



УДК 539.3

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ БУРИЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА СО СТЕНКАМИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО УЧАСТКА СКВАЖИНЫ

NUMERICAL ANALYSIS OF IMPACT INTERACTION OF DRILLING TOOL STRUCTURAL ELEMENTS WITH THE WALLS OF THE HORIZONTAL SECTION OF THE BOREHOLE

Деркач Н.Д.

ООО «Новобур», Пермь

Перельман О.М.

ООО «Новобур», Пермь

Пестренин В.М.Пермский государственный университет
pestreninvm@mail.ru**Пестренина И.В.**

Пермский государственный университет

Фадейкин А.С.

ООО «Новобур», Пермь

Аннотация. Проходка скважин, особенно наклонных и горизонтальных, сопровождается ударным взаимодействием колонны труб и забойного двигателя со стенками скважины. Такое взаимодействие приводит к замедлению проходки, раскручиванию резьбовых соединений, нарушению электрических контактов в телекоммуникационной системе, оказывает негативное влияние на прочностные характеристики бурового оборудования и пр. Экспериментальное изучение ударного взаимодействия со стенками скважины проводится в испытательных стендах. При проектировании испытательного стенда необходимо исследование зависимости поведения испытуемых образцов от параметров стенда. Решению этой задачи посвящена настоящая работа. В ней на основе балочной математической модели стенда в виде составного тяжелого горизонтального вращающегося вала, закрепленного в цилиндрических подшипниках и ограниченного цилиндрическим отбойником, изучаются возможные виды движения вала (forward whirl, chaotic whirl, backward whirl,), ударные взаимодействия вала с отбойником, последствия удара. Показано, что устойчивое периодическое ударное взаимодействие вала с отбойником может быть реализовано вблизи его первой собственной частоты. Оно сопровождается возникновением упругих волн, в том числе, волн ускорения сдвига. Выявлено, что при монотонном возрастании скорости вращения вала достигается ее критическое значение, после которого движение вала с прямой прецессии сменяется на обратную. Переход к обратной прецессии приводит к неустойчивому движению вала и сопровождается ростом амплитуды его изгибных колебаний. Сформулирован критерий определения критической скорости. Предложен способ управления амплитудой изгибных колебаний испытываемого оборудования.

Ключевые слова: испытательный стенд бурового оборудования, прямая и обратная прецессия, ударное взаимодействие с отбойником, волны ускорения.

Derkach N.D.

Novobur LLC, Perm

Perelman O.M.

Novobur LLC, Perm

Pestrenin V.M.Perm State University
pestreninvm@mail.ru**Pestrenina I.V.**

Perm State University

Fadeikin A.S.

Novobur LLC, Perm

Annotation. Drilling wells, especially deviated and horizontal wells, is accompanied by impact interaction of the pipe string and down-hole motor with the borehole walls. Such interaction leads to delayed penetration, unscrewing of threaded joints, disturbance of electrical contacts in the telecommunication system, and has a negative effect on the strength characteristics of drilling equipment, etc. Experimental study of impact interaction with borehole walls is carried out in test benches. When designing a test bench, it is necessary to study the dependence of behavior of the test specimens on the parameters of the bench. The present work is devoted to the solution of this problem. Based on a beam mathematical model of the test bench in the form of a composite heavy horizontal rotating shaft fixed in cylindrical bearings and bounded by a cylindrical bumper, the possible types of shaft motion (forward whirl, chaotic whirl, backward whirl,), shock interaction of the shaft with the bumper, consequences of impact are studied. It is shown that stable periodic shock interaction of the shaft with the bumpstock can be realized near its first natural frequency. It is accompanied by appearance of elastic waves, including shear acceleration waves. It is found that with a monotonous increase in the shaft speed, its critical value is reached, after which the shaft motion from the direct precession is replaced by the reverse precession. The transition to the reverse precession leads to unstable motion of the shaft and is accompanied by an increase in the amplitude of its bending oscillations. The criterion for determining the critical speed is formulated. The method of controlling the amplitude of bending vibrations of the tested equipment is proposed.

Keywords: drilling equipment test bed, forward and reverse precession, impact interaction with the bumper, acceleration waves.



