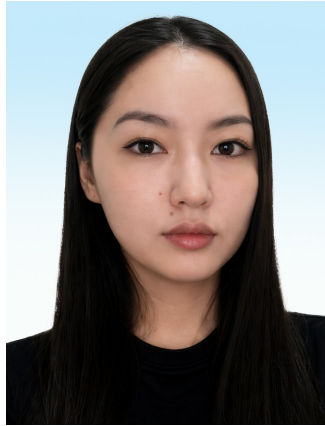


УДК 622.243.92:622.243.24:553.98(574.1); <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2026-2.07>
<https://orcid.org/0000-0002-7979-1188>
<https://orcid.org/0000-0003-4229-429X>
<https://orcid.org/0009-0006-6008-7787>

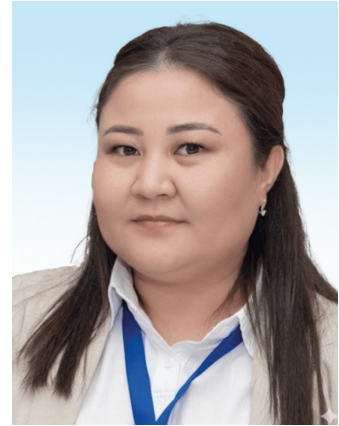
ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ УДАРНО-ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ БУРЕНИЯ В ПЛОТНЫХ КОЛЛЕКТОРАХ



Б.С. АХЫМБАЕВА,
PhD, ассоциированный профессор,
b.akhymbayeva@satbayev.university



Д.А. ОМАРОВА,
докторант,
990218401143-D@stud.satbayev.university



Б.К. МАУЛЕТБЕКОВА,
PhD, старший преподаватель,
b.mauletbekova@satbayev.university

“SATBAYEV UNIVERSITY”

Республика Казахстан, 050000, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22

В статье представлены результаты гидродинамического обоснования параметров ударно-гидравлической системы для повышения эффективности резки боковых стволов в плотных карбонатных отложениях. Исследование базируется на фактических данных реконструкции скважин Прикаспийской синеклизы.

Разработана математическая модель на основе уравнения Жуковского, описывающая волновые процессы в бурильной колонне с учетом реологических свойств высокоплотных полимерных растворов (1,22–1,28 г/см³). Путем численного моделирования определен оптимальный диапазон частот ударного воздействия (10–15 Гц), обеспечивающий переход от статического к динамическому режиму разрушения породы.

Установлено, что применение системы позволяет минимизировать удельную механическую энергию (УМЭ) и формировать зону предразрушения глубиной до 3 мм. Практическая значимость заключается в выработке технологических рекомендаций по режимам бурения долотами PDC в условиях ограниченного радиального зазора (149,2 мм).

Предложенные режимы обеспечивают рост механической скорости проходки на 25–40% при сохранении стабильности стенок скважины. Результаты исследования позволяют снизить энергоемкость процесса разрушения и сократить сроки строительства скважин в сложных геолого-технических условиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ударно-гидравлическая система, механическая скорость проходки, удельная механическая энергия, карбонатный коллектор, боковой ствол.

ТЫҒЫЗ КОЛЛЕКТОРЛАРДА БҰРҒЫЛАУ ҮШІН СОҚПАЛЫ-ГИДРАВЛИКАЛЫҚ ЖҮЙЕНІҢ ПАРАМЕТРЛЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Б.С. АХЫМБАЕВА, PhD, қауымдастырылған профессоры, b.akhymbayeva@satbayev.university
Д.А. ОМАРОВА, докторанты, 990218401143-D@stud.satbayev.university
Б.К. МАУЛЕТБЕКОВА, PhD, аға оқытушысы, b.mauletbekova@satbayev.university

“SATBAYEV UNIVERSITY”

Қазақстан Республикасы, 050000, Алматы қ., Сәтбаев к., 22

Мақалада терең орналасқан тығыз карбонатты шөгінділер жағдайында бүйірлік ұңғымаларды бұрғылау тиімділігін арттыру үшін соқпалы-гидравликалық жүйенің жұмыс параметрлерін гидродинамикалық негіздеу және оңтайландыру нәтижелері берілген. Зерттеу Каспий маңы синеклизасы кен орындарындағы ұңғымаларды қайта жаңартудың нақты деректеріне негізделген.

