

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

DOI: 10.26730/1999-4125-2020-3-45-57

УДК 622.24.05

ВЛИЯНИЕ НАГРУЗОК НА НАДЕЖНОСТЬ РОТОРНОЙ УПРАВЛЯЕМОЙ СИСТЕМЫ НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ ТИПА «PUSH-THE-BIT»

INFLUENCE OF LOADS ON RELIABILITY OF ROTARY STEERABLE SYSTEM OF DIRECTIONAL DRILLING OF "PUSH-THE-BIT" TYPE

Епихин Антон Владимирович¹,
старший преподаватель, e-mail: epikhin@tpu.ru
Anton V. Epikhin¹, Senior Lecturer
Жиронкин Виталий Сергеевич¹,
студент, e-mail: vsz14@tpu.ru
Vitaly S. Zhironkin¹, student
Яночко Юрай²,
д-р наук, профессор, e-mail: Juraj.Janočko@tuke.sk
Juraj Janočko², Dr.Sc, Professor

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Россия, г. Томск, ул. Ленина, 30

¹National Research Tomsk Polytechnic University, 634050 Russia, Tomsk, 30 Lenina st.

²Технический университет Кошице, 042 00 Республика Словакия, Кошице, ул. Летняя, 9

²Technical University of Kosice, 042 00 Slovakia, Kosice, Letna 9

Аннотация:

В статье представлен оригинальный подход к исследованию нагрузок на элементы отклоняющего модуля роторной управляемой системы типа «Push-the-Bit» как специфического фактора надежности системы, приобретающего особое значение по мере роста доли разработки месторождений нетрадиционной нефти – высокотратного процесса, повышающего требования к надежности бурового оборудования. Основной принцип предложенного подхода заключается в представлении модуля роторной управляемой системы как абсолютно упругого стержня, на который действует комплекс сил, возникающих при бурении наклонно-направленных и горизонтальных волнообразных профилей скважин. При определенных условиях взаимодействие этих сил, результирующее в нагрузке на отклоняющую лопатку, может приблизиться к максимальным значениям, что повышает риск отказа всей компоновки низа буровой колонны. В статье наглядно обосновано явление многократного перепада нагрузки на отклоняющую лопатку в процессе смены интервала бурения наклонно-направленных скважин с восходящего на нисходящий при проводке горизонтального участка с волновым профилем. Опираясь на проведенный анализ влияния осевой нагрузки на нагрузку на отклоняющую лопатку, для снижения риска отказа системы «Push-the-Bit» рекомендовано скорректировать режим бурения. Преимуществом предложенного метода является возможность применения в анализе нагрузок на отклоняющие модули не только для систем типа «Push-the-Bit», но и для наиболее современных – комбинированных (Schlumberger Archer и др.). Внимание также уделено возможности снижения нагрузки на отклоняющую лопатку за счет изменения концентрации смазывающей добавки в буровом растворе при условии проведения последующих исследований.

Ключевые слова: бурение, роторные управляемые системы, «Push-the-Bit», отклоняющая лопатка, нагрузка, надежность.

Abstract:

The article presents an original approach to the study of loads on the elements of the steering module of a rotary steerable system "Push-the-Bit" as a specific factor of the system's reliability, which becomes especially important as the share of unconventional oil fields development grows – a high-cost process that increases reliability requirements for drilling equipment. The main principle is to represent the module of the rotary steerable system as an absolutely elastic rod, which is acted upon by a complex of forces arising during drilling of inclined and horizontal undulating wells. Under certain conditions, the interaction of the forces, resulting in the load on the steering blade, can approach the maximum values, which increases the risk of failure of the entire assembly. The article substantiates the phenomenon of multiple load drops on the steering blade during the change of the drilling interval from ascending to descending during the horizontal section with a wave profile. Based on the analysis of the influence of the axial load on the load on the steering blade, it is recommended to adjust the drilling mode to reduce the risk of failure of "Push-the-Bit" system. The advantage of the proposed method is its applicability for analyzing the loads on steering modules not only for "Push-the-Bit" systems, but also for the most modern combined ones (Schlumberger Archer, etc.). Attention is also paid to the possibility of reducing the load on the steering blade by changing the concentration of the lubricating additive in the drilling fluid, subject to further studies.

Key words: drilling, rotary steerable system, "push-the-bit", steering blade, load, reliability.

Современные тенденции бурения нефтяных и газовых скважин включают в себя увеличение доли сверхглубоких, кустовых и наклонно-направленных скважин в связи с ростом доли разрабатываемых месторождений с глубоким залеганием углеводородов [1-2]. Несмотря на высокую сложность оборудования и технологии бурения таких скважин, они позволяют более полно извлекать жидкие и газообразные углеводороды, а также гидротермальные ресурсы вследствие высокой площади контакта с

продуктивным пластом [3-4]. В настоящее время роторные управляемые системы являются наиболее перспективным оборудованием для строительства наклонно-направленных скважин со сложными профилями. В частности, наиболее продуктивный опыт их применения был получен при бурении глубоких скважин с большим отходом от вертикали [5].

Мировой исследовательский и отраслевой опыт свидетельствует об эффективном применении роторных управляемых систем на месторождениях нетрадиционной нефти (нефть плотных коллекторов). Бурение протяженных горизонтальных участков по площади залегания продуктивного пласта в совокупности с различными технологиями по интенсификации нефтеотдачи (в частности, гидроразрыв пласта) позволяют как увеличить дебит скважины в затухающих скважинах на месторождениях с традиционной нефтью, так и проводить рентабельную добычу нетрадиционной нефти [6-7]. Более высокая эффективность роторных управляемых систем констатируется в сравнении с отклонением забойными двигателями, с использованием клиновых отклонителей, кривых переводников, изменения положения стабилизаторов [8-9] благодаря сравнительной простоте горизонтального бурения и контроля азимута, минимума спускоподъемных операций и высокого качества ствола скважины, напрямую определяющего высокую скорость проходки (Рис. 1).

Преимущества роторных управляемых систем над традиционным оборудованием бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин (более высокая скорость бурения, лучшая очистка скважины от бурового шлама, особенно на горизонтальных участках, и пр.) связаны с их высокой технологичностью и сложностью конструкции. Системы с отклонением долота



Рис. 1. Сравнение качества ствола скважины, построенного по данным каверномера: сверху – забойный двигатель с кривым переводником, снизу – роторная управляемая система [10].
Fig. 1. Comparison of the quality of the wellbore, built according to the caliper data: from above - a downhole motor with a curved sub, from below - a rotary steerable system [10].



Рис. 2. Расположение отклоняющих лопаток в компоновке низа буровой колонны роторной управляемой системы «Push-the-Bit» (авторский рисунок, изображение системы семейства PowerDrive принадлежит Schlumberger [24]).

Fig. 2. Arrangement of deflecting vanes in the bottom of the drill string of the «Push-the-Bit» rotary steerable system (author's drawing, image of the PowerDrive family system belongs to Schlumberger [24]).

(«Push-the-Bit») и с направлением долота («Point-the-Bit») используют разные принципы управления – нажатие отклоняющей лопатки на стенку скважины и внутренний изгиб для отклонения оси буровой колонны от текущей оси скважины соответственно [11].