Введение

В современных условиях горизонтальное бурение в России набирает обороты. Так если в 2010 г. его доля в эксплуатационном бурении составляла 11 %, то в 2020 г. она выросла до 45 %, а к 2030 г. превысит 50 %. Несмотря на большую стоимость, горизонтальные скважины дают кратное увеличение дебитов, поскольку многократно возрастает площадь дренирования. Оно применяется при освоении шельфовых проектов, в болотистых и сильно пересеченных местностях, для вскрытия низкопроницаемых коллекторов, повышения нефтеотдачи пластов, восстановления бездействующего фонда скважин [1]. Основные районы применения горизонтального бурения – это действующие месторождения в Западной Сибири, на Сахалине и Ямале, морское бурение – на Каспийском, Баренцевом и Охотском морях. А основная проблема на текущий момент – 90 % оборудования и услуг, необходимых для горизонтального бурения, предоставляется зарубежными компаниями. ООО «Новобур» в данный период занимается разработкой отечественного оборудования для решения выше указанной проблемы. По ходу развития работ создается многофункциональный испытательный комплекс для бурового инструмента, включающий Буровой Горизонтальный Стенд (БГС). Ниже представленная статья – один из этапов разработки БГС.

В работе на основе балочной модели [2] компоновки низа бурильной колонны (КНБК) изучаются условия устойчивого ударного взаимодействия секции бурового инструмента с цилиндрическим отбойником, влияние такого взаимодействия на параметры состояния испытываемого образца.

Постановка задачи

Ударное взаимодействие элементов КНБК со стенками скважины моделируется изгибными колебаниями вращающегося тяжелого составного вала, закрепленного в горизонтальном стенде (рис. 1). Вал состоит из испытываемого образца 1, закрепляемого в стенде концевыми штангами 2. Испытываемый образец – элемент компоновки низа бурильной колонны: секции двигателя, УБТ. Скважина моделируется цилиндрическим упругим отбойником 3, расположенным в средней части образца. Вал приводится во вращение электродвигателем 4. М – середина испытываемого образца.

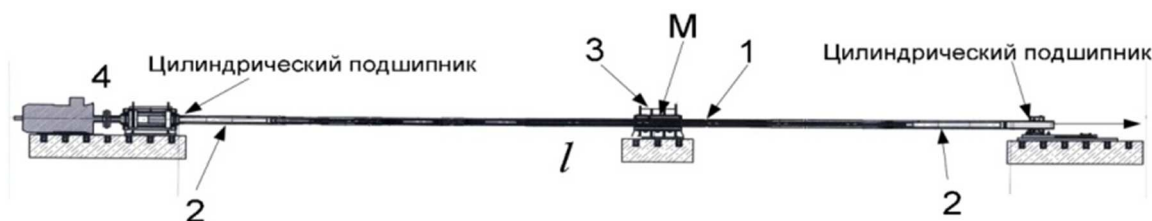


Рисунок 1 – Схема испытательного стенда

Изменяемыми являются геометрические и материальные параметры отбойника и штанг.

Задача состоит в исследовании состояния вала в зависимости от скорости его вращения, изучении характера его взаимодействия с отбойником. В частности, требуется выявить режим устойчивого ударного взаимодействия вала с отбойником.

Исследование проводится численно с использованием инженерного пакета ANSYS на основе геометрически нелинейной упругой модели вала.

Движение составного вала вблизи резонансной частоты

Ранее было установлено влияние сил тяжести, диссипации и дисбаланса на изгибные колебания горизонтального вала. Показано, что изогнутый под действием сил тяжести вал вращается относительно линии центров тяжести сечений. Диссипация, пропорциональная скорости, обуславливает центрирование вала. Наличие дисбаланса обеспечивает изгибные колебания относительно линии вращения. Поэтому причиной изгибных колебаний составного вала является его несбалансированность.

При исследованиях изгибных колебаний вращающегося вала дисбаланс задается равенством $y = \varepsilon \sin(\pi x/l)$. Принято, что угловая скорость вращения вала изменяется по линейному закону до около-резонансной частоты (рис. 2, а) и далее остается постоянной. Вычисления проводятся для расчетной схемы на рисунке 1. На рисунке 2, б показана траектория центра тяжести сечения образца в точке М. Видим, что с течением времени движение вала переходит в устойчивое стационарное движение (прямая прецессия – forward whirl) – вал совершает периодические колебания с ударами по отбойнику.

