

ОБЗОР МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ СИЛ ТРЕНИЯ ПРИ БУРЕНИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН

OVERVIEW OF FRICTION FORCES REDUCTION METHODS IN HORIZONTAL WELL DRILLING

А. А. Щевелёв
Andrei A. Shchevelev

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Г. Г. Ишбаев
Gniyatulla G. Ishbaev

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

В статье выполнен обзор наиболее распространенных методов снижения сил трения бурильной колонны о стенки скважины, применяемых при бурении сложнопрофильных и горизонтальных скважин. Приведено развернутое описание технологических, технических (механических) и химических методов снижения сил трения для возможности повышения энергии, подводимой к породоразрушающему инструменту при бурении горизонтальных скважин, а также для снижения веса на крюке и крутящего момента на роторе или верхнем силовом приводе буровой вышки. Обзорная информация в статье рекомендуется для совершенствования подбора бурильной колонны и компоновки низа бурильной колонны при строительстве скважин. Предложенная обширная классификация позволяет научно обосновать и выбрать методы для снижения сил трения бурильной колонны о стенки скважины.

The article provides an overview of the most common methods of reducing the friction forces of a drill string against the borehole walls used in the drilling of difficult trajectories and horizontal wells. A detailed description of technological, technical (mechanical) and chemical methods of friction forces reducing is given in order to increase the energy supplied to the rock cutting tool when drilling horizontal wells, as well as to reduce hook weight and torque on the rotor or upper power drive of the drilling rig. Overview information in the article is recommended to improve the selection of the drill string and bottom hole assembly during the construction of wells. The proposed extensive classification allows one to scientifically substantiate and select methods for reducing the friction forces of a drill string against a borehole wall.

По причине сложности траекторий горизонтальных скважин требуется решение проблем, связанных с доведением нагрузки до долота. Опыт бурения горизонтальных стволов показывает, что одной из основных причин, приводящих к низким технико-экономическим показателям, являются затяжки, посадки и зависания бурильной колонны на стенках скважины и следующей крайней стадии прихвату или слому скважинного инстру-

мента, колонны труб и другого технологического оборудования. Среди влияющих факторов можно выделить значительную силу трения бурильной колонны о стенки промежуточной обсадной колонны или ствола скважины. Это ведет к возможному увеличению веса на крюке при подъеме бурильной колонны, росту крутящего момента на роторе или верхнем силовом приводе буровой вышки и недоведению нагрузки до долота

Ключевые слова

наклонно-направленное бурение; проектирование скважин; горизонтальные скважины; бурильная колонна; технологические, технические, механические, химические методы снижения сил трения; классификация методов снижения сил трения

Key words

directional drilling; well design; horizontal wells; drill string; technological, technical, mechanical, chemical methods of reducing friction; classification of friction forces reduction methods

при бурении и операции спуска бурильной колонны в скважину. Для обобщения снижения сил трения бурильной колонны о стенки скважины предложена следующая классификация методов: технологические, технические (механические) и химические методы (таблица 1).

Технологический метод. Предлагается для снижения сил трения, применения различных способов бурения и технологических операций, энергосберегающих профилей скважин. Рассмотрим таблицу 1. К энергосберегающим профилям отнесены критерии выбора способа разработки месторождения с учетом физико-механических свойств породы, влияющие на построение и сложность профиля будущих скважин. В случае разработки месторождения горизонтальными скважинами важно учесть технологические условия бурения скважин, которые могут сократить будущие расходы на стадии разработки месторождения.

Анализ схем кустования скважин показывает, что для снижения вероятности пересечения стволов скважин начало зарезки ствола и отхода от вертикали следует выполнять в перпендикулярном азимутальному направлению расположения стволов по направлению движения станка (НДС) и противоположному по азимутальному направлению к соседним скважинам. Следовательно, НДС следует выбирать после получения координат целей при планировании раскустовки. Для всех скважин куста рекомендуется рассматривать одно общее азимутальное направление горизонтальных участков скважин, учитывать физико-механические свойства породы при проектировании траектории ствола. Все ограничения по угловым параметрам ствола необходимо учитывать для максимально быстрого прохождения пластов, вызывающих осложнения при бурении, что определяет способ бурения, выбор бурильного оборудования, технологического режима бурения и заложение интервалов стабилизации. Само же расположение геологических целей подбирать в азимутальном направлении горизонтального участка скважины таким образом, чтобы избежать направления бурения строго на восток или запад. Так как при бурении в этом направлении при определении азимута показания магнитных приборов MWD начинают накапливать погрешности измерения, исключить которые возможно только с помощью применения гироскопических приборов, а профиль скважины должен иметь наи-

меньшую длину и желателен должен строиться в одной плоскости.