Применение систем телеметрии положительно влияет на надежность роторных управляемых систем, поскольку снабжает операторов бурения и инженеров информацией, позволяющей судить о нагрузках на компоновку низа буровой колонны. При этом есть мнение, что системы «Push-the-Bit» испытывают большие нагрузки в сравнении с «Point-the-Bit», т.к. отклонение вызывают внешние элементы [12]. Дискуссии относительно преимуществ роторных управляемых систем перед широко распространенными забойными двигателями затрагивают область надежности системы, которая в данном случае зависит от риска прихвата колонны вследствие скольжения по лежачей стенке скважины, неравномерного движения вокруг нее промывочной жидкости и уменьшения выносящей способности раствора [13].

Исследования надежности роторных управляемых систем связаны с двумя аспектами применения при бурении наклонно-направленных нефтяных и газовых скважин. Первый аспект – технологический, связанный с эксплуатацией систем [14-15]. Второй аспект – конструктивный, связанный с особенностями устройства механизма бурового оборудования, качеством его конструирования, материалов и изготовления, а также ремонтпригодностью и обслуживанием [16-17]. Технологические факторы надежности включают в себя осевую нагрузку, частоту вращения буровой колонны, зенитный угол, крепость и абразивность горных пород и т.д. Некоторые авторы связали отказы бурового оборудования с тремя группами факторов: частично зависящие от буровых бригад (режим бурения, качество бурового раствора); не зависящие от них (глубина бурения, свойства проходных пород, климатические условия, особенности конструкции и качества оборудования) и полностью зависящие от буровых

бригад (качество обслуживания и ремонта, навыки буровой бригады) [18].

Конструктивные факторы надежности роторных управляемых систем связаны с нагрузками, которые испытывают элементы механизма, отвечающие за слайдирование. Для системы «Point-the-Bit» такими элементами являются элементы отклоняющего механизма, в том числе anti-rotation levers, эксцентриковые кольца, расположенные внутри низа буровой колонны, а в случае с системой «Push-the-Bit» это выдвижные лопатки, выдвигающиеся наружу в момент изменения азимута ствола скважины и испытывающие максимальные нагрузки.

Вопросы влияния нагрузок на надежность бурового оборудования исследовались целым рядом авторов [19-21]. Вместе с тем вопросы надежности RSS в зависимости от нагрузок в конкретных скважинных условиях остаются малоизученными. Исключением являются работы, которые посвящены проблемам качества контроля бурения с использованием роторных управляемых систем, влияния вибраций на их надежность, а также проблемам надежности при бурении глубоких геотермальных скважин [22-23].

Область представленного в статье исследования связана с использованием роторных управляемых систем «Push-the-Bit» для бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин, отклоняющий модуль которых представлен лопатками (Рис. 2). Примерами таких систем являются Schlumberger PowerDrive X5, X6; Halliburton iCruise и т.п.

Для расчета нагрузок на отклоняющие лопатки были использованы методы теоретической механики, в частности, абстракции, векторного исчисления, которые позволяют определить параметры, влияющие на риск отказа системы, такие как нагрузки на отклоняющие лопатки, напряжения изгиба для нижней части компоновки низа буровой колонны.

В качестве основных параметров для расчета нагрузок на отклоняющие лопатки были взяты технологические (изменение зенитного угла, осевая нагрузка, последовательность участков интенсивного слайдирования, глубина ствола

Таблица 1. Общий вид основных факторов отказа компоновки низа буровой колонны роторной управляемой системы

Table 1. General view of the main factors of failure of the bottom hole assembly of the rotary steerable system

Факторы отказов	Типы роторных управляемых систем		
	«Point-the-Bit»	«Push-the-Bit»	Комбинированная
	<i>Компании-производители и модели</i>		
	Weatherford Revolution, Halliburton Geo-Pilot Duro, Schlumberger PowerDrive Xceed, etc.	Schlumberger PowerDrive X5, X6, Halliburton iCruise, etc.	Schlumberger Archer
	<i>Компоненты</i>		
Механические повреждения, в т.ч.			
-абразивное изнашивание -деформация и излом	Долото, не вращающийся корпус (анти-поворотные рычаги)	Долото, отклоняющие лопатки	
-усталостное изнашивание	Шарнирно-сочлененный вал, поворотный шарнир, эксцентриковые кольца	Приводы лопаток	Приводы лопаток, поворотный шарнир, эксцентриковые кольца
-тепловое изнашивание	Долото		
Сбой электронных систем	Телесистемы по гидроимпульсному каналу (MWD, LWD)		
Производственно-технологические	Зенитный угол, осевая нагрузка, качество бурового раствора		
Внезапные	Скачкообразные изменения значений основных параметров		

скважины, концентрация смазывающей добавки в буровом растворе). Геологические условия (состав и крепость горных пород) были учтены как общие для всех вариаций исходных параметров бурения при помощи роторных управляемых систем «Push-the-Bit».

Надежность буровой системы есть свойство сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения [25]. Нарушением такой способности является отказ системы. Надежность роторной управляемой системы в зависимости от ее типа зависит от надежности шарнирно-сочлененного вала, вращающегося в опорных узлах [26], лопаток отклоняющего модуля [27], привода лопатки [28], а также от качества бурового раствора, режима бурения и свойств проходимых пород [18].

В общем виде совокупность основных факторов, влияющих на надежность роторной управляемой системы и приводящих к отказам компоновки низа буровой колонны, представлена в Таблице 1 (составлено авторами).

Как следует из Таблицы 1, большинство основных факторов отказов компоновки низа буровой колонны (сбой электронных систем, тепловое изнашивание, производственно-технологические параметры) являются общими для всех типов роторных управляемых систем. Специфические для каждого типа систем факторы

(абразивное и усталостное изнашивание, деформация и излом) связаны с конструктивными особенностями отклоняющего модуля. При этом нагрузки на лопатки и их приводы характерны как для систем «Push-the-Bit», так и для комбинированных (например, Schlumberger Archer). Системы «Point-the-Bit» могут как иметь не вращающийся корпус с антиповоротными рычагами (например, Weatherford Revolution), так и не иметь их (например, Schlumberger PowerDrive Xceed). Поэтому лопатки являются одним из наиболее специфических элементов отклоняющего модуля в плане влияния действующих на них многоосевых нагрузок на надежность компоновки низа буровой колонны.

Особое значение надежность роторных управляемых систем приобретает для российской нефтегазовой отрасли, поскольку страна обладает одними из крупнейших в мире запасами сланцевой нефти (73 млрд баррелей [29]), для разработки которых требуются современные системы наклонно-направленного бурения, в том числе горизонтального. Несмотря на наиболее высокую стоимость, их использование дает максимальные технологические возможности извлечения сланцевой нефти. Дороговизна таких систем, в свою очередь, выдвигает особые требования к их надежности и минимизации отказов.

Задача исключения отказов отдельных элементов роторной управляемой системы может быть решена путем моделирования работы



Рис. 3. Силы, действующие на компоненту низа буровой колонны роторной управляемой системы «Push-the-Bit» (авторский рисунок, изображение системы семейства PowerDrive принадлежит Schlumberger [24]).