Ударное взаимодействие объекта с отбойником генерирует в нем упругие волны, распространяющиеся к концам вала. На рисунке 3 показаны ускорения в точке взаимодействия при различном коэффициенте диссипации. Видим, что этот параметр существенно влияет на результат ударного взаимодействия.

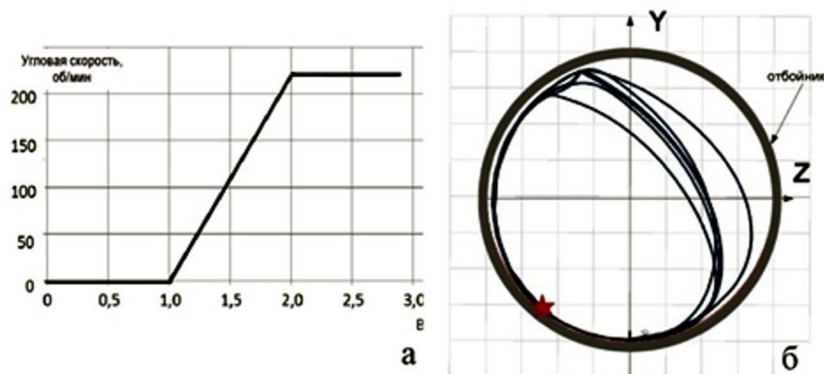


Рисунок 2 – а) Закон изменения угловой скорости вращения двигателя; б) траектория центра тяжести сечения в точке М в поперечном сечении YZ

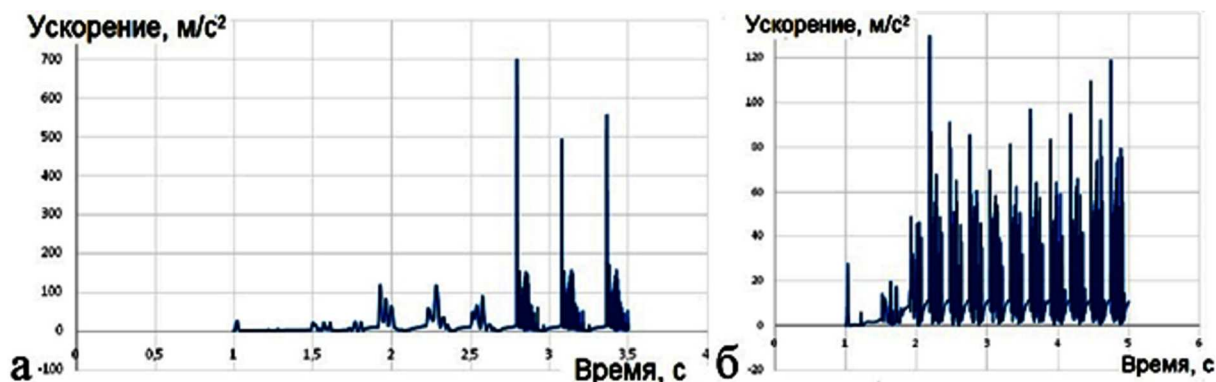


Рисунок 3 – Ускорения в точке взаимодействия вала с отбойником: а) коэффициент диссипации 0,01; б) коэффициент диссипации 0,05

Движение составного вала в зависимости от угловой скорости его вращения

Рассматривается движение тяжелого вала с монотонно возрастающей угловой скоростью вращения. В момент начала движения ($t = t_0$) вал, прогнувшись под действием сил тяжести, находится в состоянии статического равновесия в контакте с отбойником. Принимается, что силы трения отсутствуют (оценка показала, что влияние сил трения пренебрежимо мало), учитываются диссипация и дисбаланс. На рисунке 4 приводится траектория движения центра тяжести сечения в точке М вала. Движение начинается с проскальзыванием по отбойнику около точки контакта без отрыва (линии а); семейство линий б – замкнутые кривые с отрывом и ударом об отбойник с возрастающей амплитудой; линия с – околорезонансное движение с ударом об отбойник; семейство линий d – центрирование вала, уменьшение амплитуд колебаний, прекращение ударного взаимодействия; область е – хаотическое движение, смена прямой прецессии на обратную; кривые f – неустойчивое движение с повышением амплитуды, затем движение в контакте с отбойником.

