

УДК 622.23.05

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ БУРЕНИЯ НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННЫХ СКВАЖИН С БОЛЬШИМ ОТХОДОМ ЗАБОЯ ОТ ВЕРТИКАЛИ И РАННИМ НАЧАЛОМ НАБОРА ЗЕНИТНОГО УГЛА

**Б.К. Жиенбаев, Е.К. Айткулов,
К.Т. Ершиев, Н.М. Магзумов**

В данной статье приведен анализ влияния изменения фактической траектории ствола наклонно-направленной скважины тангенциального профиля с ранним началом набора зенитного угла на силу трения при продольном движении и кручении буровой колонны в стволе скважины.

При проведении анализа были использованы фактические данные, полученные непосредственно при бурении наклонно-направленной скважины ЮУ-2 месторождения Южный Урихтау проектной глубиной 5000 м, результаты обработки данных инклинометрии указанной скважины, фактически примененные компоновки низа буровой колонны (размеры, материал и характеристики элементов), фактические параметры бурового раствора согласно актам замера, фактические параметры бурения согласно суточным буровым рапортам и кривым геолого-технологических исследований.

Проведены расчеты натяжений буровой колонны и создаваемых моментов на специализированном программном обеспечении Landmark, выполнен сравнительный анализ с проектными параметрами и по результатам выполнения работ выданы соответствующие рекомендации в целях улучшения технологических параметров проводки скважин с аналогичными геолого-техническими условиями и профилем.

Ключевые слова: пространственная интенсивность, крутящий момент, параметры режима бурения, ствол скважины.

Полезные ископаемые являются материальной основой развития экономики страны. В связи с этим одним из важнейших направлений по восполнению минерально-сырьевой базы страны является рациональное развитие геологоразведочных работ, в т.ч. качественное выполнение буровых работ с обеспечением достижения намеченных геологических целей и задач.

После приобретения Республикой Казахстан независимости работы по выявлению нефтегазоносных структур продолжались как на территории новых районов, так и на территории ранее открытых месторождений, и одной из таких структур является месторождение Урихтау, которое в период СССР выявлено геологоразведочными работами в восточной прибортовой зоне Прикаспийской впадины.

Первая разведочная скважина на данном месторождении была пробурена в 1983 г. При испытании верхней карбонатной толщи в каменноугольных отложениях произошло открытое фонтанирование скважины газоконденсатом.

В советский период на месторождении пробурены 34 вертикальных поисковых и разведочных скважин. Работы по доразведке возобновились только в 2010 г. в целях уточнения геологического строения

подсолевого поднятия по карбонатным отложениям, определения промышленной продуктивности коллекторов, выделенных в разрезе ранее пробуренными поисково-разведочными скважинами.

В период с 2011 г. на месторождении пробурены 16 скважин, а к настоящему моменту общее количество пробуренных скважин составило 49 ед., из которых 36 скважин в Центральном Урихтау, 7 скважин – в Восточном Урихтау и 6 скважин – в Южном Урихтау.

На сегодняшний день в целях улучшения технологических процессов при строительстве скважин на данном месторождении необходима систематизация полученных опытов и знаний по отдельным этапам строительства планируемых скважин.

Необходимо отметить, что залежи нефти находятся под песчаным массивом Кокжиде, который относится к природно-заповедному фонду республиканского и международного значения, в связи с этим для достижения геологических целей при проектировании приходится закладывать более протяженные и сложные профили.

В этих условиях рассматриваются варианты бурения с использованием профилей с расположением устья скважин на расстоянии 500–2000 м в целях исключе-

ния вредного воздействия на водоохран-ные зоны, при этом глубина скважин по стволу может превышать 5000 м.