Fig. 3. Forces acting on the bottom hole assembly of the "Push-the-Bit" rotary steerable system (author's drawing, PowerDrive family system image belongs to Schlumberger [24]).

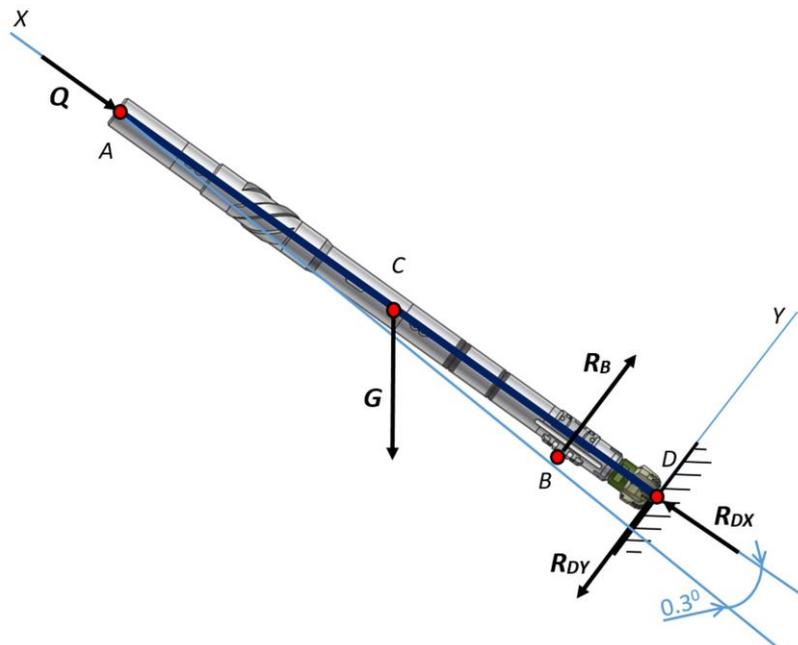


Рис. 4. Схема модели RSS на интервале наклонного ствола скважины с учетом действующих на нее сил

Fig. 4. Scheme of the RSS model on the interval of an inclined wellbore taking into account the forces acting on it

системы в определенном диапазоне скважинных условий и режимов бурения, включая параметры искривления ствола, осевой нагрузки, смазывающего действия бурового раствора. Мы принимаем, что нагрузка на отклоняющие лопатки

связана с возникающей в ней силой реакции (Рис. 3).

Поскольку весьма уязвимым модулем системы «Push-the-Bit» является отклоняющий модуль, необходимо вычисление нагрузки,

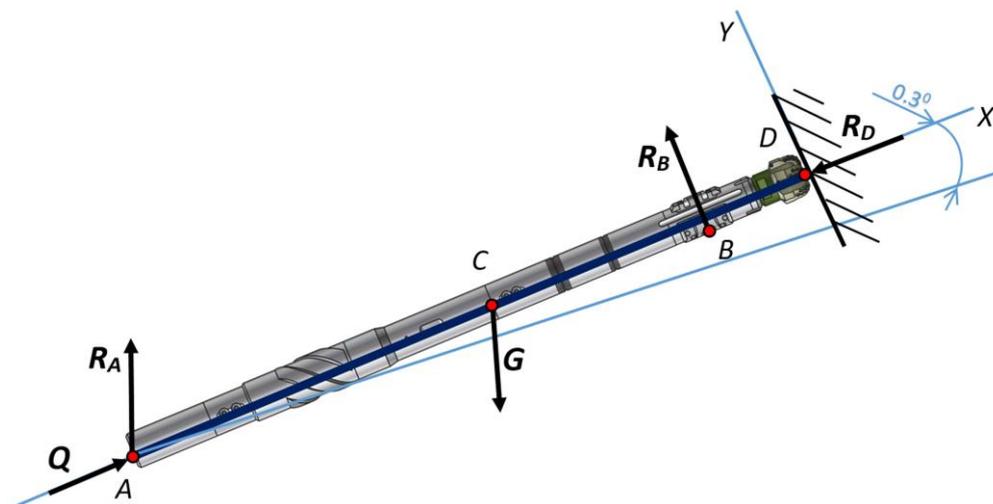


Рис. 5. Схема модели роторной управляемой системы на интервале восстающего ствола скважины с учетом действующих на нее сил

Fig. 5. Scheme of the model of a rotary controlled system in the interval of the rising wellbore taking into account the forces acting on it

действующей на лопатки. Для этого система может быть представлена в виде абсолютно упругого стержня, для которого действие бурового раствора и вращения учтено в виде изменения силы трения [30]. На Рис. 4 представлена схема упрощенной модели роторной управляемой системы на интервале наклонного ствола скважины.

Забой скважины обозначен точкой D , отклоняющая лопатка представлена в виде опоры B , возникающая реакция R_B равна искомой нагрузке на лопатку, выдвигаемую на максимальное расстояние $\frac{3}{4}$ дюйма, что дает отклонение компоновки низа буровой колонны на $0,3^\circ$. Для нахождения реакций составим уравнения проекций силы реакции на оси X и Y , и уравнение моментов силы в точке D :

$$\Sigma F_x = Q + G \times \cos(\theta + 0.3^\circ) - R_{DX} = 0 \quad (1)$$

где F_x – равнодействующая проекции на ось X сил реакции в точке D , кН;

Q – осевая нагрузка на стержень (роторная управляемая система), кН;

G – вес стержня (C), кН;

θ – зенитный угол, град;

R_{DX} – составляющая силы реакции опоры забоя, направленная по оси X , кН.

$$\Sigma F_y = -G \times \sin(\theta + 0.3^\circ) + R_B - R_{DY} = 0 \quad (2)$$

где F_y – равнодействующая проекции на ось Y сил реакции в точке D , кН;

AD – длина стержня (роторная управляемая система), м;

R_B – сила реакции стержня (нагрузки на лопатку), кН;

R_{DY} – составляющая силы реакции опоры забоя, направленная по оси Y , кН.

$$F_{MD} = -G \times \frac{AD}{2} \times \sin(\theta + 0.3^\circ) + R_B \times BD = 0 \quad (3)$$

где F_{MD} – равнодействующая моментов в точке D , кНм;

BD – расстояние от отклоняющей лопатки до забоя, м.

Силы, определяющие нагрузку на отклоняющую лопатку при наборе зенитного угла, можно выразить из уравнений (2-3):

$$R_{DX} = Q + G \times \cos(\theta + 0.3^\circ) \quad (4)$$

$$R_B = G \times \sin(\theta + 0.3^\circ) + R_{DY} = \frac{G \times \frac{AD}{2} \times \sin(\theta + 0.3^\circ)}{BD} \quad (5)$$

Расчет нагрузки был проведен с шагом изменения зенитного угла 1° на всем интервале применимости модели – от 0 до 89° . На основании полученных данных были получены зависимости нагрузки от технологических параметров бурения наклонно-направленных скважин (Рис. 6).

При увеличении зенитного угла свыше 90° распределение сил, действующих на компоновку низа буровой колонны, меняется. Схема модели на интервале восстающей представлена на Рис. 5.