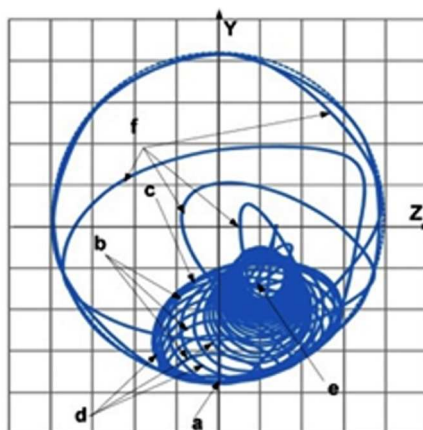


Рисунок 4 – Траектория центра тяжести сечения в точке М вала при монотонном возрастании скорости его вращения: последовательность участков: а–b–c–d–e–f



Траектория центра тяжести сечения в точке М вала в области смены прецессии приводится на рисунке 5.

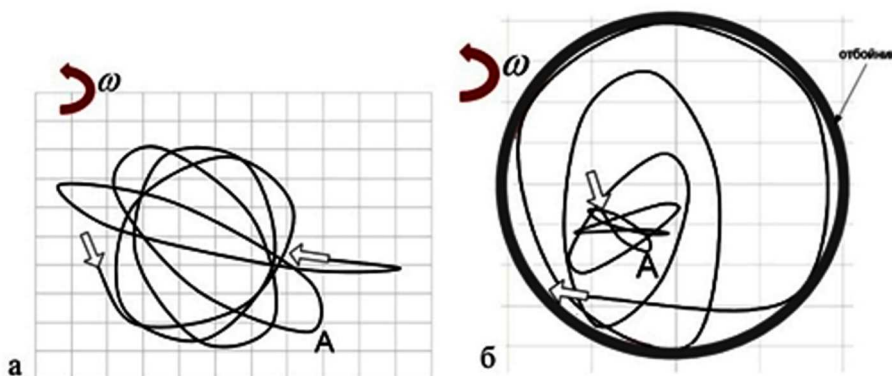


Рисунок 5 – Траектория центра тяжести сечения в точке М вала в области смены прямой прецессии на обратную: а) участок d до т.А (прямая прецессия); б) участок f после т.А (хаотическое движение, затем обратная прецессия)

Обозначим через ω^* скорость вращения вала, при которой он переходит в неустойчивое хаотическое движение, сменяемое движением с обратной прецессией. Эту скорость назовем критической. Для ее определения предлагается использовать диаграмму Кэмпбелла (рис. 6), на которой отражена зависимость собственных частот от скорости вращения вала при прямой и обратной прецессии.

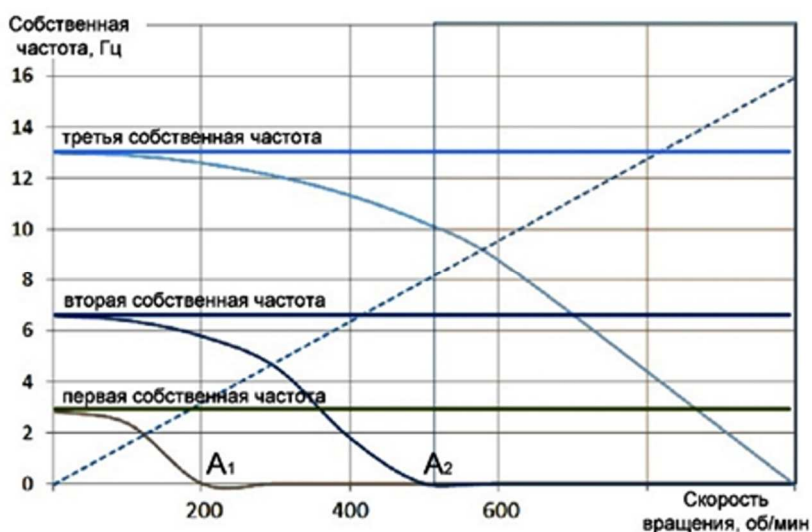


Рисунок 6 – Диаграмма Кэмпбелла. Первые три собственные частоты в зависимости от скорости вращения вала в прямой и обратной прецессии