Энергосберегающие профили скважин проектируются с целью уменьшения общих величин нагрузок, а также напряжения изгиба при работе с бурильной или обсадной колонной. Можно регулировать сложность траектории уменьшением пространственной интенсивности искривления в верхних интервалах скважины при бурении, где вес бурильной колонны максимален и боковые силы при увеличении пространственной интенсивности будут кратно возрастать, а это соответственно будет увеличивать трение бурильной и обсадной колонны, что влечет увеличение крутящего момента и роста веса на крюке. Одно из условий увеличения доводимой осевой нагрузки до долота достигается снижением извилистости ствола за счет уменьшения интервалов направленного бурения и проработки ствола для устранения уступов стенок скважины, при бурении с применением гидравлического забойного двигателя (ГЗД).

Способ бурения — в зависимости от применения технологий бурения с применением в компоновке низа бурильной колонны (КНБК) в своем составе роторно-управляемую систему (РУС) или ГЗД будут разные значения сил сопротивления на бурильную колонну в скважине. Бурение на обсадной колонне — одно из перспективных развивающихся направлений технологии, позволяет решать проблемы, связанные с неустойчивостью ствола скважины, поглощением бурового раствора и растеплением стенок скважины. Технология подразумевает передачу крутящего момента на долото с помощью колонны обсадных труб, а в качестве породоразрушающего инструмента используется однофазовое разбуриваемое долото.

Применение непосредственно над долотом интегрированных датчиков в телеметрических системах MWD/LWD КНБК, такие показатели инклинометрии (зенитного угла и азимута), давления на забое (PWD), датчиков вибрации (DDR), датчиков определения нагрузки на долото (WOB), помогает прогнозировать процессы в скважине и своевременно управлять технологией бурения при помощи специализированного программного обеспечения на основе полученных данных от датчиков приборов MWD/LWD и анализа данных каротажа во время бурения. Геологи

Таблица 1. Обзор методов снижения сил трения бурильной колонны о стенки скважины

Технологические	Энергосберегающие профили	Разработка месторождения	Схема кустования скважин Координаты целей и абсолютные отметки
		Физико-механические свойства породы, влияющие на построение профиля	Способ бурения Выбор бурильного инструмента Параметры технологического режима Выбор профиля и угловых параметров
			Профиль скважины
		Извилистость скважины	ВЗД до 1 г/10 м РУС до 0,5 г/10 м
	Способ бурения	КНБК с роторно-управляемыми системами	Радиальное смещение всей компоновки или большей ее части относительно оси скважины (Point-the-bit) Позиционирование долота достигается смещением приводного вала относительно компоновки либо изменением его кривизны (Push-the-bit) Гибридные
			КНБК с ГЗД
		КНБК с интегрированными датчиками	Измерения давления (PWD) в скважине в приборах MWD/LWD Измерения нагрузки (WOB) на долото и вибрации Зенитный угол, азимут
		Депрессия на пласт	Бурение на депрессии Бурение на репрессии Управляемая депрессия
		Геонавигация	Данные каротажа с датчиков LWD
		Бурение на обсадной колонне	
	Технологические операции	Технологические СПО	Проработка мест затяжек и посадок
		Расширение ствола	Подготовка ствола к спуску ОК или хвостовика
		Операции, проводимые с помощью циркуляционного переводника	Закачка кольматанта, агрессивных или тампонажных материалов Увеличение объема циркуляции Увеличение скорости восходящего потока промывочной жидкости Замена бурового раствора Прокачка ВУС
			Верхний силовой привод Ротор
Поддача долота, управление тормозом лебедки Управл. расходом, моментом и оборотами на роторе			
Механические	Оснастка буровой установки	Положение талевого блока Вес на крюке Момент на роторе Положения клиньев Давления бурового раствора Ходов насоса и расхода раствора Плотности и температуры раствора Уровень жидкости емкостей Индикатор объемного газосодержания	
		Силовой привод буровой установки	
		Автоматизированные системы бурения	
	Снижение сил трения за счет геометрических размеров, жесткости и веса секций БТ	Комбинирование бурильного инструмента	По пределу текучести По жесткости (прохождения интервалов с большим изменением угловых параметров скважины) Типоразмер
		Легкоплавные (алюминевые) бурильные трубы	Гладкие С утолщением стенок скважин по телу трубы Со спиральным оребрением по телу трубы