Вследствие перераспределения нагрузки возникает реакция R_A в опоре A . В точке D реакция R_D направлена в продольном направлении.

Уравнение моментов в точке A может быть представлено в следующем виде:

$$F_{MA} = G \times \frac{AD}{2} \times \sin(\theta + 0.3^\circ) - R_B \times AB + R_{AY} \times AD = 0 \quad (6)$$

где F_{MA} – равнодействующая моментов в точке A , кН;

R_{AY} – составляющая силы реакции опоры стенки скважины в точке A , направленная по оси Y , кН.

Реакция R_A в опоре A должна быть учтена при вычислении сил, определяющих нагрузку на отклоняющую лопатку при наборе зенитного угла свыше 90° . Ее зависимость получаем путем

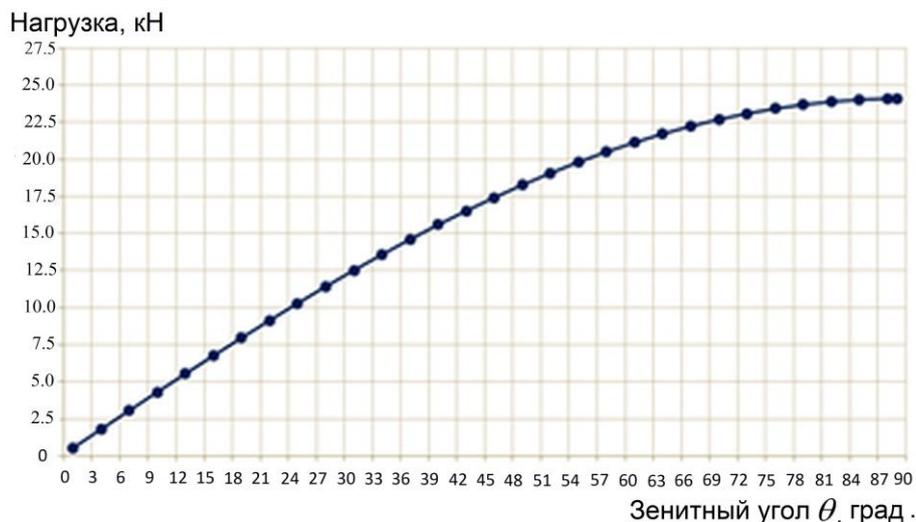


Рис. 6. Зависимость нагрузки на опору В (лопатку) от зенитного угла (наклонный участок).
 Fig. 6. Dependence of the load on the support В (blade) on the zenith angle (inclined section).

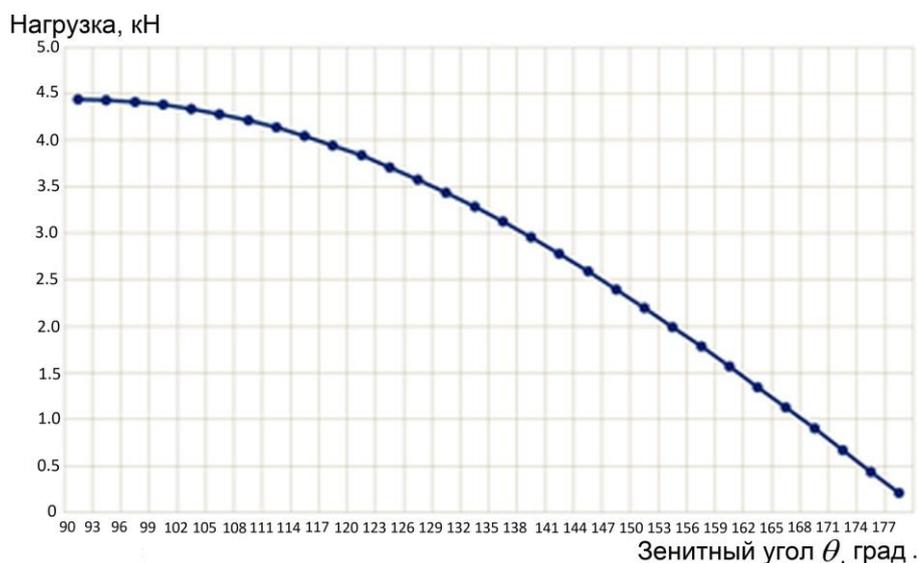


Рис. 7. Зависимость нагрузки на опору В (лопатку) от зенитного угла (восходящий участок).
 Fig. 7. Dependence of the load on the support В (blade) on the zenith angle (ascending section)

преобразования уравнения (6):

$$R_{AY} = \frac{R_B \times AB}{AD} - \frac{1}{2} G \times \sin(\theta + 0.3^\circ) \quad (7)$$

Расчет нагрузки на отклоняющую лопатку на интервале восходящего ствола скважины был проведен с аналогичным шагом изменения угла (1°), в диапазоне $90-179^\circ$ (Рис. 7).

Выполненный авторами расчет нагрузок на отклоняющие лопатки с учетом действующих сил был проведен для роторной управляемой системы Schlumberger PowerDrive X5 675 (диаметр – 215,9-250,8 мм; длина компоновки низа буровой колонны – 4,11 м; максимальная интенсивность искривления, град/30 м – 6,5; максимально допустимая осевая нагрузка – 800,68 кН, масса – 2463 кг). Расчетные значения нагрузки на

отклоняющие лопатки, полученные с использованием уравнений (1-7) для разных интервалов ствола скважины представлены на Рис. 6-7 (Рис. 6 – нагрузка на интервале наклонного, Рис. 7 – на интервале восходящего ствола скважины).

Для учета влияния осевой нагрузки на лопатку принято положение, что для сдвига объекта, прижатого к поверхности, необходимо приложить усилие большее или равное силе трения. Таким образом, окончательная нагрузка на отклоняющие лопатки определяется как сумма нагрузки, рассчитанной выше, и силы трения.

На Рис. 8 представлен расчет нагрузки на лопатку при осевой нагрузке для определенного

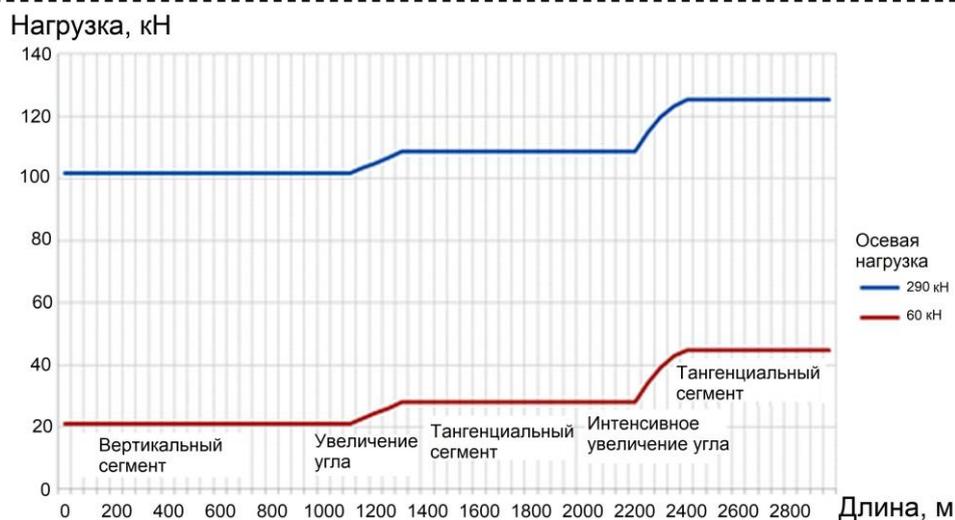


Рис. 8. Зависимость нагрузки на отклоняющую лопатку от величины осевой нагрузки при определенных зенитных углах