Жоғары тығыздықтағы полимерлі ерітінділердің (1,22–1,28 г/см³) реологиялық қасиеттерін ескере отырып, бұрғылау тізбегіндегі толқындық процестерді сипаттайтын Жуковский теңдеуі негізінде математикалық модель әзірленді. Сандық модельдеу көмегімен тау жыныстарының бұзылуының статикалық режимнен динамикалық режимге өтуін қамтамасыз ететін соққы әсерінің оңтайлы жиілік диапазоны (10–15 Гц) анықталды.

Жүйені қолдану меншікті механикалық энергияны (ММЭ) барынша азайтуға және тереңдігі 3 мм-ге дейінгі алдын ала бұзылу аймағын қалыптастыруға мүмкіндік беретіні дәлелденді. Жұмыстың практикалық маңыздылығы шектелген радиалды саңылау жағдайында (149,2 мм) PDC қашауларымен бұрғылау режимдері бойынша технологиялық ұсыныстарды әзірлеуде болып табылады. Ұсынылған режимдер ұңғыма қабырғаларының тұрақтылығын сақтап отырып, механикалық бұрғылау жылдамдығының (МБЖ) 25–40%-ға өсуін қамтамасыз етеді.

Зерттеу нәтижелері тау жыныстарының бұзылу процесінің энергия сыйымдылығын төмендетуге және күрделі геологиялық-техникалық жағдайларда ұңғымаларды салу мерзімін қысқартуға мүмкіндік береді.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: соққылы-гидравликалық жүйе, механикалық бұрғылау жылдамдығы (МБЖ), меншікті механикалық энергия (ММЭ), карбонатты коллектор, бүйірлік оқпан.

OPTIMIZATION OF HYDRAULIC IMPACT SYSTEM PARAMETERS FOR DRILLING IN TIGHT RESERVOIRS

B.S. AKHYMBAYEVA, PhD, associate professor, b.akhymbayeva@satbayev.university
D.A. OMAROVA, PhD student, 990218401143-D@stud.satbayev.university
B.K. MAULETBKOVA, PhD, senior lecturer, b.mauletbekova@satbayev.university

“SATBAYEV UNIVERSITY”

Republic of Kazakhstan, 050000, Almaty, Satpayeva str. 22

The paper presents the results of hydrodynamic substantiation of hydraulic impact system parameters to enhance sidetracking efficiency in tight carbonate formations. The study is based on field data from well reconstruction in the Pre-Caspian Basin.

A mathematical model based on the Zhukovsky equation was developed to describe wave processes in the drill string, accounting for the rheological properties of high-density polymer drilling fluids (1.22–1.28 g/cm³). Through numerical simulation, an optimal impact frequency range of 10–15 Hz was identified, facilitating the transition from static to dynamic rock failure modes.

It was established that the system implementation minimizes the mechanical specific energy (MSE) and promotes the formation of a pre-fracture zone up to 3 mm deep. The practical significance

lies in the formulation of technological recommendations for PDC bit drilling regimes under limited radial clearance conditions (149.2 mm).

The proposed regimes ensure a 25–40% increase in the rate of penetration (ROP) while maintaining wellbore wall stability. The research findings allow for reducing the energy intensity of the rock failure process and shortening well construction timelines in complex geo-technical conditions.

KEYWORDS: *hydraulic impact system, rate of penetration, mechanical specific energy (MSE), carbonate reservoir, sidetrack.*

Введение. Глобальный энергетический ландшафт 2020-х годов характеризуется устойчивым ростом спроса на углеводородное сырье, несмотря на тренды декарбонизации [1]. В 2023 году мировое потребление нефти достигло рекордных отметок, при этом США, Саудовская Аравия и Россия сохранили лидирующие позиции в добыче; в частности, суточная добыча в США превышала 13 миллионов баррелей. Однако поддержание таких темпов требует вовлечения в разработку нетрадиционных и трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ), значительная часть которых приурочена к плотным коллекторам с низкой проницаемостью. Карбонатные резервуары составляют около 60% мировых запасов нефти и газа, но их разработка осложнена высокой гетерогенностью и низкими фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС).

