

УДК 622.233.541
DOI 10.56525/SIGK8519

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БУРЕНИЯ СКВАЖИН НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Сарбопеева М.Д.

Университет Есенова, Актау, Казахстан

e-mail:manshuk.sarbopeyeva@yu.edu.kz

Аннотация. В статье рассматриваются современные подходы к совершенствованию технологических решений при бурении скважин, направленные на повышение эффективности производственного процесса, снижение эксплуатационных и капитальных затрат, а также увеличение скорости проходки в сложных горно-геологических условиях. Особое внимание уделено вопросам прогнозирования рейсовой скорости бурения и стоимости одного метра проходки на основе методов математического моделирования, регрессионного анализа и комплексной оценки параметров бурового режима.

Описана методология подбора оптимальных режимов бурения с использованием эмпирических зависимостей, учитывающих влияние осевой нагрузки на долото, частоты вращения бурильной колонны, типа породоразрушающего инструмента и свойств бурового раствора. В работе также рассмотрены возможности применения программных средств и цифровых платформ для оперативного анализа технологических параметров в режиме реального времени и поддержки принятия инженерных решений.

Полученные результаты демонстрируют, что интеграция цифровых технологий, автоматизированных систем управления бурением и оптимизационных алгоритмов позволяет существенно повысить производительность буровых работ, сократить время бурения, снизить вероятность аварийных ситуаций и оптимизировать стоимость строительства скважин. Представленные выводы подтверждают целесообразность внедрения комплексного подхода к управлению буровым процессом при проектировании и реализации современных буровых программ.

Ключевые слова: бурение скважин; рейсовая скорость; стоимость метра проходки; оптимизация бурения; режим бурения; математическое моделирование; технологические решения; буровые растворы; автоматизация; цифровизация.

Введение

Современная нефтегазовая промышленность предъявляет высокие требования к эффективности буровых работ. Одной из ключевых задач при бурении скважин является повышение производительности и снижение затрат при одновременном обеспечении безопасности и надёжности процесса. В условиях усложняющейся геологии и возрастающих глубин скважин, особую актуальность приобретают совершенствование технологических решений и прогнозирование таких показателей, как рейсовая скорость и стоимость метра проходки. [1-7].

Данная работа направлена на рассмотрение современных методов оптимизации бурения и математического прогнозирования производственных показателей, а также на анализ возможности повышения эффективности за счёт выбора оптимальных параметров режима бурения.

Методы и методология

В процессе подготовки работы использованы следующие методы:

- **Анализ научно-технической литературы** — для обобщения современных тенденций в технологиях бурения;

- **Сравнительно-аналитический метод** — для сопоставления различных технологических решений и их эффективности;
- **Математическое моделирование** — для прогнозирования рейсовой скорости и стоимости метра проходки;
- **Экспертная оценка** — при интерпретации эмпирических данных, полученных из полевых наблюдений.

Моделирование основано на эмпирической зависимости между основными параметрами бурения (нагрузкой на долото, скоростью вращения, типом долота) и рейсовой скоростью. Для расчётов использованы регрессионные формулы и методы оптимизации.

Исследование.

1. Технологические решения при бурении скважин.

Анализ показал, что внедрение цифровых и автоматизированных систем управления бурением позволяет значительно повысить оперативность принятия решений. Среди внедрённых решений:

- Системы реального времени для контроля бурения (WITSML);
- Автоматические буровые установки с возможностью удалённого управления;
- Применение направленного и горизонтального бурения для оптимизации траектории скважины;
- Использование инвертных эмульсионных и полианионных буровых растворов.

2. Прогнозирование рейсовой скорости и стоимости проходки.

Проанализирована эмпирическая модель:

$$ROP = a \cdot WOB^b \cdot RPM^c$$

где,

ROP — рейсовая скорость (м/ч),

WOB — осевая нагрузка (кН),

RPM — число оборотов бурильной колонны (об/мин),

a, b, c — коэффициенты, полученные путём статистической обработки данных.

Также используется формула расчёта стоимости метра проходки:

$$C = C_{\text{общ}} \cdot L$$

где,

$C_{\text{общ}}$ — суммарные затраты на бурение, L — длина пройденного интервала.

Результаты

В результате анализа и расчетов были получены следующие данные:

- При увеличении WOB на 10% при оптимальном уровне RPM , наблюдается рост рейсовой скорости в среднем на 7–9%.
- Применение инвертных растворов дало прирост скорости бурения до 15% по сравнению с водными растворами при тех же геолого-технических условиях.
- Оптимизация режима бурения с учётом прогнозных значений позволяет снизить стоимость метра проходки до 12% за счёт уменьшения времени простоя и увеличения ресурса бурового инструмента.