Fig. 8. Dependence of the load on the deflecting blade on the value of the axial load at certain zenith angles

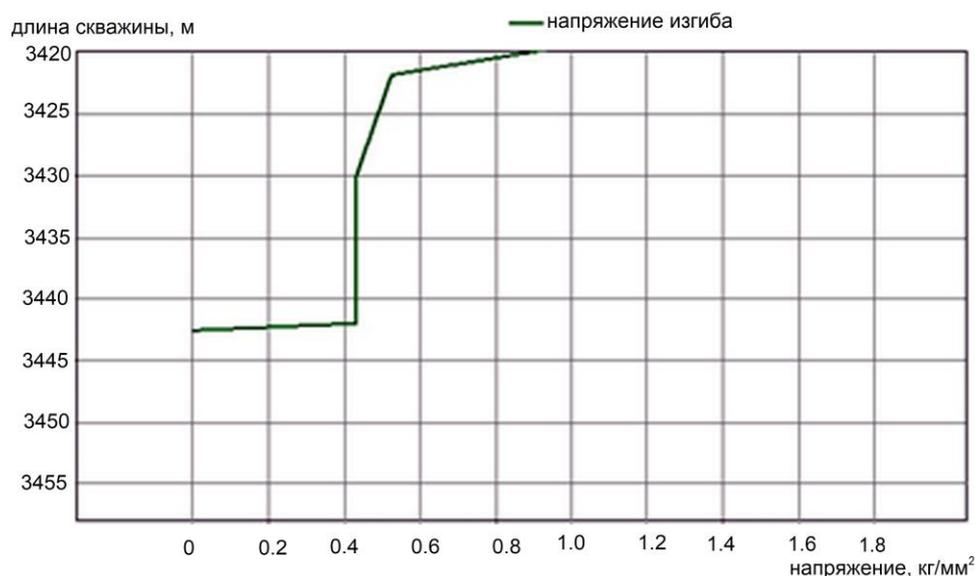


Рис 9. График напряжения изгиба для нижней части компоновки низа буровой колонны при осевой нагрузке 80 кН

Fig. 9. Bending stress plot for the bottom of the BHA at 80 kN axial load

режима бурения 60 кН и для рекомендуемой максимальной осевой нагрузки для системы Schlumberger PowerDrive X5 675 ($Q = 290$ кН). На основании полученных данных, составлены графики изменения нагрузки на отклоняющую лопатку в зависимости от величины осевой нагрузки для разных интервалов бурения (Рис. 8).

В ходе экспериментальной проверки полученных результатов был проведен расчет изгибающих напряжений буровой колонны для смоделированной скважины с горизонтальным участком независимым методом (с помощью ПО «Проектирование бурения» 12.8, ООО «Бурсофтпроект»). Глубина скважины принята 3443 м по стволу, длина горизонтального участка – 250 м, максимальный зенитный угол – 85° . Замер был проведен для горизонтального участка с

изменением осевой нагрузки от 60 до 200 кН с шагом 10 кН. На Рис. 9 представлен график напряжения изгиба для нижней части компоновки низа буровой колонны при осевой нагрузке 80 кН.

Напряжение, равное $0,9$ кг/мм², эквивалентно нагрузке на отклоняющую лопатку в 57,5 кН (с учетом площади поверхности лопатки), что в целом соответствует расчетным данным, отраженным на Рис. 8.

Для учета силы трения в условиях проектируемой скважины принят средневзвешенный коэффициент трения стали по горной породе, с учетом смазывающего действия бурового раствора ($k_{cp} = 0,35$). В расчетах был использован реагент «LUBRIOL» – смазочная добавка для буровых растворов (рекомендуемая изготовителем концентрация – 0,4-1,2%,

Таблица 2. Расчет нагрузки на отклоняющую лопатку при различной концентрации смазывающей добавки

Концентрация, %	Коэффициент трения	Сила трения, кН	Зенитный угол, град.	Нагрузка на отклоняющую лопатку, кН
0,40	0,25	20,00	85,00	44,03
0,60	0,19	15,20	85,00	39,23
0,80	0,14	11,20	85,00	35,23
1,00	0,08	6,40	85,00	30,43
1,20	0,04	3,20	85,00	27,23

способность снижать коэффициент трения – до 0,04). Расчет нагрузки на отклоняющую лопатку с меняющимся значением коэффициента трения, в зависимости от концентрации смазывающей добавки в буровом растворе, представлен в Таблице 2. Для расчета принято бурение при помощи системы Schlumberger PowerDrive X5 675 горизонтального участка (с максимальной силой трения). В качестве реагента принята широко распространенная смазывающая добавка «LUBRIOL». Расчет проведен с изменением концентрации добавки в диапазоне рекомендуемых производителем значений с шагом 0,2%.

В результате анализа полученных значений расчетов нагрузки на отклоняющие лопатки системы Schlumberger PowerDrive X5 675 были определены следующие закономерности, позволяющие судить о влиянии технологических параметров бурения на надежность системы.

Во-первых, для участка набора угла (Рис. 6) наблюдается полиномиальная зависимость второй степени. Причем, если анализировать нагрузку при наборе зенитного угла до 30°, наблюдается практически прямая пропорциональность между прилагаемой осевой нагрузкой на инструмент и мгновенной нагрузкой на отклоняющие лопатки; затем прирост нагрузки на них замедляется. Это обусловлено ростом усилия преодоления сил сопротивления со стороны стенок скважины, поскольку при зенитном угле до 30° что шероховатость стенок скважины и угол наклона ствола не критично сказывается на увеличении сил трения. При превышении зенитного угла выше критического значения в 30° влияние сил трения резко возрастает.

Напротив, для восстающего участка скважины (Рис. 7) наблюдается снижение нагрузки на лопатки с увеличением зенитного угла. Это обусловлено следующим физическим явлением. В интервале восстающими участками наблюдается явление «скважины с негативным весом», то есть скважины, в которой силы трения настолько высоки, что нет возможности спускать инструмент под действием собственного веса. То есть будет возникать потребность в создании дополнительной «толкающей» осевой силы на инструмент.