Месторождение «ХУ», расположенное в Мугалжарском районе Актюбинской области Республики Казахстан, является типичным примером сложного объекта Прикаспийской нефтегазоносной провинции. Целевые горизонты КТ-I и КТ-II залегают на глубинах до 4200 метров по вертикали и представлены плотными известняками и доломитами. Реконструкция фонда скважин, таких как «Х», путем зарезки боковых стволов (ЗБС) признана наиболее эффективным способом вовлечения в эксплуатацию недренированных зон пласта. При этом формирование дополнительных стволов малого диаметра (149,2 мм) в твердых породах сталкивается с рядом технологических барьеров: низкой эффективностью традиционного вращательного бурения, быстрым износом PDC-долот и сложностью передачи осевой нагрузки на больших глубинах.

Традиционное разрушение горных пород на забое основано на статическом давлении режущих инструментов. В условиях глубоких скважин всестороннее давление (горное давление) переводит породу в пластическое состояние, что резко увеличивает энергоемкость процесса. Ударно-вращательный способ бурения, использующий энергию гидравлического удара, позволяет накладывать высокочастотные импульсы на статическую нагрузку, инициируя в породе зону предразрушения глубиной до 3 мм. Это приводит к накоплению микрповреждений и снижению динамического предела прочности, что особенно актуально для карбонатных отложений с низкой пористостью.

Целью данного исследования является гидродинамическое обоснование параметров ударно-гидравлической системы, интегрируемой в компоновку низа бурильной колонны (КНБК), для оптимизации процесса ЗБС. Актуальность работы подтверждается необходимостью снижения стоимости метра проходки и сокращения сроков строительства скважин в условиях АВПД и сложных температурных режимов (до 68°C). В работе решаются задачи моделирования распространения ударных волн в

вязкой среде бурового раствора, анализа взаимодействия системы «инструмент-порода» и выработки практических рекомендаций по режимам бурения.

Материалы и методы исследования

Для эффективного формирования дополнительных стволов в плотных коллекторах требуется устройство, способное преобразовывать гидравлическую энергию потока промывочной жидкости в механическую энергию продольных ударов [2]. В рамках проекта реконструкции скважины «Х» рассматривается интеграция гидроударного механизма в состав высокотехнологичной КНБК, включающей PDC-долота диаметром 149,2 мм и роторные управляемые системы (РУС) или винтовые забойные двигатели (ВЗД).

Современная ударно-гидравлическая система (гидроударник) представляет собой забойный механизм поршневого типа. Основными конструктивными элементами являются:

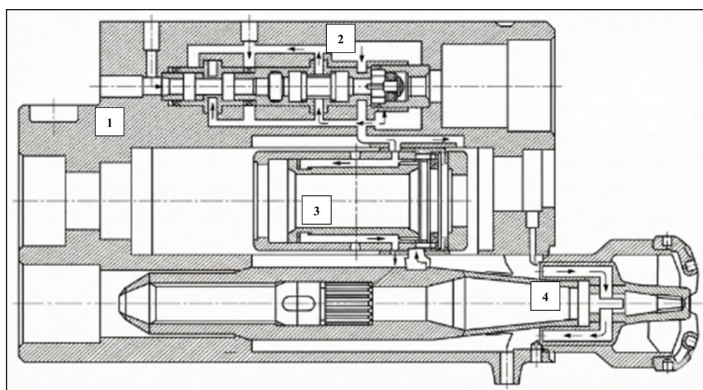


Рисунок 1 – Современная ударно-гидравлическая система

1. Корпус: изготавливается из высокопрочных легированных сталей, способных выдерживать значительные внутренние давления и абразивный износ. Для ЗБС диаметр корпуса обычно составляет 105–120 мм.