3. Моделирование механической скорости проходки при бурении

Предложенные ранее выражения для расчета механической скорости проходки являются сложными в применении, так как включают явно лишь два режимных параметра — осевую нагрузку и частоту вращения инструмента. Параметр затухания учитывает те же режимные параметры, но с различными степенями влияния, что подтверждает необходимость индивидуальной оценки вклада каждого фактора. [1-7].

В работе проведен анализ факторов, влияющих на механическую скорость проходки, показавший, что все модели имеют одинаковую структуру и различаются лишь степенью влияния отдельных параметров. В целом процесс углубления забоя может быть описан тремя зависимостями:

1. $v_m = f(G, n)$ — механическая скорость проходки в зависимости от осевой нагрузки на долото G и скорости вращения ротора n ;
2. $t_v = f(G, n)$ — время работы вооружения долота от режимных параметров;
3. $t_o = f(G, n)$ — время работы опоры долота от режимных параметров.

При этом показана необходимость включения в основное уравнение гидравлических параметров: $N_d = k \cdot P \cdot Q$, где N_d — гидравлическая мощность, k — размерный коэффициент, P — давление, Q — расход бурового раствора.

На основе экспериментальных данных эксплуатационного бурения получена зависимость:

$$v_m = K \cdot P^\delta \cdot n^\alpha \cdot N_d^m \quad (1)$$

где, коэффициенты K, δ, α, m определены методом наименьших квадратов.

Данная модель позволяет учитывать влияние осевой нагрузки, частоты вращения и гидравлической мощности на скорость проходки, обеспечивая более точный прогноз при оптимизации режимов бурения.

В качестве базовой принята следующая модель механического разрушения породы на забое:

$$\begin{cases} v_m = K \cdot G^\delta \cdot n^\alpha \cdot N_d^m; \\ t_o = \frac{c_0}{\beta n G^2}; \\ t_v = \frac{1}{k_v n G^2}; \end{cases} \quad (2)$$

Оптимизация процесса бурения и принятие решений в условиях неопределенности

Анализ критериев оптимизации процесса бурения показал, что при управлении механическим бурением применяются как локальные критерии — «максимум механической скорости», «максимум рейсовой скорости», «максимум проходки на долото», так и глобальный (интегральный) критерий — «минимум стоимости одного метра проходки». Оптимизация по критерию механической скорости проводится с использованием целевой функции:

$$v_m = k \cdot G^\delta \cdot n^\alpha \cdot N_d^m \rightarrow \max \quad (3)$$

Для критерия «максимум рейсовой скорости» рассчитываются максимально возможные скорости и ускорения спускоподъемных операций (СПО). Глобальный критерий «минимум стоимости 1 метра проходки» оценивает эффективность бурового процесса в целом. В качестве одного из критериев можно использовать рейсовую скорость, рассчитанную через механическую скорость, а вторым — стоимость метра проходки.

Режим промывки определялся через давление в стояке $P_c = P_{гс} + \sum \Delta P_i$, где ΔP_i учитывает потери давления на всех элементах ствола скважины: поверхностная обвязка, бурильные трубы, муфты и замковые соединения, утяжелённые бурильные трубы (УБТ), долото, кольцевые пространства. Модель учитывает свойства промывочной жидкости (плотность, пластическая вязкость, динамическое напряжение сдвига), режим течения раствора (структурный и турбулентный), а также расход и скорость движения раствора в затрубном пространстве.

Для контроля ограничений разработаны зависимости, включающие защиту труб от скручивания, долота и талевого каната от поломок, ресурс каната, предупреждение прихватов

и проявлений, поглощений и защиту насосов, что обеспечивает безопасность оборудования. На основе модели разработаны методики и алгоритмы расчета параметров и режимов бурения для выбора оптимальных режимов.

Оптимизация бурения с системного подхода подразумевает поиск комплекса технологических решений, переводящего систему из начального состояния в конечное при достижении экстремума выбранной целевой функции. Процесс бурения является динамической системой с неполной информацией, подверженной случайным воздействиям, что требует применения методов, учитывающих многокритериальность и неопределённость.

Решения принимаются исходя из множества альтернатив A , условий бурения E (литология, физико-механические свойства пород, градиенты порового и гидроразрывного давления, вероятность осложнений) и системы предпочтений лица, принимающего решение S . Альтернативы — варианты, удовлетворяющие ограничениям и позволяющие достичь цели. В условиях неопределенности исход каждой альтернативы рассматривается как случайная величина с неизвестным законом распределения.