Согласно Правилам [1], строительство скважин глубиной более 5000 м относится к сложным проектам. Наряду с этим бурение наклонно-направленных скважин с ранним началом набора зенитного угла и большим отходом от вертикали является трудоемким технологическим процессом, т.к. при проводке аналогичных скважин бурильная колонна и буровое оборудование испытывают большие нагрузки и напряжения, а также имеются риски возникновения аварийных ситуаций. В этой связи при проводке скважин необходимо выполнение работ согласно проектным решениям и заложение трассы скважины согласно расчетной траектории в целях достижения геологических целей.

Следовательно, бурение наклонно-направленной скважины с большим отходом от вертикали, помимо тщательного планирования и проведения всесторонних инженерных расчетов, требует оператив-

ной корректировки и принятия адекватных решений для обеспечения плановой траектории, оптимального режима бурения в процессе строительства скважин.

Наклонно-направленная оценочная скважина ЮУ-2 была пробурена на месторождении Южный Урихтау в восточной части прибортовой зоны Прикаспийской впадины для уточнения геологического строения структуры и прослеживания углеводородсодержащих карбонатных горизонтов.

Проектная траектория и конструкция данной скважины приведены на рис. 1 и в табл. 1 [2].

При проектировании выбран трехинтервальный тангенциальный профиль с началом набора зенитного угла на глубине 430 м с пространственной интенсивностью (далее – ПИ) искривления ствола скважины 1,16°/30 м до глубины 1534 м и дальнейшей стабилизацией зенитного угла 42,61° с постоянным азимутом 264,03° до проектной глубины 5000 м.

Бурение секций Ø 444,5 мм (17 1/2")

Таблица 1. Конструкция скважины

№	Название обсадной колонны	Диаметр колонны, мм	Интервал спуска по стволу, м	Диаметр открытого ствола, мм
1	Направление	508	0–401	660,4
2	Кондуктор	339,7	0–1658	444,5
3	Промежуточная колонна	244,5/250,8	0–3737	311,1
4	Эксплуатационная колонна	177,8	0–4195	215,9
5	Эксплуатационный хвостовик	127	4045–5000	152,4

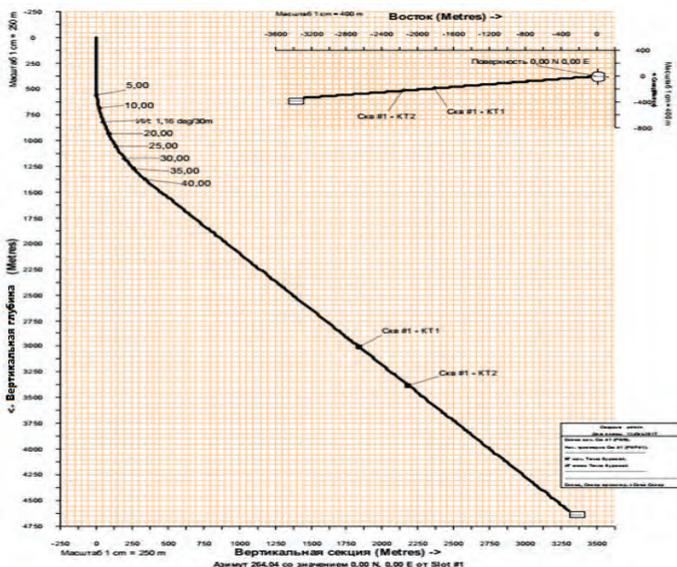


Рисунок 1. Проектная траектория ствола скважины

и $\varnothing 311,1$ мм (12 1/4") сопровождалось постоянными осложнениями в виде посадок и затяжек бурильной колонны, при этом наблюдались высокие крутящие моменты на верхнем силовом приводе (далее – ВСП), которые свидетельствовали о больших сопротивлениях при расхаживании и проработке ствола скважины.

Необходимо отметить, что фактические значения натяжения бурильной колонны и крутящих моментов при бурении данных интервалов не достигали допустимых проектных значений.

В целях обеспечения свободного хождения бурильной колонны в стволе скважины произведена обработка бурового раствора, технологические параметры бурового раствора приведены в соответствии с проектными.