2. Клапанно-распределительное устройство: сердце системы, обеспечивающее циклическое перекрытие потока бурового раствора. В зависимости от типа (золотниковый, тарельчатый или дифференциальный), клапан определяет частоту и форму ударного импульса.

3. Поршень-ударник: массивный элемент, совершающий возвратно-поступательные движения под действием перепада давления. Масса поршня варьируется в зависимости от требуемой энергии удара (300–500 Дж).

4. Наковальня (шпиндель): передает энергию удара непосредственно на долото. Конструкция шпинделя предусматривает шлицевое соединение для передачи крутящего момента от ротора или забойного двигателя.

Функционирование системы базируется на использовании явления прямого гидравлического удара, возникающего при мгновенном торможении потока жидкости. Согласно теории Жуковского, при перекрытии проходного сечения клапаном давление в пространстве над клапаном возрастает скачкообразно.

Цикл работы можно разделить на следующие фазы:

1. Разгон (прямой ход): клапан закрыт или находится в положении, направляющем поток в верхнюю камеру поршня. Буровой раствор давит на поршень, ускоряя его по направлению к забою. Жидкость из нижней камеры вытесняется в затрубное пространство или через долото.

2. Удар: поршень достигает наковальни. Происходит передача кинетической энергии в виде импульса силы. В этот момент в колонне труб формируется волна сжатия, распространяющаяся вверх.

3. Переключение и возврат: механическая связь или изменение перепада давления заставляет клапан открыться. Давление в верхней камере падает, и поршень под действием возвратной пружины или разности площадей возвращается в исходное положение [3].

Таблица 1 – Основные технико-технологические характеристики и параметры режима работы ударно-гидравлической системы

Технический параметр	Значение для секции 149,2 мм
Рабочая среда	Полимерный раствор (плотность 1,22-1,28 г/см ³)
Расход промывочной жидкости	8 – 16 л/с
Частота ударов	10 – 15 Гц (оптимальная)
Статическая нагрузка (WOB)	6 – 10 тонн
Энергия удара	до 500 Дж

Применение гидроударников с PDC-долотами требует тщательного согласования. Традиционно PDC-резцы считались чувствительными к ударным нагрузкам из-за хрупкости алмазного слоя. Однако современные исследования и полевой опыт на «ХУ» показывают, что высокочастотные удары малой амплитуды не разрушают резцы, а способствуют их более глубокому внедрению в породу и предотвращают «засаливание» долота шламом. Ударное воздействие создает в карбонатных породах сеть микротрещин в зоне предварительного разрушения, что снижает удельное сопротивление породы резанию. Это позволяет достигать высоких значений ROP при меньших осевых нагрузках, что критично для поддержания проектной траектории бокового ствола.

Разработка эффективной ударно-гидравлической системы невозможна без адекватного математического описания процессов в системе «насос – колонна труб – гидроударник – забой». Модель должна учитывать сжимаемость жидкости, эластичность стенок труб и сложную реологию бурового раствора.

Основным источником энергии для системы является импульс давления, возникающий при работе клапана. Величина повышения давления ΔP при мгновенном изменении скорости потока на Δv описывается классическим уравнением Жуковского [4]:

$$\Delta P = \rho \cdot a \cdot \Delta v$$

где: ρ — плотность бурового раствора (для «Х» составляет 1220–1280 кг/м³);

a — скорость распространения ударной волны в скважинной среде;

Δv — изменение скорости.

На *рисунке 2* показана расчетная схема волновых процессов в системе «колонна труб – гидроударник».