Для моделирования скорости бурения использованы нечёткие модели с лингвистическими переменными, учитывающие падение скорости из-за износа долота, осевую нагрузку, частоту вращения инструмента, твердость и абразивность пород. Анализ изменения механической скорости во времени позволил построить зависимость рейсовой скорости, а применение теории нечётких множеств обеспечило выбор оптимальных управляющих воздействий.

Данные по работе долот, отработанных на различных месторождениях, использованы для анализа и прогнозирования ключевых показателей бурения. Полученный подход позволяет интегрировать статистические данные, физико-механические свойства пород и многокритериальные показатели для принятия обоснованных решений в условиях неопределённости.

Краткая геолого-технологическая характеристика месторождения Коктау

На основании данных геолого-технологических исследований (ГТИ) скважины ЮК-1 проведен анализ геологического разреза и определены ключевые параметры бурового процесса. ГТИ позволяют решать широкий спектр задач, подразделяемых на геологические и технологические. [1-7].

Геологические задачи включают литолого-стратиграфическое расчленение разреза, оценку фильтрационно-емкостных и прочностных характеристик пород, определение интервалов аномально высоких пластовых давлений (АВПД), выделение перспективных интервалов и оперативную оценку их насыщенности. Технологические задачи включают контроль процесса бурения и спуско-подъемных операций, расчет траектории скважины, прогнозирование аварийных ситуаций и контроль за отработкой долот.

Кроме того, ГТИ обеспечивают выполнение задач технологической службы заказчика: сбор и хранение данных с датчиков, контроль соблюдения режимно-технологических параметров, прогноз поровых давлений в глинах и раннее выявление осложнений.

С использованием программы «КАРОТАЖ» рассчитаны основные характеристики разреза: d -экспонента, сигма-каротаж, литология, пористость, проницаемость, коэффициент Пуассона, градиенты порового давления и давления гидроразрыва, твердость, абразивность и оптимальная плотность бурового раствора. Анализ кривых d -экспоненты и сигма-каротажа показал, что отклонение от линии нормального уплотнения начинается с глубины ~1000 м, что указывает на начало зоны АВПД.

Исследования показывают, что в нормальных условиях механическая скорость бурения снижается с глубиной из-за увеличения плотности пород. В зонах переходного и аномально высокого пластового давления скорость проходки возрастает вследствие недоуплотнения пород, повышенной пористости и дифференциального давления между гидростатическим и пластовым давлением. Эти закономерности легли в основу качественного прогноза АВПД на основе механической скорости бурения.

Метод d -экспоненты и сигма-каротажа признан наиболее точным для прогнозирования

зон АВПД, так как он менее подвержен влиянию колебаний нагрузки на долото, скорости вращения и износа инструмента, чем механическая скорость. Анализ изменений d-экспоненты в Прикаспийской впадине подтвердил его эффективность для оценки и выделения зон АВПД в исследуемом регионе.