Следовательно, по сравнению с ситуацией с набором угла от 0° до 90° возникает снижение нагрузок на отклоняющие лопатки по причине того, что до них просто не доходит нагрузка, так как она распределяется на преодоление сил трения. Кроме того, на участках с зенитным углом более 90° наблюдается снижение нагрузки за счет того, что вектор силы тяжести от собственного веса инструмента направлен в противоположную сторону относительно вектора осевой нагрузки (Рис. 5). Таким образом, если вес системы и осевая нагрузка близки по величине, то в процессе бурения восстающего участка скважины (зенитный угол близко к 180°) возможно возникновение ситуации зависания инструмента – когда векторы осевой нагрузки и силы тяжести будут направлены в противоположные стороны вдоль одной прямой. При этом важно, чтобы участок инструмента, через который передается осевая нагрузка, был абсолютно жестким, чтобы исключить возможность перераспределения прикладываемой силы на стенки скважины вследствие изгиба.

Во-вторых, сопоставив графики на Рис. 6 и 7, можно заметить, что в точке перехода зенитного угла 90° (горизонтальный ствол) происходит резкий перепад нагрузки на отклоняющую лопатку – более чем в пять раз. Исходя из этого, можно сделать предварительный вывод об опасности применения роторной управляемой системы «Push-the-Bit» при проводке волнообразных горизонтальных профилей, где происходит неоднократное пересечение данной точки, поскольку это может вызывать негативные усталостные нагрузки на элементы системы. Кроме того, рассмотренное выше действие сил трения и тяжести в интервале зенитного угла 90-180° при прочих равных условиях снижает эффективность работы роторной управляемой системы по искривлению ствола скважины. Поэтому при проходке волнообразных профилей требуется изменять режим бурения – варьировать осевые нагрузки и частоты вращения.

Из данных на Рис. 8 следует определяющая роль осевой нагрузки в формировании усилия, действующего на отклоняющие лопатки, поэтому на участках интенсивного искривления изменение режима бурения создает значительный рост

нагрузок, которые могут приблизиться к максимальным. Это объясняется возрастанием силы реакции опоры с увеличением зенитного угла. Поэтому на участках интенсивного искривления следует применять осмотрительность для снижения риска отказа системы. На Рис. 9 представлено подтверждение авторской методики расчета независимым методом, при котором напряжения изгиба для нижней части компоновки низа буровой колонны соответствуют приведенным данным о нагрузках на отклоняющие лопатки.

В-третьих, представленные в Таб. 2 результаты оценки влияния концентрации смазывающей добавки в составе бурового раствора подтвердили ожидания, которые выражались в снижении расчетных значений нагрузок на отклоняющие лопатки. Вместе с тем необходимо учитывать, что в практике бурения сложно обосновать и реализовать увеличение количества смазывающей добавки в составе бурового раствора по двум причинам. Первая – увеличение стоимости сервиса буровых растворов (при том, что буровые подрядчики стремятся снизить себестоимость строительства скважины). Вторая причина – потребность полностью пересматривать или корректировать программу промывки вследствие изменения свойств промывочной жидкости. Не исключено, что изменение концентрации смазывающей добавки в составе бурового раствора может привести к ухудшению передачи сигналов между роторной управляемой системой и дневной поверхностью, при том, что развитие таких систем, анонсируемое Schlumberger, подразумевает продолжение использования гидроимпульсного канала двусторонней коммуникации системы с дневной поверхностью. Кроме того, снижение сил трения на восстающих участках траектории скважины может привести к кратному увеличению нагрузок на отклоняющие лопатки. Поэтому необходимы дальнейшие исследования влияния сил трения на нагрузки на лопатки, в сотрудничестве с производителями лубрикантов и нефтесервисными компаниями-подрядчиками.

В-четвертых, расчеты нагрузки на отклоняющую лопатку, представленные на Рис. 6-9, выполнены для глубины бурения нефтегазовых скважин на месторождениях в Российской Федерации, далеких от максимального значения.

Осевая нагрузка в 60-290 кН также не является пределом для используемых в настоящее время и проектируемых роторных управляемых систем, в т.ч. для семейства Schlumberger PowerDrive. Так, при максимальной осевой нагрузке в 800 кН (Schlumberger PowerDrive X6 675 (Schlumberger, 2017)) нагрузка на отклоняющую лопатку достигнет, по нашим расчетам, 345 кН. В дальнейшем по мере сооружения более глубоких скважин, развития технологий и оборудования для наклонно-направленного бурения повышаются требования к его надежности. Одновременно будут возрастать нагрузки на отклоняющий модуль, которые при приближении к критическим значениям будут повышать риск отказа системы и существенно снижать надежность. Следовательно, необходимы дальнейшие исследования влияния нагрузки на отклоняющие лопатки на надежность всей системы. Это особенно важно в связи с развитием комбинированных систем, таких как Schlumberger Archer. Вместе с тем соединение в таких системах двух типов отклоняющих модулей – «Point-the-Bit» and «Push-the-Bit» – ведет к перераспределению нагрузки между ними. Это, в свою очередь, является одновременно ограничением применения рассмотренного в статье метода расчета нагрузок на выдвижные лопатки отклоняющего модуля, и предпосылкой для его дальнейшего исследования.

Таким образом, представленные в статье расчеты показали, что рост нагрузки на отклоняющую лопатку происходит линейно в интервале зенитного угла 0-30°, в дальнейшем до 90° – по убывающей. Наибольший перепад нагрузок на лопатку происходит при переходе с восходящего на нисходящий участок – в 5 раз, что снижает надежность систем «Push-the-Bit» при проведении горизонтальных волнообразных скважин. В ходе исследования установлена прямая зависимость между осевой нагрузкой и нагрузкой на отклоняющую лопатку, что свидетельствует о необходимости дальнейших исследований влияния усталостных деформаций на надежность систем по мере увеличения глубины скважин и числа волнообразных участков. Кроме того, при проходке волнообразных профилей рекомендовано скорректировать режим бурения для избегания значений нагрузок на отклоняющие лопатки, близких к максимальным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen, X. The Maximum-Allowable Well Depth While Performing Ultra-Extended-Reach Drilling From Shallow Water to Deepwater Target / X. Chen, D. Gao // SPE Journal. – 2018. – Vol. 23(1). – P. 13.
2. Zhang, C. Overview of rotary steerable system and its control methods / C. Zhang, W. Zou, N. Cheng // Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin, 2016. – P. 1559-1565.