Согласно ежесуточным актам замеров, параметры бурового раствора изменялись в допустимых пределах [2], но, несмотря на это, в ходе производства буровых работ наблюдались многочисленные осложнения в виде посадок и затяжек бурильного инструмента. В связи с этим в целях снижения риска прихвата бурильной колонны произведена дополнительная обработка бурового раствора химреагентами, что незначительно повлияло на снижение сил трения при расхаживании инструмента.

Кроме этого, произведена полная замена циркулирующей в скважине промысловой жидкости новой.

Следует отметить, что текущие параметры и режим циркуляции бурового раствора обеспечивали достаточную очистку ствола скважины от шлама, т.к. при прокачке вязкой/тандемной пачки и ее приеме на поверхности обильного выноса остаточного шлама не наблюдалось.

В целях очистки ствола скважины от выбуренного шлама и выноса его из застойных зон произведена закачка тандемных пачек. Также осуществлены технологические мероприятия по выколаживанию участков набора зенитного угла выполнением дополнительных проработок и осуществлением контрольных спуско-подъемных операций (далее – СПО).

Однако данные мероприятия не дали существенного снижения сил трения и крутящего момента бурильной колонны, при этом сроки и сопутствующие затраты на бурение интервалов существенно увеличились. По мере углубления участились скачки крутящего момента, которые приводили к частым и порой полным остановкам

ВСП. При этом из-за внеплановых остановок ремонтных работ бурильная колонна несколько раз была прихвачена в стволе скважины.

В целях обеспечения безаварийного углубления скважины по заданной траектории стояла задача определить причину увеличения сил трения при проработке и расхаживании бурильной колонны.

При анализе суточных рапортов при бурении секции с разными компоновками низа бурильной колонны (далее – КНБК) прямой зависимости между жесткостью КНБК и увеличением усилия на расхаживание бурильной колонны не было обнаружено. Таким образом, по результатам работы сделан вывод о том, что в условиях данной скважины жесткость КНБК не повлияла на хождение бурильной колонны по стволу скважины.

Далее была проведена количественная оценка влияния фактической траектории ствола скважины на величины сопротивления движению бурильной колонны при бурении секции $\varnothing 444,5$ мм, результаты которой отражены в данной работе.

Для сравнения были приняты как проектная, так и фактическая траектории ствола скважины. При этом фактическая траектория определена как данными телеметрии во время бурения, так и согласно показаниям геофизических исследований скважин (далее – ГИС).

На рис. 2 показаны 3 разные траектории ствола скважины, вид сверху и сбоку (секция $\varnothing 444,5$ мм):

- проектная траектория согласно техническому проекту на строительство скважины, с ПИ искривления ствола скважины $1,16^\circ/30$ м (выделена синим цветом);
- фактическая траектория согласно данным телеметрии во время бурения, частота снятия замеров – каждая бурильная свеча приблизительно через каждые 30 м, максимальная ПИ искривления ствола скважины составляет $2,62^\circ/30$ м (выделена розовым цветом);
- фактическая траектория согласно данным ГИС в открытом стволе, частота снятия замеров – каждые 10 м, максимальная ПИ искривления ствола скважины составляет $5,75^\circ/30$ м (выделена зеленым цветом).

По итогам рассмотрения результатов обработки данных ГИС в интервале 40–1650 м были выявлены участки со значительным превышением ПИ изменения зенитного угла и азимута ствола скважины, которые показаны ниже. При этом данные участки не были