Механические (продолжение)	Снижение сил трения за счет геометрических размеров, жесткости и веса секций БТ (продолжение)	Трубы типа Гидроклин (Hydroclean, VamDrilling)	Бурильная труба DP
			Утяжеленная бурильная труба HWDP
		Замковые соединения	Бурильная труба Мах
			Утяжеленная БТ модификации Мах
	Дополнения применительно к БТ	Высокомоментные и с уменьшенным диаметром соедин.	
		Со спиральным оребрением	
		Твердосплавные наплавки	
	Устройства гидромеханической очистки	Вращающийся турбализатор	Переводник типа «Гидроклин» (Hydroclean)
			Cutting Bed Impeller
			УГМО — устройство гидромеханической очистки
	Осцилляторы (Создание колебательных движений БК)	Героторный	Осцилляторы компаний NOV*, AGT*, SDP*
		Турбализатор	Маятниково-гидравлический принцип
		Низкочастотный резонатор	Прибор излучателя ультразвука в БК
	Демпферы, амортизаторы	Тип гасимых колебаний (осевые, торсионные, поперечные)	КПД — корректор-подачи долота
			ПЗ — протектор забойный
УБТ, опоры УБТ			
Устройства гидравлические или с резинометаллическими упругими элементами, тарельчатыми и винтовыми пружинами			
Наддолотные инерционные маховики			
Демпферы в комбинации с калибратором и вращающиеся шарошечным калибратором			
Ликвидация прихватов БТ	Ясс	ЯГБ, ЯГК, ЯГР, ЯМБ — гидравлический бурильный, гидравлический крутильный, гидравлический ремонтный, механический бурильный	
		РКМ — расхаживатель колонн механический	
Опорно-центрирующие элементы	Центраторы	Колонные	
		На забойном двигателе	
	Калибраторы	Цельнофрезерованные, шарошечные, выдвигные, переменного диаметра, и т.д.	
		Стабилизаторы	Переменного диаметра
Профилированные бурильные трубы	Цельнофрезерованные		
	СБТ, ЛБТ, УБТ		
Устройство подачи долота	Гидроцилиндры	Забойное устройство подачи долота (ЗУПД-195)	
Конструкция долота	По характеру воздействия на породу	В конструкции долота	
		Дробящие	
		Дробяще-скальвающие	
		Истирающе-режущие	
Химические	РУО	Режуще-скальвающие	
		УВ и вода 80:20	
	Смазочная добавка	УВ и вода 60:40	
Производитель			
Состав	От объема бурового раствора от 0,02 % до 1 % (достигается снижение коэффициента трения от 15 % до 60 %)		

и технологи осуществляют геонавигацию ствола скважины, корректируя траекторию скважины в режиме реального времени с целью увеличения проходки по наиболее продуктивной части пласта-коллектора и, как следствие, возможно, усложняя профиль по испытанию нагрузок бурильной колонны. Бурение на депрессии, репрессии или управляемой депрессии на пласт влияет на вели-

чину нагрузок и условия в скважине, и следовательно на бурильную колонну. Анализ данных журналов эксплуатационного бурения горизонтальных участков на Куюмбинском месторождении (Красноярский край) показывает, что при бурении на управляемой депрессии на пласт и замещении части раствора азрированным раствором уменьшается плотность бурового раствора, и, как следствие,

вес на крюке бурильной колонны становится больше и увеличиваются общие нагрузки на бурильную колонну.

Технологические операции, такие как СПО для дополнительной очистки скважины с проработкой мест затажек и посадок, снижают силы сопротивления и значение веса на крюке в последующих операциях. Расширение ствола скважины используют для подготовки ствола к спуску обсадной колонны, промежуточной колонны или хвостовика, что облегчает хождение бурильного инструмента в скважине. Применение циркуляционного переводника для технологических операций нашло большое практическое применение в бурении при таких операциях, как закачка кольматанта, агрессивных или тампонажных материалов в пласт; увеличение объема циркуляции; увеличение скорости восходящего потока промывочной жидкости; замена бурового раствора; прокачка пачек ВУС применительно для очистки скважины и улучшения хождения бурильного инструмента.

Технический (механический) метод. Для снижения сил трения применяют следующие способы. Применение верхнего силового привода дает преимущества над ротором при бурении горизонтальных и морских скважин. Верхний силовой привод дает возможность регулировать частоту вращения БК при бурении, проработку при подъеме и спуске бурильной колонны, наращивании/разборке бурильной колонны свечами и одиночными трубами, тем самым уменьшается вероятность прихватов бурового инструмента и т.д.

Автоматизированные системы управления процессом бурения скважин предназначены для осуществления управления технологическим процессом с постоянным автоматизированным контролем электроники. Одним из активно развивающихся в настоящее время направлений буровой индустрии является управление процессом подачи нагрузки на долото и удержания перепада давления посредством управления тормозом лебедки с целью поддержания механической скорости проходки, нагрузки на долото и перепада давления для поддержания параметров в пределах заданных границ, что позволяет сократить время бурения, снизить уровень вибрации, скачков давления, биения и износа КНБК и бурильной колонны, повышает качество ствола скважины за счет снижения микрозвилистости.