По горизонтальной оси откладывается скорость вращения вала Ω (об / мин), по вертикальной оси – собственная частота ω (Гц). При прямой прецессии значения собственных частот слабо зависят от скорости вращения. В случае обратной прецессии такая зависимость весьма существенна. Как видно из рисунка 6, в точке A_1 первая собственная частота обращается в нуль, а в точке A_2 – вторая. Таким образом, начиная со скорости вращения A_2 характеристическое уравнение, определяющее собственные частоты вала, будет иметь кратные корни (два нулевых корня). Кратным корням отвечает расходящееся решение, поэтому точка A_2 является границей частот вращения вала, начиная с которой движение с обратной прецессией становится неустойчивым. Численные эксперименты показывают, что переход к хаотическому движению и далее к смене прецессии на обратную реализуется при вращении вала с угловой скоростью близкой к A_2 . Эту скорость и принимаем за критическую ω^* .

Изгибные колебания двигателя в стенде с короткими искривленными концевыми штангами

Полученные выше результаты показывают, что обеспечить устойчивое ударное взаимодействие двигателя с отбойником можно в окрестности первой резонансной частоты за счет наличия дисбаланса.



Дисбаланс в элементах конструкции, подвергаемых испытаниям, при изготовлении минимизируется. Обеспечить необходимый для требуемого уровня ударного взаимодействия дисбаланс можно, например, за счет искривления концевых штанг крепления составного вала. Параметрами управления могут служить стрела изгиба концевых штанг, их материальные свойства и геометрические размеры. В этом пункте рассматривается ударное взаимодействие с отбойником образца бурильного инструмента, закрепленного в стенде короткими искривленными концевыми штангами (рис. 7).

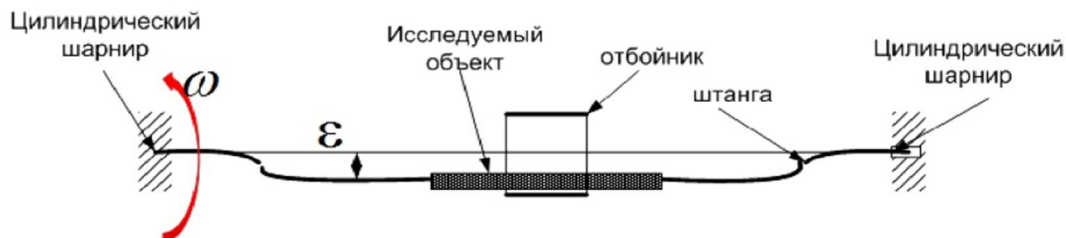


Рисунок 7 – Схема составного вала с искривленными короткими штангами

Изменение длины штанг в сторону укорочения приводит к возрастанию первой резонансной частоты. При вращении с резонансной частотой вал совершает устойчивое периодическое ударное взаимодействие с отбойником (рис. 8).

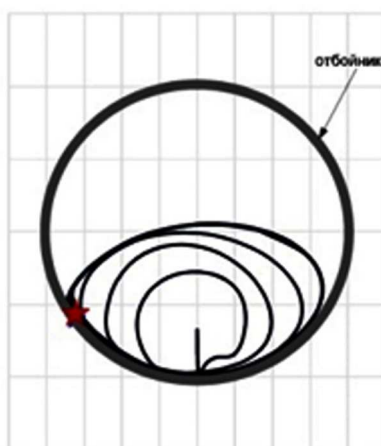


Рисунок 8 – Траектория срединной точки исследуемого объекта с выходом на стационарное ударное взаимодействие вала с отбойником

В рассматриваемом примере ударное взаимодействие вызывает ускорения порядка 55g (рис. 9).