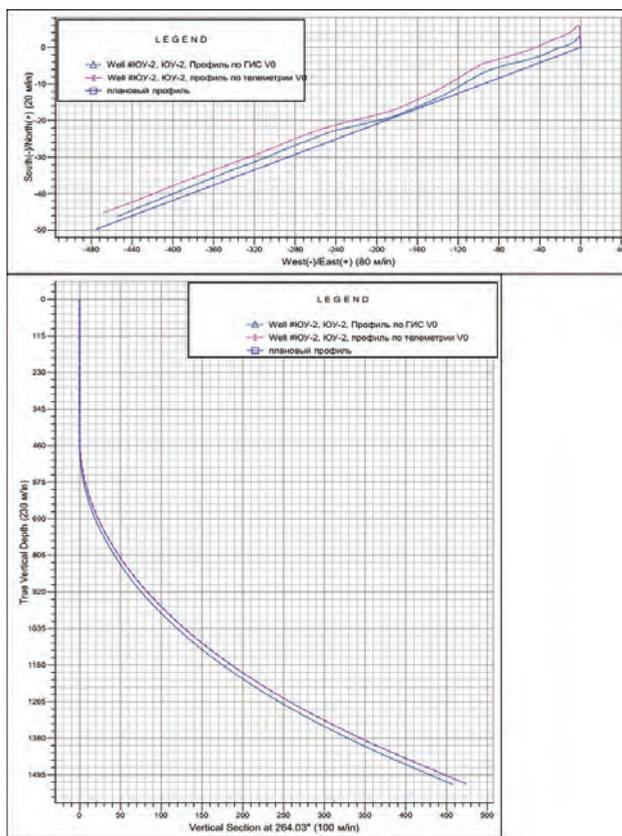


Рисунок 2. Проектные и фактические траектории по ГИС и телеметрии до глубины 1650 м по стволу скважины. Вид сверху и сбоку

Таблица 2. Интервалы со значительным превышением ПИ искривления ствола скважины от проектных значений

Интервалы, м	Фактическая ПИ, °/30 м
480–500	2,7
510–520	3,3
640–650	3,5
670–680	3,9
720–730	3,0
770–790	2,6
980–990	3,5
1110–1120	2,8
1170–1180	2,9
1190–1220	3,0
1320–1330	5,7
1350–1360	2,6
1370–1390	2,9
1400–1430	4,2
1440–1450	3,1
1480–1500	4,1
1510–1530	4,1
1640–1650	3,4

выявлены или имели меньшую ПИ по данным телеметрии во время бурения.

Учитывая проектную ПИ изменения траектории скважины 1,16°/30 м, данные интервалы могли отрицательно повлиять на свободное хождение бурильной колонны в стволе скважины.

Произведен расчет натяжений при движении бурильной колонны вдоль ствола скважины, а также изменение крутящих моментов при бурении и обратной проработке ствола скважины.

Как известно, при подъеме бурильной колонны из скважины инструмент за счет собственного веса растягивается, а при спуске за счет сопротивления тела инструмента действуют силы выталкивания. Сила трения всегда направлена противоположно движению, и, таким образом, натяжение увеличивает и уменьшает вес на крюке.

Расчет натяжения производится по формуле [3]:

$$F_{\text{натяжения}} = \mu F_N \left(\frac{v_t}{v_r} \right) \quad (1)$$

$$v_r = \sqrt{v_t^2 + v_a^2} \quad (2)$$

где:

$F_{\text{натяжения}}$ – сила натяжения;
 μ – коэффициент трения;
 v_t – угловая скорость;
 v_a – конечная скорость, зависит от зенитного угла;
 v_r – скорость спуско-подъемных операций;
 F_N – боковая сила, зависит от зенитного угла.

Крутящий момент на устье является суммарным моментом трения по всей длине бурильной колонны. Каждый отдельный элемент бурильной колонны создает крутящий момент, который рассчитывается согласно формуле [3]:

$$T = r \mu F_N \left(\frac{v_a}{v_r} \right) \quad (3)$$

$$v_r = \sqrt{v_t^2 + v_a^2} \quad (4)$$

где:

T – крутящий момент;
 μ – коэффициент трения;
 r – радиус компонента;
 v_t – угловая скорость;
 v_a – конечная скорость, зависит от зенитного угла;
 v_r – скорость СПО;
 F_N – боковая сила, зависит от зенитного угла.