Применение датчиков контроля бурения и мониторинг их показателей на пульте бурильщика, станции ГТИ и телеметрической партии необходимы для управления и прогнозирования буровыми процессами. Навыки анализа показателей бурения с датчиков буровой и своевременное принятие мер в процессе бурения отражаются на механической скорости проходки и успешном достижении целей бурения скважины.

Комбинирование бурильного инструмента — по типоразмеру и пределу текучести, к примеру, трубы с большим диаметром и меньшим пределом текучести рациональнее использовать в горизонтальном интервале, что увеличивает скорость кольцевого потока, а компоновка при меньшем пределе текучести и большем диаметре более жесткая, чем с меньшим диаметром стальных труб. Но в некоторых случаях нужна гибкость бурильных труб при больших пространственных интенсивностях, где трубы с меньшим диаметром и малым пределом текучести более предпочтительны. С высоким пределом текучести трубы в бурильной колонне следует располагать ближе к устью, где нагрузки максимальны. Основным ограничением при бурении протяженных горизонтальных участков стволов малого диаметра и боковых стволов являются силы сопротивления перемещению и вращению бурильной колонны, преодоление которых вызывает в трубах повышенные сжимающие/растягивающие усилия и крутящие моменты в процессе передачи осевой нагрузки и момента на долото. К примеру, возможны следующие решения: применение бурильных труб 139,7 мм вместо труб 127,0 мм или 101,6 мм вместо 88,9 мм, что увеличит жесткость труб и добавит большей устойчивости к синусоидальному и спиральному изгибу, так при бурении горизонтальных скважин увеличится интервал возможного бурения, будет выше сопротивление усталости, можно увеличить число оборотов при бурении с вращением бурильной колонны, без опасности работы в зоне усталостных нагрузок, уменьшится извилистость ствола скважины, будет выше скорость восходящего потока в кольцевом пространстве, улучшается вынос шлама и очистки ствола скважины.

Легкосплавные (алюминиевые) бурильные трубы отображены в классификации как отдельная группа в виду своего большего вклада

в достижения технического предела бурения, обладая преимуществами легкого веса в сравнении с таким же габаритом СБТ, способности плавучести в горизонтальном стволе и обладаемой жесткостью в случае со спиральным оребрением, которое также способствует очистке ствола и позволяеткратно увеличить достигаемый предел направленного бурения горизонтальной скважины. Трубы ЛБТ (АБТ) легче СБТ, оставаясь при этом относительно прочными. Они позволяют увеличить глубину бурения для существующих буровых установок, снизить нагрузку и момент, поскольку их вес в воздухе составляет половину веса аналогичных стальных труб (по отношению к плотности в 2,8 раза, $\rho_{ст} = 7,85 \text{ г/см}^3$, $\rho_{алюм} = 2,78 \text{ г/см}^3$). При погружении в буровой раствор они теряют 35–50 % своего веса в воздухе, по сравнению с 13–21 % для стальных труб. Их применение позволяет снизить транспортные расходы и уменьшить износ подъемного оборудования буровой установки. Включение труб ЛБТ (АБТ) в бурильную колонну позволяет уменьшить вибрацию, распространяющуюся от бурового долота к буровой установке. Напряжения, возникающие в стенках труб ЛБТ (АБТ) при искривлении ствола, почти в три раза меньше по сравнению со стальными трубами, потому что алюминий имеет другие физические свойства. Вот почему трубы ЛБТ (АБТ) подходят для бурения боковых стволов с высокими темпами набора кривизны скважины [1].

Специальные высокопрочные марки стали используются для производства более легких бурильных труб по ГОСТ Р 54383-2011 (ГОСТ Р 50278) группы прочности «S-135» («P») предел текучести 931-1138 МПа для того, чтобы снизить скручивающие и осевые нагрузки в сложнопрофильных и горизонтальных скважинах.

Профилированные бурильные трубы «Гидроклин» (Hydroclean) [2] от компании производителя Vam Drilling (Vallourec Group) — высокотехнологичные трубы со специальными канавками и выступами, которые являются основной особенностью устройств, их включают в компоновку бурильных труб для устранения проблем, связанных со скоплением бурового шлама и чрезмерными скручивающими и осевыми нагрузками в сложных и нестандартных скважинах. Опыт их применения показал, что устройства целесообразно использовать на участках с большим зенит-

ным углом ствола скважины 35–65° и более при значительных образованиях «шламовых подушек». Угол лопастей обеспечивает оптимальное взрыхление шлама, а спиральные лопасти поднимают частицы и запускают их в зону высоких скоростей.