3. Bouldin, B. Test of an All-Electric Intelligent-Completion System for Extreme-Reservoir-Contact Wells / B. Bouldin, C. Verma, I. Bellaci, M. Black, S. Dyer, J. Algeroy, Y. Pan // SPE Drilling & Completion. – 2014. – Vol. 29(3). – P. 10-19.
4. Eren, T. Directional drilling positioning calculations / T. Eren, V. Suicmez // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2020. – Vol. 73. – P. 103081.
5. Lines, L.A. Unique analytical model improves understanding of violent dynamic behaviour of advanced oilfield rotary steerable drilling systems / L.A. Lines, D.R. Stroud, D.J. Minett-Smith, J. Pagett // Proceedings of 10th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery, 11–13 September 2012, London, UK. – 2012. – P. 591-600.
6. Hummes, O. Evolution of High Build-Rate RSS Changes the Approach to Unconventional Oil and Gas Drilling / O., Hummes, S.S. Janwadkar, J.R. Powers, P. Bond, M.E. Anderson, S.W. Chesher, J.D. Hildebrand // Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 October-2 November 2011, Denver, USA. – 2011. – Vol. 6. – P. 4543-4551.
7. Vilamová, Š. Unconventional oil resources exploitation: A review / Š. Vilamová, M. Piecha, Z. Pavelek // Acta Montanistica Slovaca. – 2016. Vol. 21(3). – P. 247-257.
8. Marck, J. Influence of Rotary-Steerable-System Design on Borehole Spiraling / J. Marck, E. Detournay // SPE Journal. – 2016. – Vpl. 21(1). – P. 10.
9. Wittenberger, G. Deep hole drilling modern disintegration technologies in process of HDR technology / G. Wittenberger, M. Cehlár, Z. Jurkasová // Acta Montanistica Slovaca. – 2012. – Vol. 17(4). – P. 241-246.
10. Ким В.Д. Разработка методики выбора РВС для различных геолого-технических условий: Магистерская диссертация. – Томск: ТПУ, 2019. – 121 с.
11. Figueredo, C. Enhanced RSS Technology Pushes Drilling Envelope // Journal of Petroleum Technology. – 2014. – Vol. 66(3). – P. 3.
12. Stroud, D. Real-time whirl detector improves RSS reliability, drilling efficiency / D. Stroud, J. Pagett, D. Minett-Smith // Hart's E and P. – 2011. – Vol. AUGUST. – P. 14.
13. Skalle, P. Downhole failures revealed through ontology engineering / P. Skalle, A. Aamodt // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – Vol. 191. – P. 107188.
14. Guan, Z.C. Dynamic behavior analysis of push-the-bit rotary steerable bottom hole assembly / Z.C. Guan, H. Wang, Y.C. Shi, W.Q. Chen, G.S. Zhao, J.-Y. Wang, G.-Q. Cao // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2019. – Vol. 33(4). – P. 1501-1511.
15. Быков, И.Ю. Эксплуатационная надежность и работоспособность буровых машин / И.Ю. Быков. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2004. – 196 с.
16. Wang, R. Torsional vibration analysis of push-the-bit rotary steerable drilling system / R. Wang, Q. Xue, L. Han, F. Sun, W. Yue // Meccanica. – 2014. – Vol. 49(7). – P. 1601-1615.
17. Brehme, J. Total BHA Reliability – An Improved Method to Measure Success / J. Brehme, T. Travis // Proceedings of IADC/SPE Drilling Conference, 4-6 March 2008, Orlando, USA. – 2008. – Vol. 2. – P. 769-778.
18. Кахаров, С.К. Причины отказов бурового оборудования при эксплуатации / С.К. Кахаров, Р.А. Ганджумян // Инженер-нефтяник. – 2013. – №2. – С.32-33.
19. Reckmann, H. Step Change in BHA Reliability and Performance Due to Utilization of Downhole Drilling Dynamics Services / H. Reckmann, A. Hohl, H. Oueslati, O. Akimov // IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition. 27-29 August 2018, Bangkok, Thailand. – 2018. – Vol. 1. – P. 885-903.
20. Heinisch, D. Testing and Characterization of Shock and Vibration Loads to Enhance Drilling Tool Reliability and Efficiency / D. Heinisch, H. Oueslati, T.M. Popp, B. Meyer-Heye, C. Schepelmann, H. Reckmann // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, 7-10 November 2016, Abu Dhabi, UAE. – 2016. – P. 25.
21. Hohl, A. Derivation and experimental validation of an analytical criterion for the identification of self-excited modes in drilling systems / A. Hohl, M. Tergeist, H. Oueslati, J.R. Jain, C. Herbig, G.-P. Ostermeyer, H. Reckmann // Journal of Sound and Vibration. – 2015. – Vol. 342. – P. 290-302.
22. Flegner P. Some problems in control of the quality of the process of rotary drilling of rocks by using suitable visualization of concurrent vibrations / P. Flegner, K. Feriančíková, E. Lazarová // Acta Montanistica Slovaca. – 2015. Vol. 20(4). – P. 282-289.

23. Lentsch D. Overcoming Drilling Challenges With Rotary Steerable Technology in Deep Geothermal Wells in the Molasse Basin of Southern Germany / D. Lentsch, A. Savvatis, A. Schubert, W. Schoebel // GRC Transactions. – 2012. – Vol. 36(1). – P. 165-169.
24. Schlumberger PowerDrive X6. Rotary Steerable System, 2017. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.slb.com/-/media/files/drilling/product-sheet/powerdrive-x6-ps.ashx> – [18.08.2020].
25. Козырева, С.В. Эксплуатация и ремонт нефтегазопромыслового оборудования. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого. 2017. – 178 с.
26. Русинов, Д.Ю. Исследование надежности блока отклонения системы управления буровым устройством / Д.Ю. Русинов, М.С. Турбаков, А.А. Куницких, Н.И. Крысин // Нефтяное хозяйство. – 2017. – №12. – С. 98-101.
27. Крысин, Н.И., Кривошеков С.Н., Турбаков М.С., Кычкин А.В., Кожевников Е.В. Моделирование процесса управления траекторией скважины в телеметрической системе / Н.И. Крысин, С.Н. Кривошеков, М.С. Турбаков, А.В. Кычкин, Е.В. Кожевников // Нефтяное хозяйство. – 2017. – №12. – С.105-107.
28. Мелехин, А.А. Блок отклонения системы управления буровым устройством / А.А. Мелехин, М.С. Турбаков, Д.Ю. Русинов, С.Е. Чернышов, А.А. Злобин. Патент на изобретение RU 2655325 С1, 25.05.2018. Заявка № 2017113661 от 19.04.2017.
29. Булин, Д. Россия не знает, что делать с морем сланцевой нефти // BBC. – 2013. – 11.06.2013. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.bbc.com/russian/business/2013/06/130611_shale_oil_russia – [18.08.2020].
30. Новосельцев, Д.И. Применение методики расчета нагрузок, действующих на отклоняющий модуль роторной управляемой системы, для определения риска отказа системы / Д.И. Новосельцев, А.В. Епихин, А.В. Анисимов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2017. – №6. – С.4-8.