Для определения степени влияния данных интервалов с высокой ПИ изменения траектории на расхождение бурильной колонны по стволу скважины необходимо определить результирующие величины натяжения и крутящего момента всех элементов бурильной колонны по стволу согласно формулам (1)–(4). Данные расчеты натяжений и моментов бурильной колонны были проведены на специализированном инженерном программном обеспечении Landmark (далее – ПО), по результатам которых был выполнен сравнительный анализ показателей при разных траекториях ствола скважины.

Полученные результаты. Проведен анализ натяжения и крутящего момента бурильной колонны на основе расчетов для 3 вариантов траектории скважины. На рис. 3 показано графическое изображение изменения сил страгивания при движении бурильной колонны без вращения вверх и вниз вдоль ствола скважины.

Сила страгивания при движении вверх – это увеличение веса бурильной колонны за счет трения, т.е. разница весов бурильной колонны при движении вверх и при равновесном неподвижном состоянии, или фактическая сила сопротивления продольному движению бурильной колонны вверх по стволу. При этом сила страгивания при движении вниз – это величина уменьшения веса бурильной колонны, и является фактической силой сопротивления продольному движению бурильной колонны вниз по стволу.

Как видно из рис. 3, сила страгивания при движении вверх имеет минимальные значения в условиях проектной траектории ствола скважины. При отклонении от проектной траектории сила страгивания неизбежно растет. Можно отметить неуклонный рост величины сопротивления по мере углубления скважины во всех 3 вариантах траектории ствола скважины.

Сила страгивания при движении вниз также имеет минимальные значения при проектной траектории ствола скважины. При отклонении от проектной траектории сила страгивания растет, как было определено выше, при движении вверх. Также наблюдается неуклонный рост величины сопротивления по мере углубления скважины во всех 3 вариантах траектории ствола скважины.

Аналогично представлено графическое выражение изменения крутящего момента при бурении по мере углубления скважины и при обратной проработке ствола скважины при разных положениях долота в скважине.

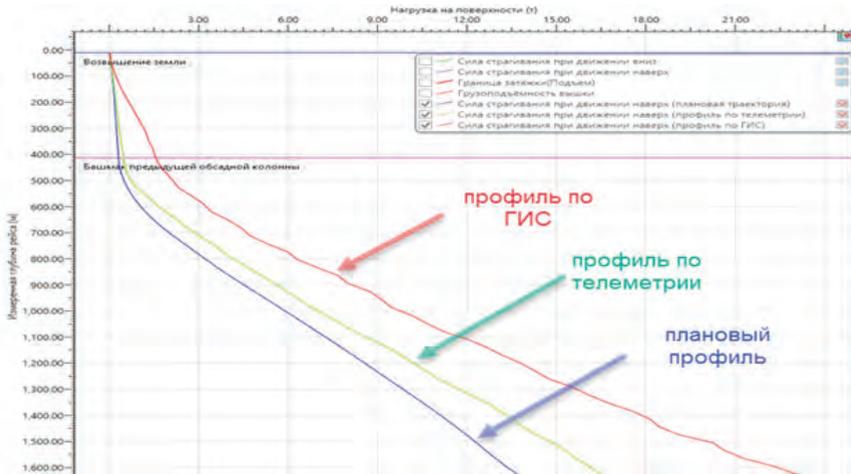


Рисунок 3. Сила сопротивления при движении буровой колонны вверх (Затяжка)