Бурильные трубы HWDC (Vam Drilling) устанавливаются на место обычных ТБТ и позволяют снизить крутящий момент и касательные напряжения. При бурении скважин с протяженными горизонтальными участками создание нагрузки на долото требует размещения УБТ или ТБТ на вертикальном или наклонном участке скважины для последующей передачи веса на забой через колонну бурильных труб, расположенных между УБТ (ТБТ) и КНБК. Горизонтальный участок бурильной колонны при такой компоновке будет находиться в сжатом состоянии и при определенных условиях может потерять продольную устойчивость. Потеря продольной устойчивости («баклинг») представляет собой изменение формы колонны от прямолинейной до формы волны и затем спирали. При возникновении «баклинга» сначала резко увеличиваются силы сопротивления, а при спиральной форме возможно полное заклинивание колонны в скважине. Продольная устойчивость бурильной трубы зависит от ряда факторов, наиболее значимыми из которых являются геометрические характеристики, в частности момент инерции, зависящий от наружного и внутреннего диаметров. Труба с большим наружным диаметром и более толстой стенкой будет иметь больший момент инерции и продольную устойчивость. Увеличенный наружный диаметр повышает скорость потока раствора в кольцевом пространстве, тем самым улучшает очистку скважины от шлама. Кроме того, имея увеличенный внутренний диаметр, такая труба позволяет значительно снизить гидравлические сопротивления в колонне и обеспечить эффективное бурение при меньшем давлении бурового раствора на выходе из насосов.

Применение замковых соединений бурильных труб с твердосплавной наплавкой продлевает срок эксплуатации бурильных труб, но также влияет на снижение сил трения и износа обсадной трубы, что повышает эффективность бурения, особенно в проблемных интервалах с высокой пространственной интенсивностью искривления кривизны, в которых можно ожидать повышенный износ обсадных труб.

В настоящее время отечественными и зарубежными производителями выпускаются бурильные трубы со специальными замками, имеющими двойной упорный торец (double shoulder). Замки типа double shoulder имеют следующие преимущества: максимально возможный внутренний диаметр — уменьшает потери давления в замковых соединениях бурильных труб, минимально возможный наружный диаметр — снижает крутящий момент на устье, высокие прочностные характеристики — позволяют выдерживать большой крутящий момент и растягивающие нагрузки.

Наличие внутреннего защитного покрытия труб защитит бурильные трубы от точечной коррозии при воздействии бурового раствора и абразивного износа труб [3]. При коррозии усиливаются напряжения, возникающие в бурильной трубе особенно во время тяжелых буровых операций, что приводит к быстрому появлению усталостных трещин, это может привести к разрушению бурильной трубы в скважине. Применение внутреннего пластикового покрытия обеспечивает улучшение гидравлических характеристик и снижение трения, которое возникает между поверхностью и потоком раствора из-за гладкой поверхности покрытия по сравнению с шероховатой поверхностью обычных стальных труб, и сводит к минимуму образование солевых отложений на поверхности трубы. Отложения солей могут засорить сопла буровых долот, засорить забойный двигатель, ограничить гидравлический поток и снизить эффективность при подъеме бурового раствора.

Вращающийся турболизатор. Механизм действия устройства основан на турбулизации восходящего потока промывочной жидкости и механическом воздействии на шламовую подушку лопастями турболизатора [4]. Устройство устанавливается в колонну бурильных труб в интервале предполагаемого образования шламовых подушек. Одно из достоинств применения турболизатора при бурении гидравлическим забойным двигателем, когда бурильная колонна не вращается. С целью улучшения очистки ствола скважины от шлама предлагается применение разработанной [5] на кафедре УГНТУ конструкции Замка — Центратора — Турбулизатора (ЗЦТ). ЗЦТ применяется для соединения бурильных труб в составе свечи, при бурении горизонтального участка рекомендуется устанавливать ЗЦТ на каждую свечу, либо через одну

свечу, в зависимости от особенности месторождения и сложности бурения.

Применение устройств типа фрезерованных переводников «Cutting Bed Impeller» показало эффективность в очистке скважин с большими отходами от вертикали. Устройство состоит из короткого сердечника, не содержащего движущихся частей, с фрезерованной канавкой специальной формы, которая воздействует на «шламовую подушку», сдвигая её с нижней части трубы. Использование фрезерованных переводников, установленных на определенном расстоянии друг от друга, позволяет значительно снизить крутящий момент, плавно восстановить циркуляцию, увеличить проходку на долото и исполнить работу «демпфера» вибрационных нагрузок.