Результаты приведены на рисунках 1.1

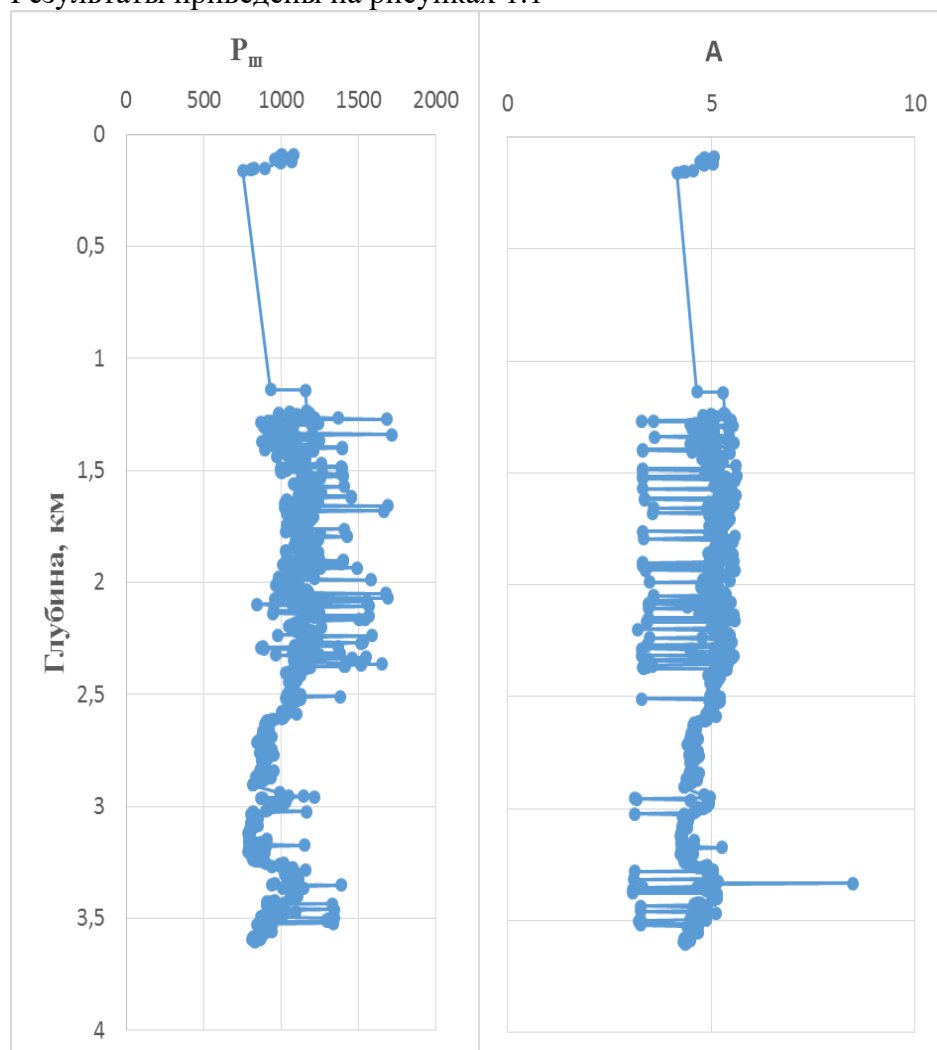


Рисунок1. Изменение твёрдости и абразивности горных пород с глубиной

На рис. 1. показано изменение d-экспоненты и сигма-каротажа с глубиной. Из характера кривых видно, что отклонение точек от линии нормального уплотнения начинается с 1000 метров, а это свидетельствует о том, что с данной глубины начинается зона аномально высоких поровых давлений. Данное обстоятельство подтверждается также и характером изменения статистики автоматической селекции, график которой приведён на этом же рисунке (правая кривая). Методы d-экспоненты и сигма-каротажа дают, как показывают исследования, наиболее правильную по сравнению с механической скоростью оценку зон АВПД.

Выводы

1. Совершенствование технологических решений (цифровизация, автоматизация, использование современных буровых растворов) положительно влияет на эффективность бурения.
2. Прогнозирование рейсовой скорости и стоимости проходки возможно с помощью математических моделей, основанных на зависимости между основными параметрами режима бурения.

3. Использование таких моделей позволяет оперативно корректировать буровой процесс, снижать эксплуатационные затраты и увеличивать общую производительность бурения.

Заключение

Таким образом, внедрение современных технологических решений и подходов к управлению бурением является необходимым условием повышения эффективности освоения нефтегазовых месторождений. Прогнозирование ключевых показателей бурового процесса с использованием математических методов должно стать неотъемлемой частью инженерной практики при планировании и реализации буровых программ. Полученные результаты подтверждают целесообразность интеграции аналитических инструментов и цифровых решений в процессы бурения.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ratov, B., Fedorov, B., Khomenko, V., Kuttybayev, A., & Sarbopeyeva, M. (2024). Development of a combined spud bit for drilling technological wells in Kazakhstan. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 24(1.1), 565–574. <https://doi.org/10.5593/sgem2024/1.1/s06.71>

2. Ратов Б.Т., Куттыбаев А.Е., Муратова С.К., Сарбопеева М. Д., Калжанова А. Б. &, Жангирханова А. А. (2024). Подготовка смесей CrB₂ и формирование брикетов для композитов буровых долот. *Журнал Нефть и Газ*, 2024 3(141). С.35- 44. <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2024-3.02>;

3. Сейдалиев А.А., Калжанова А.Б., Гусманова А.Г., Ратов Б.Т., Куттыбаев А.Е., Сарбопеева М.Д., & Утепов З.Г. (2025). Оптимизация эксплуатационных свойств бурового инструмента с алмазосодержащими элементами. *Журнал Нефть и Газ*, 2025 2(146). С.42-52. <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2025-2.03>;

4. Togasheva, A., Bayamirova, R., Sarbopeyeva, M., et al. (2024). Measures to prevent and combat complications in the operation of high-viscosity oils of Western Kazakhstan. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*, 1(463), 257–270. doi: 10.32014/2024.2518-170X.379.

