# Исследование и моделирование динамических колебаний эквивалентной циркуляционной плотности при бурении скважин с большим отходом от вертикали

Автор: **Жуманазаров Азамат Нематжонович**

ИП ООО "ERIELL WELL SOLUTIONS"

**Нуманов Назар Андреевич**

ERIELL OSME DMCC

**Аннотация.** В данной работе рассматривается проблема управления эквивалентной циркуляционной плотностью (ЭЦП) при строительстве скважин с большим отходом от вертикали (ERD). Обосновано, что традиционные стационарные модели гидравлики не учитывают динамику накопления и эрозии шламового ложа, что приводит к значительным погрешностям в прогнозировании забойного давления. Представлен разработанный нестационарный двухслойный гидродинамический симулятор, основанный на уравнениях сохранения массы и импульса, решенных методом SETS, который позволяет прогнозировать волновые скачки давления. На основе численных расчетов доказана эффективность использования комбинированных бурильных колонн для стабилизации давления и предотвращения аварийных ситуаций.

**Ключевые слова:** бурение с большим отходом (ERD), эквивалентная циркуляционная плотность (ЭЦП/ECD), нестационарная гидродинамика, шламовое ложе, гидродинамический симулятор, SETS-метод, управление давлением в скважине.

## 1. Введение и актуальность

Проводка скважин с большим отходом от вертикали (extended reach drilling, ERD) является ключевым направлением современного бурового инжиниринга, позволяющим существенно расширить зону дренирования и минимизировать экологические риски. Однако реализация данной технологии сопряжена с критическими вызовами в области гидродинамики, главным из которых является управление эквивалентной циркуляционной плотностью (ЭЦП/ECD) в условиях узкого безопасного окна давлений.[1]

На практике фактические значения ЭЦП, измеряемые забойными датчиками в процессе бурения (PWD), регулярно превышают прогнозные показатели, рассчитанные по традиционным стационарным моделям.[3] Возникающий дефицит точности прогнозирования приводит к поглощениям бурового раствора, гидроразрыву слабоцементированных интервалов и потере устойчивости стенок скважины, что делает исследования нестационарных колебаний ЭЦП крайне актуальными для предотвращения аварийности при строительстве ERD-скважин.[3]

## 2. Научная гипотеза

Периодическое осаждение выбуренной породы с формированием шламового ложа на нижней стенке наклонного ствола в периоды технологических остановок циркуляции (при наращивании бурильной колонны) и его последующая интенсивная гидродинамическая эрозия

после запуска буровых насосов вызывают волнообразные нестационарные колебания эквивалентной циркуляционной плотности.

Пиковые динамические значения ЭЦП в моменты вымыва скопившегося шлама могут более чем в два раза превышать гидравлические потери давления на трение, рассчитанные для условий установившегося течения чистого флюида, выступая главным фактором усталостного разрушения хрупких пород и гидроразрыва пласта в интервалах с невысокой механической целостностью.[3]

### 3. Методология

Для подтверждения гипотезы и прогнозирования динамического забойного давления разработан нестационарный двухслойный гидродинамический симулятор, моделирующий одномерное твердо-жидкостное двухфазное течение в кольцевом затрубном пространстве.[3] Математический аппарат включает уравнения сохранения массы и импульса для каждой фазы во взвешенном потоке (верхний слой) и в шламовом ложе (нижний слой).[3]

Численное решение системы дифференциальных уравнений реализовано с применением двухступенчатого метода повышения стабильности (SETS), что позволило обойти жесткие ограничения Куранта-Фридрихса-Леви и оптимизировать скорость вычислений.[3] Калибровка эмпирических коэффициентов трения, скорости осаждения и уноса шлама выполнена на основе серии крупномасштабных экспериментов на обводных трубопроводах.[3]

Расчеты проводились для двух модельных скважин (Скважина А и Скважина В) с различной глубиной и геометрией бурильной колонны.[3] В рамках исследования оценивалось влияние оптимизации конструкции затрубного пространства скважины (применение комбинированной колонны из бурильных труб диаметром 5 1/2 дюйма и 5-дюймовых толстостенных труб) на снижение динамических пиков давления в открытом стволе диаметром 8 1/2 дюймов.[3]

Базовое уравнение расчета ЭЦП в полевых единицах имеет вид:

$$ECD = \frac{p_f}{0.052 \cdot D} + MW$$

где $p_f$ — гидродинамические потери давления в затрубном пространстве (в фунтах на кв. дюйм), D — истинная глубина скважины по вертикали (TVD, в футах), а MW — статический вес бурового раствора (в фунтах на галлон).[3]

### 4. Выводы и рекомендации

1. Традиционные стационарные модели гидравлики занижают пиковые забойные давления при бурении с большим отходом от вертикали до двух раз, поскольку они игнорируют динамику накопления и эрозии шламового ложа при циклическом чередовании бурения и наращивания колонны.[3]

2. Использование комбинированных бурильных колонн переменного диаметра позволяет эффективно подавлять волновые колебания ЭЦП за счет оптимизации площади затрубного пространства в интервале открытого ствола.[3]

3. Для предупреждения аварийных ситуаций при строительстве ERD-скважин рекомендуется проводить гидравлические расчеты исключительно в нестационарной постановке.[3] Проектирование режимов промывки и механической скорости проходки (ROP) должно быть увязано с графиком наращивания колонны для исключения резких скачков давления при эрозии постели шлама.[3]

**Список литературы**


1. Naganawa S., Okatsu K. Fluctuation of Equivalent Circulating Density in Extended Reach Drilling with Repeated Formation and Erosion of Cuttings Bed. Paper SPE 115149 presented at the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, 25-27 November 2008, Jakarta, Indonesia.

2. Stone C., Tian S. Unaccounted Hydraulics Parameters in Underbalanced and Managed Pressure Drilling. Paper SPE 114667 originally prepared for the SPE Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Technical Conference and Exhibition, 28-29 January 2009, Abu Dhabi, UAE.[2]

3. Solvang S.A., Lehtenberg C., Gill I.S., Pixton H. Managed Pressure Drilling Solves Depletion Drilling Challenges on High-Pressure/High-Temperature Kristin Field. Paper SPE 113672 prepared for the SPE Exhibition and Conference, 28-29 January 2008, Abu Dhabi, UAE.[2]