Переводник «Гидроклин» (Hydroclean) применяется при работе с трубами технологии Hydroclean. Инструменты Hydroclean не являются породоразрушающим инструментом, лопатки не вступают в физический контакт со стенками скважины, и, следовательно, не изнашиваются. Контакт со стенками скважины происходит только по твердосплавным поясам, обеспечивая скольжение с низким коэффициентом трения; разработаны для увеличения выноса шлама в наклонных и горизонтальных участках скважин даже при небольших оборотах бурильной колонны и малой скорости бурового раствора в затрубном пространстве.

Устройство гидромеханической очистки (УГМО) от компании производителя ООО НПП «БУРИНТЕХ» предназначено для улучшения условий работы путем гидромеханической очистки призабойной зоны скважины в процессе бурения. УГМО устанавливается непосредственно над долотом. Предусмотрена возможность установки в промывочные отверстия заглушек вместо насадок и использование устройства в качестве неполноразмерного спирального калибратора.

Гидравлические и механические ясы предназначены для освобождения прихваченного внутрискважинного оборудования ударами, направленными вверх и вниз в сочетании со статической осевой растягивающей нагрузкой. Выпускаются ремонтные и бурильные ясы, правого и левого исполнения, односторонние и двухсторонние. Известно, что работа обычных ясов осложняется при их установке в наклонно-направленных и горизонтальных участках ствола скважины. Это

объясняется тем, что часть осевой нагрузки, прикладываемой с поверхности к рабочей колонне труб, не доходит до ясса и теряется вследствие сил трения. Промысловый опыт работы крутильных яссов «SHOCK TURN» компании ООО НПП «БУРИНТЕХ» показал, что в подобных интервалах работа ясса «SHOCK TURN» более эффективна, т.к. передача крутящего момента от поверхности к инструменту лучше поддается контролю и осуществляется с меньшими затратами на трение. Преимущество в высокой энерговооруженности (сила удара крутильного ясса превышает силу удара обычного ясса в 5–6 раз) для освобождения прихваченного оборудования крутильными ударами, направленными вверх. Расхаживатель колонны механического типа РКМ помогает освобождать прихваченный инструмент в боковом стволе или на горизонтальном участке скважины, его применение в паре с гидравлическим яссом позволяет намного повысить эффективность отбивки. Повышение эффективности отбивки прихваченного в боковом стволе или на горизонтальном участке оборудования за счет совместной работы с гидравлическими яссами типа ЯГР (Б) обычного или крутильного исполнения. Расхаживатель колонн разработан для совместной работы с яссами типа ЯГБ (ЯГР) и способен работать на горизонтальном участке ствола скважины, причем с пропуском через фрезерованное окно при бурении бокового ствола. В некоторых случаях расхаживатель колонн может применяться одиночно и заменить обычный ясс двухстороннего действия.

Осцилляторы (вибраторы) создают малоамплитудные продольные колебания, тем самым способствуя доведению осевой нагрузки на долото, включая «подвисания» КНБК и бурильной колонны, и упрощает управление компоновкой во время направленного бурения. Эффективность применения сильно зависит от того, в каком интервале установлен осциллятор, и по сравнению с работой его вблизи КНБК эффективность применения будет выше на некотором удалении от КНБК. Логично представить, что этот интервал будет, если это протяженный интервал горизонта, т.е. место, приходящееся на потерю устойчивости бурильной колонны (продольный изгиб), где трение о стенки скважины больше, чем вблизи КНБК.

Виброгаситель, демпфер, отражатель, гаситель, регулятор колебаний и т.д. рассмотрим на примере корректора подачи и протектора забойного двигателя (БУРИНТЕХ). Корректор подачи-демпер (КПД) применяют с целью снижения амплитуды динамических (вибрационных и ударных) осевых и моментных нагрузок, а также поперечных сил, возникающих в процессе бурения [6]. Устанавливается над забойным двигателем или телесистемой, возможно применение двух корректоров подачи — демпферов — одновременно с разнесением по длине расположения в колонне. При использовании амортизаторов: повышается стойкость долота, средняя за время долбления механическая скорость увеличивается на 5–10 %, а проходка на долото — на 10–50 %; снижаются амплитуда вибраций, перегрузочные и усталостные поломки бурильной колонны и долота, число поврежденных элементов наземного оборудования, реагирующих на колебания бурильных труб; расширяется диапазон устойчивой работы, повышается приемистость к осевой нагрузке, снижается степень неравномерности вращения вала, сокращаются усталостные поломки деталей забойного двигателя.

Протекторы забойные (демпер наддолотный, наддолотный амортизатор) (ПЗ) обеспечивают оптимальное равномерное нагружение породоразрушающего инструмента осевой нагрузкой, а также демпфирование крутильных, осевых вибраций и ударов, действующих на долото. Протектор забойный устанавливается непосредственно над долотом как при бурении с верхним приводом, так и гидравлическими забойными двигателями. В случае проявления поперечных колебаний рекомендуется использование демпферов в комбинации с центраторами, калибраторами или шарошечными калибраторами (roller reamer) [7].