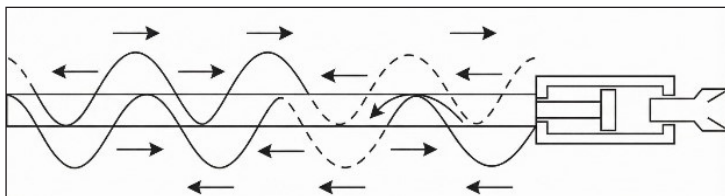


Рисунок 2 – Схема волновых процессов в системе «колонна труб — гидроударник»

Скорость звука a в буровом растворе, находящемся внутри стальной буровой трубы диаметром 88,9 мм (S-135), существенно отличается от скорости звука в неограниченном объеме из-за деформации стенок трубы [4,5]:

$$a = \sqrt{\frac{K_{eff}/\rho}{1 + (K_{eff}/E_p) * (D/e)}}$$

здесь K_{eff} - эффективный модуль объемной упругости раствора, учитывающий наличие газовой фазы и твердых частиц шлама, E_p - модуль Юнга стали (≈ 210 ГПа), D - внутренний диаметр трубы, e - толщина стенки (9,35 мм для «Х»).

Наличие пузырьков воздуха даже в объеме 0,1% может снизить скорость звука в 2-3 раза, что резко уменьшает амплитуду удара. Поэтому проектные требования месторождения «ХУ» предусматривают обязательную дегазацию раствора (вакуумные дегазаторы) перед закачкой в скважину.

Движение поршня-ударника описывается системой дифференциальных уравнений, базирующихся на втором законе Ньютона. Учитываются гидравлические силы в рабочих камерах, силы трения в уплотнениях и реакция наковальни:

$$m_p * \ddot{x} + c * \dot{x} + k * x = \sum F_{hyd} - F_{fric} - F_{res}$$

где: m_p – приведенная масса поршня;

c – коэффициент демпфирования (вязкое трение в растворе);

k – жесткость возвратной пружины;

$\sum F_{hyd} = P_{up} * A_{up} - P_{down} * A_{down}$ - результирующая гидравлическая сила;

F_{res} – сила сопротивления со стороны горной породы в момент контакта.

Граничное условие на забое определяется жесткостью контакта «долото-порода» K_r . В первом приближении взаимодействие моделируется нелинейной пружиной, параметры которой зависят от твердости и пластичности коллектора.

Эффективность процесса бурения оценивается через показатель удельной энергии разрушения. Для ударно-вращательного метода уравнение MSE расширяется за счет включения мощности ударных импульсов: [5]

$$MSE = \frac{WOB}{A_b} + \frac{120 * \pi * N * T}{A_b + ROP} + \eta * \frac{E_{imp} * f}{A_b + ROP}$$

где: A_b - площадь забоя (для долота 149,2 мм, $A_b = 174,8$ см²);

N - обороты ротора (50–150 об/мин);

T - крутящий момент;

E_{imp} - энергия единичного удара;

f - частота ударов;

η - коэффициент передачи энергии через КНБК (обычно 0,6–0,8).

Оптимизация параметров системы направлена на минимизацию MSE. При достижении «резонансной» частоты наблюдается качественный скачок – переход к объемному разрушению породы.

Численное моделирование и оптимизация параметров

Численное исследование проводилось с целью адаптации параметров гидроударника к условиям интервала 3000–4673 м скважины «X». Моделирование выполнялось методом характеристик для гидравлического тракта и методом конечных элементов для анализа НДС породы [6].

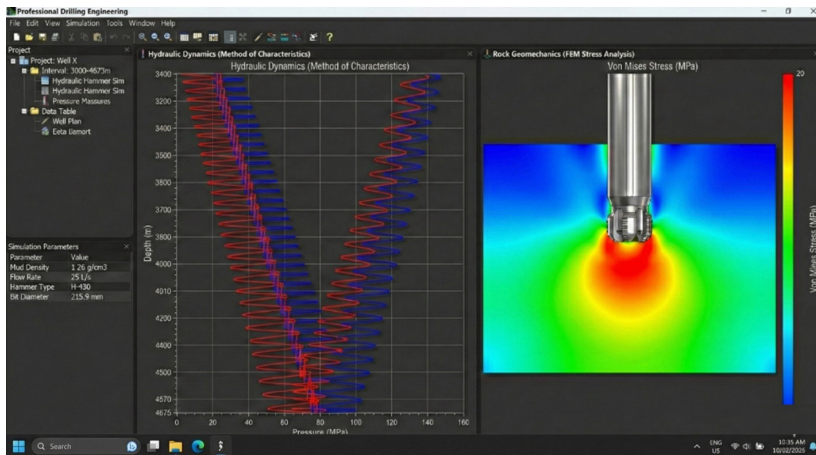


Рисунок 3 – Анализ гидравлических характеристик (метод характеристик)

На *рисунке 3* представлена рабочая область специализированного программного комплекса, использованного для адаптации рабочих параметров гидроударника к горно-геологическим условиям интервала 3000–4673 м скважины «X».

