отсутствие необходимости дополнительных перфорационных работ.
5. Отсутствие гидроудара при незначительном росте давления и высоких трениях указывает на недоразвитую трещину, при которой более эффективным решением является проведение мини-ГРП с проппантом.
6. Превентивное применение оптимизированного дизайна перфорации с повышенной плотностью отверстий позволяет снизить риск технических стопов и обеспечить успешную закачку основного ГРП с первого подхода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джатыков Т.Е., Сагиндыков Б.Ж. Современные особенности проведения гидроразрыва пласта как эффективного метода интенсификации добычи углеводородов. // Нефть и газ. – 2017. – №3 (99). – С. 52-67. [Jatykov T.E., Sagyndykov B.Zh. Sovremennye osobennosti provedeniya gidrorazryva plasta kak effektivnogo metoda intensifikatsii dobychi uglevodorodov. // Neft' i gaz. – 2017. – №3 (99). – S. 52–67.]
2. Istayev, A., Jatykov, T., Kosset, T. Hydraulic Fracturing in a Devonian Age Carbonate Reservoir: A Case Study // SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference – Manama, Bahrein, 2019. SPE-194942-MS. https://doi.org/10.2118/194942-MS

3. Джатыков Т.Е., Бимураткызы К. Комплексная интерпретация и анализ параметров закачки при проведении диагностического гидроразрыва пласта на юрские отложения песчаников // 16-я международная научно-практическая конференция, Пенза, Россия, 2021 С. 49-55. [Jatykov T.E., Bimuratkyzy K. Kompleksnaya interpretatsiya i analiz parametrov zakachki pri provedenii diagnosticheskogo gidrorazryva plasta na yurskie otlozheniya peschanikov. // 16-ya mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, Penza, Rossiya, 2021 S. 49-55.]
4. Cleary, M. P., Johnson, D. E., Kogsbøll H., et al. Field Implementation of Proppant Slugs to Avoid Premature Screen-Out of Hydraulic Fractures with Adequate Proppant Concentration // Low Permeability Reservoirs Symposium – Denver, Colorado, 1993. SPE-25892-MS. https://doi.org/10.2118/25892-MS
5. Massaras, L. V, Dragomir, A., Chiriac, D. Enhanced Fracture Entry Friction Analysis of the Rate Step-Down Test // SPE Hydraulic Fracturing Technology – Texas, U.S.A., 2007. SPE-106058-MS. https://doi.org/10.2118/106058-MS
6. Dunham, E. M., Zhang, J., Moos, D. Constraints on Pipe Friction and Perforation Cluster Efficiency from Water Hammer Analysis // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition – Texas, U.S.A., 2023. D021S003R006. https://doi.org/10.2118/212337-MS
7. El-Rabba, A. M., Shah, S. N., Lord, D. L. New Perforation Pressure-Loss Correlations for Limited-Entry Fracturing Treatments // SPE Production and Facilities. – 1999. – №14(01). – P. 63–71. https://doi.org/10.2118/54533-PA
8. Jatykov T.E., Bimuratkyzy K. Case Study: An Approach for Hydraulic Fracturing Minifrac G-Function Analysis in Relation to Facies Distribution in Multilayered Clastic Reservoirs. // SPE Production and Operations. – 2021. – 37(01). – p. 99-106. https://doi.org/10.2118/206751-PA
9. Lizak K.F., Bartko K.M., Self J.F et al. New Analysis of Step-Rate Injection Tests for Improved Fracture Stimulation Design // SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control – Louisiana, USA, 2006. SPE-98098-MS. https://doi.org/10.2118/98098-MS
10. Wirdansyah L., Nayef M., Al-Sultan A. et al. Does the Horizontal Fracture Limit the Fracture Height Growth in Jubaila Source Rock? // SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition – Jakarta, Indonesia, 2017. SPE-187022-MS. https://doi.org/10.2118/187022-MS
11. Muhammad A., Noor T., Maad S., et al. First Multistage Fracturing of Horizontal Well Drilled in Conventional Tight Carbonate Reservoir in An Onshore Field in the UAE – Challenges and Lessons Learned // In the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference – Abu Dhabi, UAE, 2020. SPE-203226-MS. https://doi.org/10.2118/203226-MS
12. David C., Matt W., Cody D. Correlating Surface and Downhole Perforation Entry Hole Measurements Leads to Development of Improved Perforating Systems. // SPE Drill and Compl. – 2023. – № 38 (02). – p. 381–403. https://doi.org/10.2118/212335-PA
13. Johannes V., Wael El S., Satya P. Geomechanical Analyses of Hydraulic Fracturing Efficiency and Challenges in a Tight Clastic Reservoir: Experiences Over Years // Middle East Oil, Gas and Geosciences Show – Manama, Bahrain, 2023. SPE-213657-MS. https://doi.org/10.2118/213657-MS
14. Somnath M., Gustavo U., Paul H. Uncertainties in Step-down Test Interpretation for Evaluating Completions Effectiveness and Near Wellbore Complexities // SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference – Colorado, USA, 2019. URTEC-2019-1141-MS. https://doi.org/10.15530/urtec-2019-1141
15. Hafeez Q., Haider M., Hameed A., Khan M. Decoding Fracturing Complexity in Thin Laminated Limestone Stringers: Structured Approach to Reduce Uncertainty // ADIPEC – Abu Dhabi, UAE, 2025. SPE-229965-MS. https://doi.org/10.2118/229965-MS