REFERENCES

1. Chen, X. The Maximum-Allowable Well Depth While Performing Ultra-Extended-Reach Drilling From Shallow Water to Deepwater Target / X. Chen, D. Gao // SPE Journal. – 2018. – Vol. 23(1). – P. 13.
2. Zhang, C. Overview of rotary steerable system and its control methods / C. Zhang, W. Zou, N. Cheng // Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin, 2016. – P. 1559-1565.
3. Bouldin, B. Test of an All-Electric Intelligent-Completion System for Extreme-Reservoir-Contact Wells / B. Bouldin, C. Verma, I. Bellaci, M. Black, S. Dyer, J. Algeroy, Y. Pan // SPE Drilling & Completion. – 2014. – Vol. 29(3). – P. 10-19.
4. Eren, T. Directional drilling positioning calculations / T. Eren, V. Suicmez // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2020. – Vol. 73. – P. 103081.
5. Lines, L.A. Unique analytical model improves understanding of violent dynamic behaviour of advanced oilfield rotary steerable drilling systems / L.A. Lines, D.R. Stroud, D.J. Minett-Smith, J. Pagett // Proceedings of 10th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery, 11–13 September 2012, London, UK. – 2012. – P. 591-600.
6. Hummes, O. Evolution of High Build-Rate RSS Changes the Approach to Unconventional Oil and Gas Drilling / O., Hummes, S.S. Janwadkar, J.R. Powers, P. Bond, M.E. Anderson, S.W. Chesher, J.D. Hildebrand // Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 October-2 November 2011, Denver, USA. – 2011. – Vol. 6. – P. 4543-4551.
7. Vilamová, Š. Unconventional oil resources exploitation: A review / Š. Vilamová, M. Piecha, Z. Pavelek // Acta Montanistica Slovaca. – 2016. Vol. 21(3). – P. 247-257.
8. Marck, J. Influence of Rotary-Steerable-System Design on Borehole Spiraling / J. Marck, E. Detournay // SPE Journal. – 2016. – Vpl. 21(1). – P. 10.
9. Wittenberger, G. Deep hole drilling modern disintegration technologies in process of HDR technology / G. Wittenberger, M. Cehlár, Z. Jurkasová // Acta Montanistica Slovaca. – 2012. – Vol. 17(4). – P. 241-246.
10. Kim V.D. Razrabotka metodiki vybora RUS dlya razlichnyh geologo-tekhnicheskikh uslovij: Magisterskaya dissertaciya. – Tomsk: TPU, 2019. – 121 s.
11. Figueredo, C. Enhanced RSS Technology Pushes Drilling Envelope // Journal of Petroleum Technology. – 2014. – Vol. 66(3). – P. 3.

12. Stroud, D. Real-time whirl detector improves RSS reliability, drilling efficiency / D. Stroud, J. Pagett, D. Minett-Smith // *Hart's E and P*. – 2011. – Vol. AUGUST. – P. 14.
13. Skalle, P. Downhole failures revealed through ontology engineering / P. Skalle, A. Aamodt // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 191. – P. 107188.
14. Guan, Z.C. Dynamic behavior analysis of push-the-bit rotary steerable bottom hole assembly / Z.C. Guan, H. Wang, Y.C. Shi, W.Q. Chen, G.S. Zhao, J.-Y. Wang, G.-Q. Cao // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2019. – Vol. 33(4). – P. 1501-1511.
15. Bykov, I.Yu. Ekspluatacionnaya nadezhnost' i rabotosposobnost' burovyyh mashin / I.YU. Bykov. N.D. Ckhadaya. – Uhta: UGTU, 2004. – 196 s.
16. Wang, R. Torsional vibration analysis of push-the-bit rotary steerable drilling system / R. Wang, Q. Xue, L. Han, F. Sun, W. Yue // *Meccanica*. – 2014. – Vol. 49(7). – P. 1601-1615.
17. Brehme, J. Total BHA Reliability – An Improved Method to Measure Success / J. Brehme, T. Travis // *Proceedings of IADC/SPE Drilling Conference*, 4-6 March 2008, Orlando, USA. – 2008. – Vol. 2. – P. 769-778.
18. Kaharov, S.K., Prichiny otkazov burovogo oborudovaniya pri ekspluatatsii / S.K. Kaharov, R.A. Gandzhumyan // *Inzhener-neftyanik*. – 2013. – Vol. 2. – S.32-33.
19. Reckmann, H. Step Change in BHA Reliability and Performance Due to Utilization of Downhole Drilling Dynamics Services / H. Reckmann, A. Hohl, H. Oueslati, O. Akimov // *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*. 27-29 August 2018, Bangkok, Thailand. – 2018. – Vol. 1. – P. 885-903.
20. Heinisch, D. Testing and Characterization of Shock and Vibration Loads to Enhance Drilling Tool Reliability and Efficiency / D. Heinisch, H. Oueslati, T.M. Popp, B. Meyer-Heye, C. Schepelmann, H. Reckmann // *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*, 7-10 November 2016, Abu Dhabi, UAE. – 2016. – P. 25.
21. Hohl, A. Derivation and experimental validation of an analytical criterion for the identification of self-excited modes in drilling systems / A. Hohl, M. Tergeist, H. Oueslati, J.R. Jain, C. Herbig, G.-P. Ostermeyer, H. Reckmann // *Journal of Sound and Vibration*. – 2015. – Vol. 342. – P. 290-302.
22. Flegner P. Some problems in control of the quality of the process of rotary drilling of rocks by using suitable visualization of concurrent vibrations / P. Flegner, K. Feriančíková, E. Lazarová // *Acta Montanistica Slovaca*. – 2015. Vol. 20(4). – P. 282-289.
23. Lentsch D. Overcoming Drilling Challenges With Rotary Steerable Technology in Deep Geothermal Wells in the Molasse Basin of Southern Germany / D. Lentsch, A. Savvatis, A. Schubert, W. Schoebel // *GRC Transactions*. – 2012. – Vol. 36(1). – P. 165-169.
24. Schlumberger PowerDrive X6. Rotary Steerable System, 2017. [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <https://www.slb.com/-/media/files/drilling/product-sheet/powerdrive-x6-ps.ashx> – [18.08.2020].
25. Kozyreva, S.V. Ekspluatatsiya i remont neftegazopromyslovogo oborudovaniya. – Gomel': GGTU im. P.O. Suhogo. 2017. – 178 s.
26. Rusinov, D.YU. Issledovanie nadezhnosti bloka otkloneniya sistemy upravleniya burovym ustrojstvom / D.Yu. Rusinov, M.S. Turbakov, A.A. Kunickih, N.I. Krysin // *Neftyanoe hozyajstvo*. – 2017. – Vol.12. – S. 98-101.
27. Krysin, N.I., Krivoshchekov S.N., Turbakov M.S., Kychkin A.V., Kozhevnikov E.V. Modelirovanie processa upravleniya traektoriej skvazhiny v telemetricheskoy sisteme / N.I. Krysin, S.N. Krivoshchekov, M.S. Turbakov, A.V. Kychkin, E.V. Kozhevnikov // *Neftyanoe hozyajstvo*. – 2017. – Vol.12. – S.105-107.
28. Melekhin, A.A. Blok otkloneniya sistemy upravleniya burovym ustrojstvom / A.A. Melekhin, M.S. Turbakov, D.Yu. Rusinov, S.E. Chernyshov, A.A. Zlobin. Patent na izobretenie RU 2655325 C1, 25.05.2018. Zayavka Vol. 2017113661 ot 19.04.2017.
29. Bulin, D. Rossiya ne znaet, chto delat' s morem slancevoj nefti // BBC. – 2013. – 11.06.2013. [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: https://www.bbc.com/russian/business/2013/06/130611_shale_oil_russia – [18.08.2020].
30. Novosel'cev, D.I. Primenenie metodiki rascheta nagruzok, dejstvuyushchih na otklonyayushchij modul' rotnornoj upravlyaemoj sistemy, dlya opredeleniya riska otkaza sistemy / D.I. Novosel'cev, A.V. Epihin, A.V. Anisimov // *Stroitel'stvo neftyanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more*. – 2017. – Vol.6. – S.4-8.

Поступило в редакцию 18.08.2020

Received 18 August 2020