Реализованный комплексный подход включает два сопряженных вычислительных блока:

- Герметичный гидравлический тракт (левая панель): Моделирование волновых процессов выполнено методом характеристик. Визуализированные графики изменения давления позволяют оценить амплитуду ударного импульса и динамику распространения прямой и отраженной волн вдоль буровой колонны. Это необходимо для исключения резонансных явлений и минимизации затухания энергии в полимерном растворе плотностью 1,22–1,28 г/см³.

- Геомеханическая модель (правая панель): Напряженно-деформированное состояние (НДС) горной породы в зоне контакта с долотом рассчитано методом конечных элементов (МКЭ) [7]. Цветная изометрическая карта распределения напряжений на забое подтверждает формирование зоны предразрушения (микротрещин) при заданных частотах ударов, что обеспечивает качественный переход к динамическому режиму разрушения известняков КТ-I/КТ-II.

Интеграция данных модулей в едином интерфейсе позволила оптимизировать частотные характеристики системы и подтвердить эффективность работы механизма в целевом диапазоне 10–15 Гц.

Для месторождения «ХУ» проектным раствором является полимерная ингибированная система. Результаты моделирования показывают прямую зависимость амплитуды ударного импульса от плотности раствора. При увеличении плотности с 1,15 до 1,28 г/см³ (максимально допустимая для предотвращения поглощений в КТ-II) амплитуда давления возрастает на 15–18%.

Таблица 2 – Свойства бурового раствора

Параметр раствора	Вариант (Легкий)	Вариант (Проектный)	Вариант (Тяжелый)
Плотность, г/см ³	1,12	1,22	1,28
Условная вязкость, сПз	40	45	52
Скорость звука <i>a</i> , м/с	1340	1385	1410
Пик давления ΔP , МПа	8,5	10,8	12,4

Однако высокая вязкость (более 50 сек) приводит к «размыванию» фронта ударной волны и росту потерь давления в КНБК. Установлено, что для оптимальной работы системы необходимо поддерживать содержание твердой фазы (песка) менее 0,5%, что обеспечивается 4-х ступенчатой системой очистки на буровой установке ZJ-40.

Анализ зависимости ROP от частоты ударов выявил наличие оптимального диапазона частот (sweet spot), зависящего от механических свойств известняков КТ-I/КТ-II.

- Низкие частоты (1–4 Гц): Энергия ударов распределяется редко, порода успевает полностью восстановиться (релаксация напряжений), эффект интенсификации минимален.

- Средние частоты (10–15 Гц): Оптимальный режим. Каждый последующий удар приходится на уже напряженную область с накопленными микротрещинами. Наблюдается переход к динамическому разрушению.

- Высокие частоты (>30 Гц): возникает эффект интерференции волн в растворе, амплитуда полезного сигнала падает, растут паразитные вибрации, приводящие к преждевременному выходу из строя телеметрических систем MWD/LWD.

Критически важным является согласование статической осевой нагрузки (WOB) и динамического импульса. Если WOB слишком мала, долото после удара «подпрыгивает», теряя контакт с породой. Это ведет к разрушению PDC-резцов из-за неконтролируемых соударений. Для долота 149,2 мм в плотных доломитах скважины «Х» минимальная WOB должна составлять не менее 6 тонн.

Моделирование показало, что при WOB в диапазоне 8–10 тонн обеспечивается постоянный прижим инструмента, при этом ударный импульс гидроударника эффективно «дожимает» породу выше предела прочности на сжатие, который для данных горизонтов оценивается в 60–120 МПа.