Опорно-центрирующие элементы применяются для управления траекторией и повышения качества проводки, управления параметрами искривления ствола скважины, снижения возможностей возникновения осложнений и улучшения технико-экономических показателей бурения скважин. Позволяют предотвратить вредное желобообразование на стенках скважины, ликвидировать неровности на них, избежать сужения ствола, а также исключить необходимость проработки и расширения ствола при спуске нового долота.

Но эффективное использование ОЦЭ в определенной мере сдерживается несовершенством выбора конструкций КНБК и их геометрических параметров. К опорно-центрирующим элементам относятся центраторы, калибраторы, стабилизаторы, отличающиеся друг от друга в основном по месту расположения в бурильной колонне и по длине. Расстояние от долота до места установки центраторов и стабилизаторов определяется расчетным путем.

Интересны также следующие разработки для снижения сил сопротивления при бурении горизонтальных скважин: забойное устройство подачи долота ЗУПД-195 (гидроцилиндр) и гидравлический привод для выполнения возвратно-поступательного движения долота [8]. Промысловое испытание ЗУПД-195 при вертикальной глубине примерно 200 м и при глубине ствола скважины 3500 м позволило создать постоянную гидравлическую нагрузку на долото, в результате увеличилась проходка на долото в 4 раза, механическая скорость в 1,5 раза. Количество УБТ в составе бурильной колонны сократилось в 10 раз, а время на СПО — в 1,5 раза. Конструкция долота с гидравлическим приводом [9] создает продольные колебания КНБК при вращении шарошечного долота и воздействию гидроимпульсных струй, формируемых в центральных и боковых отверстиях.

Касательно выбора долота для конкретных горно-геологических и технико-технологических условий необходимо учитывать: литологические и стратиграфические данные; конструкцию скважины; способ и параметры бурения, давление, расход промывочной жидкости; тип забойного двигателя (вращателя);

параметры бурового раствора; параметры кривизны скважины; характеристики бурового оборудования; режимы бурения.

Химические методы основаны на управлении свойствами буровых растворов. Одним из наиболее доступных и обширных направлений по снижению потерь энергии при СПО, затяжках или прихватах бурильной колонны и КНБК является повышение смазочных свойств буровых растворов. Самой распространенной смазочной добавкой является нефть для предотвращения и ликвидации прихватов. К примеру, при добавлении 5–10 % нефти в необработанный буровой раствор сила трения уменьшится на 20–30 % между металлической поверхностью и глинистой коркой. Введение в нефть графита в количестве 0,6 % позволяет снизить количество прихватов, уменьшить время на их ликвидацию в 1,5–5 раз и увеличить проходку на долото на 5–10 % [10].

Выводы

Целями исследования сил трения являются обзор и подбор наиболее приемлемого метода снижения сил трения и их классификация. Это повлияет на снижение нагрузок и напряжений в бурильной колонне. В результате появляется возможность применения буровых вышек меньшей грузоподъемности, с меньшим весом на крюке, крутящим моментом и стоимости буровых работ, в чём нефтегазовое производство очень заинтересовано. Классификация сил трения необходима для научного обоснования оперативного применения элементов буровой установки, подбора бурильного инструмента, оптимизации профилей горизонтальных скважин или раскустовок при разработке месторождений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Руководство по эксплуатации и рекомендации по проектированию бурильных колонн. Легкосплавные бурильные трубы ЛБТПН с наружным диаметром 90, 103 и 129 мм. М.: ООО «Бурильные трубы», 2016.
2. Вахрушев А.В. Бурильные трубы «ГидроКлин» (Hydroclean) — революционное решение в области очистки скважин от шлама. Опыт создания и применения // Нефть. Газ. Новации. 2012. Вып. 12 (167). С. 26–28.
3. Бруно Лефевр. Технология за круглым столом: бурильные трубы и вспомогательная продукция // ROGTEC. 2010. № 12. С. 60–85.
4. Райхер Р.С., Цукренко М.С., Органов А.С. Техничко-технологические решения по очистке наклонно-направленных и горизонтальных скважин от шлама // Нефть. Газ. Новации. 2016. № 3. С. 28–35.

5. Левинсон Л.М. и др. Технология бурения и навигация сложнопрофильных скважин. Уфа: Монография, 2016. 162 с.
6. Ишбаев Г.Г., Вагапов С.Ю. Современные элементы КНБК от компании «БУРИНТЕХ» // Бурение и нефть. 2012. С. 44–46.
7. Бадретдинов Т.В., Ямалиев В.У. Анализ колебаний бурильной колонны и применения демпфирующих устройств // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2016. № 6. С. 5–22.
8. Буслаев В.Ф., Буслаев Г.В. и др. Результаты испытания многофункционального забойного устройства подачи долота ЗУПД-195 // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2007. № 11. С. 32–34.
9. Молоканов Д.Р., Буслаев Г.В. Вопросы и способы снижения сил сопротивления при бурении горизонтальных скважин // Инженер-нефтяник. 2008. № 3. С. 16–17.