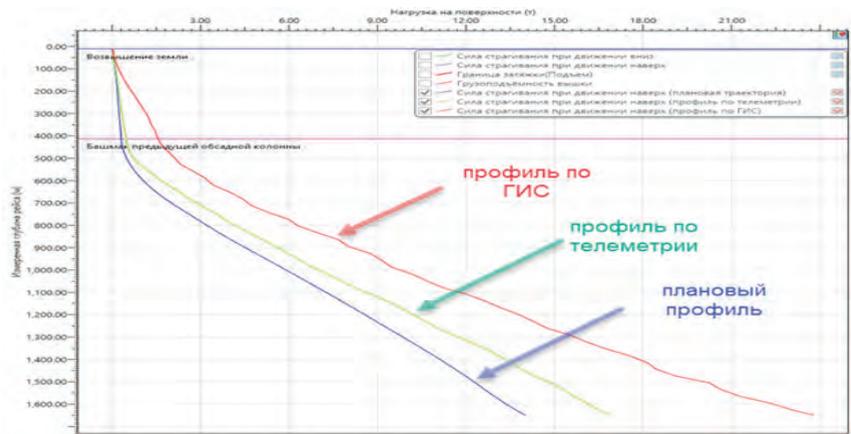


Рисунок 4. Сила сопротивления при движении буровой колонны вниз (Посадка)

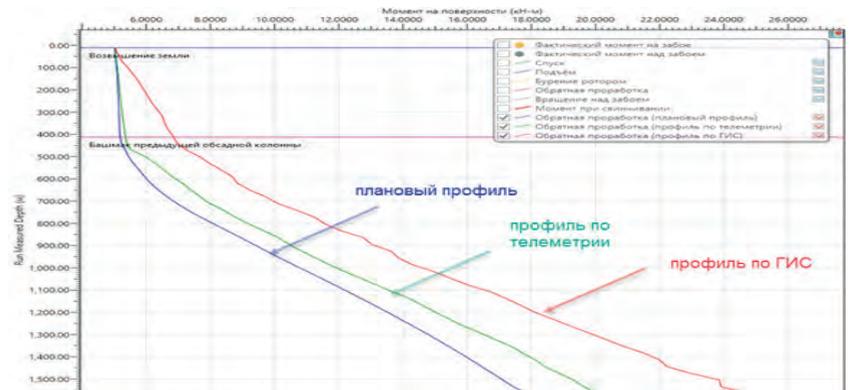


Рисунок 5. Крутящий момента на устье по мере углубления скважины

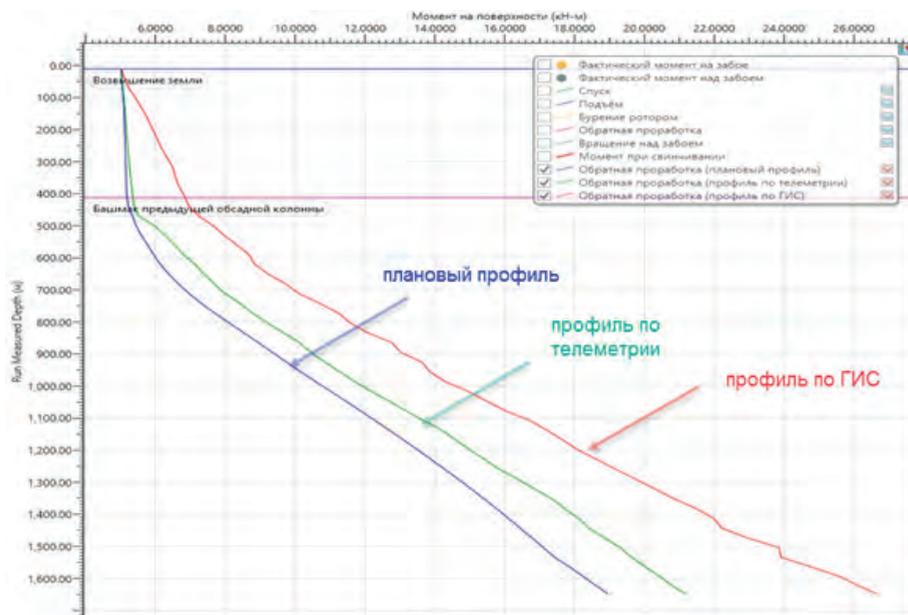


Рисунок 6. Крутящий момент на устье при обратной проработке

Как видно из рис. 5–6, крутящий момент при бурении и при обратной проработке имеет минимальные значения при соблюдении проектной траектории ствола скважины, а при отклонении от проектной траектории приводит к росту крутящего момента. Также отмечается неуклонный рост величины крутящего момента по мере углубления скважины во всех 3 вариантах траектории ствола скважины.