Результаты и обсуждение

Основным теоретическим результатом работы является подтверждение гипотезы о переходе режимов разрушения. В условиях ограниченного пространства (малый зазор между КНБК и стенкой 149,2 мм ствола) удаление шлама затруднено [8]. Статическое бурение приводит к формированию под долотом уплотненного ядра («подушки») из перетертой породы, которая демпфирует нагрузку.

Динамическое ударное воздействие разрушает эту структуру. Ударная волна инициирует хрупкое разрушение связей между зернами кальцита. Установлено, что при использовании гидроударника зона предразрушения распространяется радиально и вглубь на расстояние до 1,5–2 радиусов пятна контакта резца. Это качественно меняет процесс: вместо истирания основным механизмом становится скалывание и объемное разрушение.

Эксплуатация ударно-гидравлических систем в боковых стволах требует строгого контроля за давлением в скважине. Суммарное давление (статическое + динамический пик) не должно превышать градиент гидроразрыва пород (G_{hf}). Для месторождения «ХУ» G_{hf} на глубине 3500 м составляет 0,210 кгс/см²/м.

Таблица 3 – Оценка безопасного диапазона импульсного воздействия с учетом градиента гидроразрыва пласта по интервалам глубин

Глубина, м	Пластовое давление, МПа	Гидростат. давление, МПа	Гр. гидроразрыва, кгс/см ² /м	Допустимый импульс, МПа
3000	34,7	36,6 (при 1,22)	0,208	25,8
4200	48,7	51,2 (при 1,22)	0,224	42,8

Анализ показывает, что система обладает значительным запасом по безопасности, так как амплитуда генерируемых импульсов (8–15 МПа) существенно ниже порога гидроразрыва.

Работа в режиме периодических ударов накладывает жесткие требования к усталостной прочности бурильной колонны. Для «Х» используются трубы диаметром 88,9 мм из стали S-135. Расчеты показывают, что при частоте 12 Гц и амплитуде 10 МПа количество циклов нагружения за один рейс (100 часов) достигает 4,3 x 10⁶. Это близко к пределу выносливости для коррозионно-активных сред (наличие минерализованной пластовой воды). Рекомендуется проводить неразрушающий контроль (дефектоскопию) КНБК и первых 10 свечей бурильной колонны не реже одного раза в 450 часов механического бурения.

Заключение и выводы

На основании проведенного гидродинамического обоснования и оптимизации параметров ударно-гидравлической системы для резки боковых стволов в плотных коллекторах «ХУ», сформулированы следующие выводы:

1. Эффективность системы: Использование гидроударников при бурении карбонатов КТ-I и КТ-II позволяет увеличить механическую скорость проходки на 25–40% за счет перехода к динамическому режиму разрушения и формирования развитой зоны предразрушения (до 3 мм).


2. Оптимальные параметры: для формирования ствола 149,2 мм рекомендуется использовать гидроударники с частотой ударов 10–15 Гц и энергией 350–450 Дж.

Использование полимерного раствора плотностью 1,22–1,25 г/см³ обеспечивает необходимую амплитуду импульса при сохранении стабильности стенок скважины.

3. Режим бурения: необходимо поддерживать осевую нагрузку в диапазоне 8–10 тонн для исключения вибрационного отскока долота. Скорость вращения ротора должна быть умеренной (60–90 об/мин), так как основная работа по разрушению выполняется за счет ударов и крутящего момента забойного двигателя.

4. Управление рисками: ввиду АВПД и сложности ЗБС, буровая установка должна быть оснащена станцией ГТК с возможностью регистрации пульсаций давления в реальном времени. При вскрытии продуктивных пластов (градиент порового давления 0,114–0,116) амплитуда ударов должна контролироваться для предотвращения микро-ГРП и поглощений.

5. Техническое обслуживание: с учетом высокой интенсивности динамических нагрузок, обязателен мониторинг износа PDC-резцов и проведение толщинометрии бурильных труб каждые 1200 часов.