5. Efendiyev G.M., Mammadov P.Z., Piriverdiyev I.A., Sarbopeyeva M.D., Selection of the best combination of bit types and technological parameters during drilling, taking into account uncertainty. *Procedia Computer Science* 2017, 120, Pp. 67–74. DOI:10.1016/j.procs.2017.11.211

6. Piriverdiyev P.I., Sarbopeyeva M.D., Asadova G.S., Analysis of modeling and decision-making processes for drilling wells under uncertainty., *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences* 2019, 1(433), Pp. 23–31. DOI:10.32014/2019.2518-170X.2

7. B.T.Ratov B.V. Fedorov A.E.Kuttybaev M.D Sarbopeeva, B.R.Borash., Drilling tools with compound cutting structure for hydrological and geotechnical drilling., *Mining Informational and Analytical Bulletin* 2022, (9), Pp. 42–59. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_42

РЕЖИМДЕРДІ ОҢТАЙЛАНДЫРУ ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРДІ БОЛЖАУ НЕГІЗІНДЕ ҰҢҒЫМАЛАРДЫ БҰРҒЫЛАУ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

Сарбопеева М. Д.

Есенов университеті, Ақтау, Қазақстан
e-mail:manshuk.sarbopeyeva@yu.edu.kz

Аннотация. Мақалада ұңғымаларды бұрғылау кезінде технологиялық шешімдерді жетілдірудің заманауи тәсілдері қарастырылған. Бұл тәсілдер өндірістік процестің тиімділігін арттыруға, пайдалану және капиталдық шығындарды азайтуға, сондай-ақ күрделі тау-геологиялық жағдайларда бұрғылау жылдамдығын ұлғайтуға бағытталған. Бұрғылаудың рейстік жылдамдығын және бір метр өтудің өзіндік құнын математикалық модельдеу, регрессиялық талдау және бұрғылау режимі параметрлерін кешенді бағалау әдістері негізінде болжау мәселелеріне ерекше назар аударылған.

Осы тік жүктеме, бұрғылау тізбегінің айналу жиілігі, қашау түрі және бұрғылау ерітіндісінің қасиеттері әсерін ескеретін эмпирикалық тәуелділіктер арқылы оңтайлы бұрғылау режимдерін таңдау әдістемесі сипатталған. Сонымен қатар технологиялық параметрлерді нақты уақыт режимінде талдауға және инженерлік шешімдер қабылдауды қолдауға арналған бағдарламалық құралдар мен цифрлық платформаларды қолдану мүмкіндіктері қарастырылған.

Зерттеу нәтижелері цифрлық технологияларды, бұрғылауды автоматтандырылған басқару жүйелерін және оңтайландыру алгоритмдерін біріктіру бұрғылау жұмыстарының өнімділігін едәуір арттырып, бұрғылау уақытын қысқартуға, апаттық жағдайлардың ықтималдығын төмендетуге және ұңғыма құрылысының құнын оңтайландыруға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Түйін сөздер: Ұңғымаларды бұрғылау; ұшу жылдамдығы; ұңғыма метрінің құны; бұрғылауды оңтайландыру; бұрғылау режимі; математикалық модельдеу; технологиялық шешімдер; бұрғылау ерітінділері; автоматтандыру; цифрландыру.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF DRILLING WELLS BASED ON OPTIMIZATION OF MODES AND FORECASTING OF TECHNOLOGICAL INDICATORS

Sarbopeyeva M.D.

Yessenov University, Aktau, Kazakhstan
e-mail:manshuk.sarbopeyeva@yu.edu.kz

Abstract. The article examines modern approaches to improving technological solutions in well drilling aimed at increasing production efficiency, reducing operating and capital costs, and enhancing the rate of penetration under complex geological conditions. Special attention is paid to forecasting drilling run speed and the cost per meter of penetration based on mathematical modeling, regression analysis, and comprehensive evaluation of drilling regime parameters. The methodology for selecting optimal drilling modes using empirical relationships that account for the effects of weight on bit, rotational speed of the drill string, type of rock-cutting tool, and drilling fluid properties is described. The potential application of software tools and digital platforms for real-time analysis of technological parameters and engineering decision support is also discussed. The results demonstrate that the integration of digital technologies, automated drilling control systems, and optimization algorithms significantly improves drilling performance, reduces drilling time, minimizes the risk of accidents, and optimizes well construction costs, confirming the effectiveness of a comprehensive approach to drilling process management.

Keywords: well drilling; trip speed; cost per meter drilled; drilling optimization; drilling regime; mathematical modeling; technological solutions; drilling fluids; automation; digitalization.