В табл. 3 представлены сравнительные количественные показатели действующих на бурильную колонну натяжений и моментов на глубине 1650 м для 3 разных траекторий скважины. При этом все необходимые для расчета вводные параметры, кроме траектории ствола скважины, одинаковы для всех 3 случаев.

Из проведенных расчетов видно, что существенное превышение ПИ искривления ствола скважины в определенных интервалах привело к значительному увеличению значений натяжения и моментов бурильной колонны: сила страгивания вверх увеличилась на 9,89 т (прирост составляет 70,6%), сила страгивания вниз увеличилась на 5,23 т (прирост составляет 45,1%), крутящий момент во время бурения возрос на 3,32 кН*м (прирост – 18,1%), а во время обратной проработки – на 7,80 кН*м (прирост – 40,9%).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что отклонение от проектной траектории скважины из-за увеличения зенитного угла способствовало ухудшению свободного хождения бурильной колонны по

Таблица 3. Сравнительные расчетные значения натяжений и моментов бурильной колонны для разных траекторий ствола скважины на глубине 1650 м

Расчетные параметры	Проектная траектория	Траектория согласно телеметрии	Прирост, %	Траектория согласно ГИС	Прирост, %
Сила страгивания вверх, т	14,01	19,85	41,7	23,90	70,6
Сила страгивания вниз, т	11,60	15,13	30,4	16,83	45,1
Крутящий момент при бурении, кН*м	18,14	20,58	13,45	21,46	18,3
Крутящий момент при обратной проработке, кН*м	19,07	23,74	24,5	26,87	40,9

стволу скважины, которое является одной из основных причин незапланированных проработок ствола скважины.

Также необходимо отметить, что на количество и продолжительность проработок повлияла установка ограничителя крутящего момента на ВСП (не более 22 кН*м), при допустимом моменте свинчивания 26,87 кН*м для бурильных труб Ø 127 мм.

С учетом вышеизложенного был выполнен пересчет значений натяжений и моментов бурильной колонны для следующих секций с учетом изменения траектории, выданы рекомендации по оптимизации КНБК и о необходимости увеличения значения ограничителя крутящего момента на ВСП.

Таким образом, основываясь на результатах анализа работы бурильной колонны на примере бурения интервалов под секции Ø 215,9 мм (8 1/2") и Ø 152,4 мм (6") скважины ЮУ-2 НН со сложной траекторией, можно сделать следующие выводы:

1. На примере бурения скважины ЮУ-2НН оптимизирован режим бурения, произведен подбор состава КНБК с учетом действующих на бурильные трубы нагруз-

зок, которые обеспечили достижение проектной глубины 5000 м без осложнений.

2. Правильный выбор режима расхаживания и допустимого момента на вращение позволяет предупредить желобообразование и снизить кавернозность ствола скважины, обеспечивая при этом целостность и устойчивость ствола скважины, которые в свою очередь снижают риск возникновения аварий, связанных с бурильной колонной (прихват и слом инструмента).

3. Сокращается доля непроизводительного времени в общей продолжительности строительства скважин, связанного с внеплановой проработкой ствола скважины в интервалах посадок, затяжек и проведении контрольных СПО и работ, связанных с аварией. Также снижается доля затрат, зависящих от времени и объема работ при бурении наклонно-направленных скважин.

4. Оптимизируются сроки строительства наклонно-направленных скважин с большим отходом забоя от вертикали, что при своевременном вводе скважины в эксплуатацию обеспечивает экономический эффект за счет дополнительной добычи нефти.