Внедрение данных рекомендаций позволит существенно повысить эффективность капитального ремонта скважин методом ЗБС, сократить сроки строительства дополнительных стволов и обеспечить надежное вскрытие плотных коллекторов с сохранением их естественных фильтрационных свойств. Дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение влияния ударных импульсов на качество первичного цементирования хвостовиков диаметром 114,3 мм в условиях динамически сформированного ствола. 

Благодарность. Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (AP26103635-«Разработка и оптимизация ударно-гидравлической системы для многозабойного бурения и повышения производительности малодебитных скважин в условиях слабопроницаемых пластов»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Zheng R., Gao D., Chen X. Exploring the mechanism of pulse hydraulic fracturing in tight reservoirs // Processes. 2023. Vol. 11, No. 12. 3398. <https://doi.org/10.3390/pr11123398>
2. Mahmood S. M. et al. Fluid flow and permeability analysis of tight gas carbonate reservoir rocks using fractures and dynamic data // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2021. Vol. 90. 103894. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103894>
3. Zhang Y., Liu W., Li J. Increasing drilling speed by absorption and hydraulic supercharging of drill string in formation containing hydrogen sulfide: A case study // Energies. 2022. Vol. 15, No. 16. 5767. <https://doi.org/10.3390/en15165767>
4. Zhao X. et al. Prediction of the effects of pulsating hydraulic fracturing on the porous structure and permeability of coal based on NMR and AE spectra // ACS Omega. 2024. Vol. 9, No. 18. P. 20145–20158. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01799>
5. Wang Y. et al. Experimental study on mechanical specific energy optimization in axial-torsional coupled impact drilling // Applied Sciences. 2025. Vol. 15, No. 1. 166. <https://doi.org/10.3390/app151810166>

6. He C. et al. Response characteristics of drill-string guided wave in downhole acoustic telemetry // *Chinese Physics B*. 2023. Vol. 32, No. 3. 034301. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/ac8e98>
7. Zhu X. et al. Experimental and numerical simulation study on the mechanism of fracture-increasing and permeability-increasing in granite pore walls by the air DTH hammer percussion drilling // *Processes*. 2024. Vol. 12, No. 4. 758. <https://doi.org/10.3390/pr12040758>
8. Wiercigroch M. et al. Complex dynamics of drill-strings: Theory and experiments // *Journal of Sound and Vibration*. 2017. Vol. 400. P. 331–345. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.04.012>
9. Li W. et al. Fault diagnosis research on impact system of hydraulic rock drill based on internal mechanism testing method // *Shock and Vibration*. 2018. 3264844. <https://doi.org/10.1155/2018/4928438>
10. Zhu H. J. et al. Fatigue life prediction of drill strings under cyclic vibrations in ultra-deep wells // *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 140. 106571. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106571>
11. Грачев С. И. и др. Оптимизация работы буровых долот PDC при бурении в твердых горных породах // *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2020. № 4. С. 34–42. [Grachev S. I. et al. Optimizatsiya raboty burovykh dolot PDC pri burenii v tverdykh gornykh porodakh // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz*. 2020. No. 4. S. 34–42.]
12. Gelfgat M. Y. et al. Advanced Drilling Technologies for Hard Rock Formations // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 16. 7567. <https://doi.org/10.3390/app11167567>
13. Башлык С. М. Техника и технология ударно-вращательного бурения // *Бурение и нефть*. 2018. № 10. С. 22–26. [Bashlyk S. M. Tekhnika i tekhnologiya udarno-vrashchatel'nogo bureniya // *Burenie i neft'*. 2018. No. 10. S. 22–26.]
14. Dupriest F. E., Koederitz W. L. Maximizing Drill Rates with Real-Time Surveillance of Mechanical Specific Energy // *SPE Drilling & Completion*. 2005. Vol. 20, No. 03. P. 165–171. <https://doi.org/10.2118/92194-PA>
15. Iskakov B., Akhmetov A. Geomechanical aspects of drilling lateral shafts in the Pre-Caspian Basin // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2022. Vol. 32, No. 4. P. 815–825.