10. Хузина Л.Б., Петрова Л.В., Любимова С.В. Методы снижения сил трения при разработке месторождений горизонтальными скважинами // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2012. № 5. С. 62–70.

REFERENCES

1. *Rukovodstvo po ekspluatatsii i rekomendatsii po proyektirovaniyu buril'nykh kolonn. Legkosplavnyye buril'nyye trubyy LBTPN s naruzhnym diametrom 90, 103 i 129 mm.* [Operation Manual and Recommendations for the Design of Drill Strings. Light Alloy Drill Pipes LAIDP with an Outer Diameter of 90, 103 and 129 mm]. Moscow, Buril'nyye trubyy, 2016. [in Russian].

2. Vakhrushev A.V. Buril'nye trubyy «Gidroclin» (Hidroclean) — revolyutsionnoe reshenie v oblasti ochistki skvazhin ot shlama. Opyt sozdaniya i primeneniye [Hidroclean Drill Pipe (Hidroclean) is a Revolutionary Solution in the Field of Cleaning of Sludge Wells. Experience of Creation and Application]. *Neft'. Gaz. Novatsii — Oil. Gas. Novations*, 2012, No. 12 (167), pp. 26–28 [in Russian].

3. Bruno Lefevr. Tekhnologiya za kruglym stolom: buril'nye trubyy i vspomogatel'naya produktsiya [Technology at the Round Table: Drill Pipes and Ancillary Products]. *ROGTEC — ROGTEC*, 2010, No. 12, pp. 60–85. [in Russian].

4. Raikher R.S., Tsukrenko M.S., Organov A.S. Tekhniko-tekhnologicheskie resheniya po ochistke naklonno-napravlennykh i gorizontal'nykh skvazhin ot shlama [Technical and Technological Solutions for Cleaning Directional and Horizontal Wells from Sludge]. *Neft'. Gaz. Novatsii.* — *Oil. Gas. Novations*, 2016, No. 3, pp. 28–35. [in Russian].

5. Levinson L.M. e.a. *Tekhnologiya bureniya i navigatsiya slozhnoprofil'nykh skvazhin* [Drilling Technology and Navigation of Complex Profile Wells]. Ufa, Monograph Publ., 2016. 162 p. [in Russian].

6. Ishbaev G.G., Vagapov S.Yu. Sovremennyye elementy KNBK ot kompanii «BURINTEK» [Modern Elements of BHA from the Company «BURINTECH»]. *Burenie i neft' — Drilling and Oil*, 2012, pp. 44–46 [in Russian].

7. Badretdinov T.V., Yamaliev V.U. Analiz kolebaniy buril'noi kolonny i primeneniya dempfirmiruyushchikh ustroystv [Analysis of the Vibrations of the Drill String and the Use of Damping Devices]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2016, No. 6, pp. 5–22. [in Russian].

8. Buslaev V.F., Buslaev G. V. e.a. Rezul'taty ispytaniya mnogofunktsional'nogo zaboynogo ustroystva podachi dolota ZUPD-195 [The Results of the Test of the Multifunctional Downhole ZAPD-195 Bit Feeder]. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more — Construction of Oil and Gas Wells on Land and at Sea*, 2007, No. 11, pp. 32–34. [in Russian].

9. Molokanov D.R., Buslaev G.V. Voprosy i sposoby snizheniya sil soprotivleniya pri burenii gorizontal'nykh skvazhin [Questions and Ways to Reduce the Forces of Resistance when Drilling Horizontal Wells]. *Inzhener-neftyanik — Petroleum Engineer*, 2008, No. 3, pp. 19–17. [in Russian].

10. Khuzina L.B., Petrova L.V., Lyubimova S.V. Metody snizheniya sil treniya pri razrabotke mestorozhdenii gorizontal'nymi skvazhinami [Techniques to Reduce Friction in Field Development by Horizontal Wells]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2012, No. 5, pp. 62–70. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
ABOUT THE AUTHORS

Щевелёв Андрей Александрович, аспирант кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Shchevelev Andrei A., Postgraduate Student of Oil and Gas Wells Drilling Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: Shchevelev@gmail.com

Ишбаев Гниятулла Гарифуллович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Ishbaev Gniyatulla G., Doctor of Engineering Sciences, Professor of Oil and Gas Wells Drilling Department, USPTU, Ufa, Russian Federation