Список использованной литературы

1. Единые правила по рациональному и комплексному использованию недр. – Утверждены Приказом Министра энергетики 15.06.2018 г., № 239.
2. Индивидуальный технический проект на строительство оценочной наклонно-направленной скважины ЮУ-2 на месторождении Южный Урихтау. – ТОО НИИ «Каспиймунайгаз», г. Атырау, 2018 г.
3. Александров М.М. Взаимодействие колонны труб со стенками скважины. – М., Недра, 1982, 144–147 с.

ЗЕНИТТІК БҰРЫШЫ ӨСУІ ЕРТЕ БАСТАЛАТЫН АУЫТҚУЫ ҮЛКЕН КӨЛБЕУ БАҒЫТТАЛҒАН ҰҢҒЫМАЛАРДЫҢ БҰРҒЫЛАУ ПАРАМЕТРЛЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

**Б.К. Жиенбаев, Е.Қ. Айтқұлов,
Қ.Т. Ершиев, Н.М. Мағзұмов**

Бұл мақалада оқпан бұрышының өсуі ерте басталатын J-тәрізді көлбеу бағытталған ұңғыма нақты траекториясының бұрғылау тізбегінің ұзына бойы қозғалуы мен айналуына өсер ету дәрежесін талдау нәтижелері келтірілген.

Талдау жүргізу кезінде жобалық тереңдігі 5000 м Оңтүстік Өріқтау кен орнының ЮУ-2 көлбеу-бағытталған ұңғымасын бұрғылау барысында тікелей алынған нақты деректер пайдаланылды: ұңғыманың инклинометрия деректерін өңдеу нәтижелері, бұрғылау тізбегі төменгі бөлігінің нақты қолданылған жинақтаулары (элементтердің өлшемдері, материалдар мен сипаттамалары), өлшеу актілеріне сәйкес ерітіндінің нақты параметрлері, тәуліктік бұрғылау рапорттары мен геологиялық-технологиялық

зерттеулер қисықтарына сәйкес бұрғылаудың нақты параметрлері, және т.б..

Landmark мамандандырылған бағдарламалық кешенінде керілулер мен моменттерді есептеу жүргізілді, параметрлердің жобалық мәндерімен салыстырмалы талдау жүргізілді және тиісті ұсыныстар берілді.

Түйінді сөздер: кеңістіктік қарқындылық, айналу моменті, бұрғылау режимінің параметрлері, ұңғыма оқпаны.

OPTIMIZATION OF DRILLING PARAMETERS FOR EXTENDED REACH DIRECTIONAL WELLS WITH AN EARLY KICK-OFF POINT

B.K. Zhiyenbayev, Ye.K. Aitkulov, K.T. Yershiev, N.M. Magzumov

This article analyzes the impact of an actual trajectory of a J-Type directional well with an early kick-off point on the values of torque and drag along the bore hole.

The actual data collected while drilling the directional SU-2 well with a target depth of 5000 m (South Urikhtau field) was used for the analysis: trajectory survey data results of the well, actual bottom hole assemblies applied (dimensions, material and characteristics of the elements), the actual drilling mud parameters according the control acts, actual drilling parameters according the daily drilling reports and mud logging curves, etc.

Calculations of torque and drag were performed on a specialized software Landmark, a comparative analysis was carried out with the design values of parameters and appropriate recommendations were issued.

Key words: dogleg severity, drilling torque, drilling parameters, well bore.

Информация об авторах

Жиенбаев Берик Кенжебекович – директор департамента контроля и технологического сопровождения, b.zhiyenbayev@niikmg.kz.

Айтқулов Ербол Колдасович – ведущий инженер департамента контроля и технологического сопровождения, y.aitkulov@niikmg.kz.

Ершиев Кайрат Турпанович – ведущий инженер департамента контроля и технологического сопровождения, k.yershiev@niikmg.kz.

Мағзумов Нурсултан Маратович – ведущий инженер департамента контроля и технологического сопровождения, n.magzumov@niikmg.kz.

ТОО «КМГ Инжиниринг», г. Нур-Султан, Казахстан