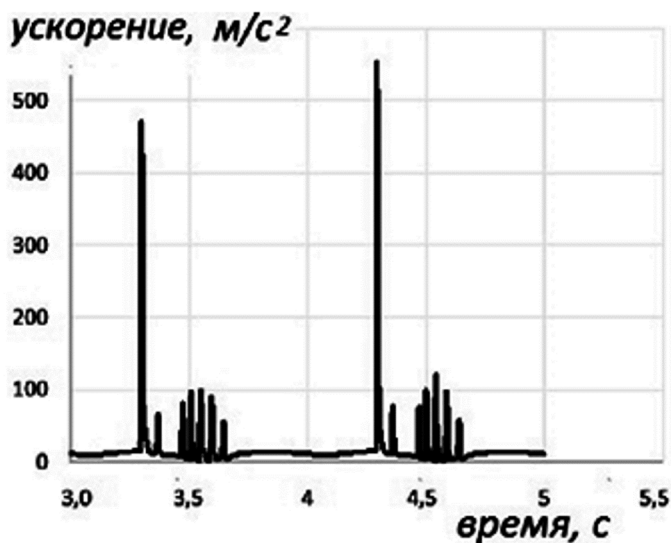


Рисунок 9 – Ускорение в срединной точке вала во времени



На рисунке 9 приведены результаты вычисления ускорения с плотностью вывода 0,0007 с. На рисунках 10–11 показаны реакции в опорах при движении вала на резонансном режиме.

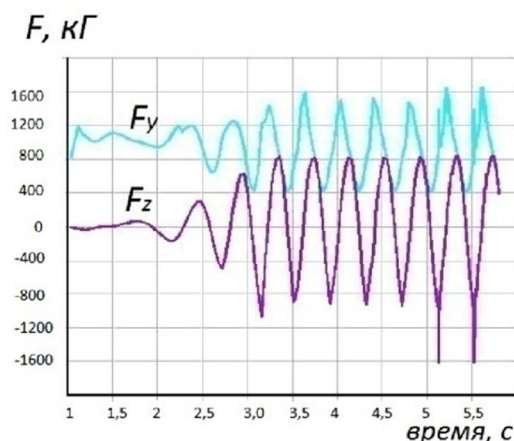


Рисунок 10 – Реакция в левой опоре в проекциях на оси y и z

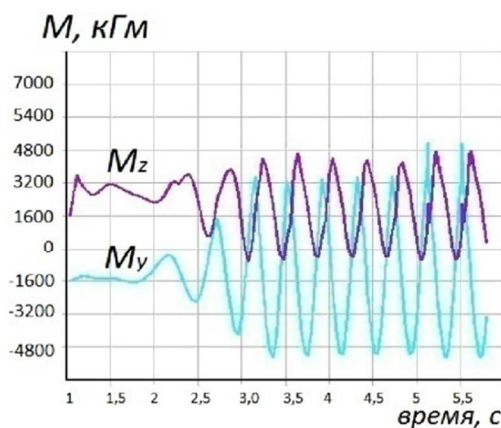


Рисунок 11 – Изгибающий момент в левой опоре в проекциях на оси y и z

Заключение

Проведено исследование взаимодействия вращающегося тяжелого составного горизонтального вала, закрепленного в цилиндрических подшипниках, с цилиндрическим отбойником. Рассматриваемая задача является математической моделью испытательного стенда, предназначенного для изучения ударного взаимодействия секции бурильного инструмента со стенками скважины. Показано, что периодически устойчивые удары бурильного инструмента об отбойник реализуются, в частности, на первой резонансной частоте. Выявлены режимы движения рассматриваемого вала при монотонно возрастающей скорости вращения. Обнаружено существование критической скорости вращения вала, при которой его движение с прямой прецессией меняется на неустойчивое движение с обратной прецессией. Сформулирован критерий определения критической скорости. Предложен способ управления амплитудой изгибных колебаний испытываемого образца бурильного инструмента.

Результаты, полученные в работе, найдут применение при проектировании испытательных стендов и изучении взаимодействия КНБК со стенками скважины при горизонтальном бурении.

Литература:

1. Состояние и перспективы горизонтального бурения в России / В.В. Кульчицкий [и др.] // Бурение и нефть. – 2020. – № 10. – С. 12–20. – URL : <https://burneft.ru/archive/issues/2020-10/11> (Дата последнего просмотра 27.13.2021)
2. Балочная модель роторно управляемой системы с электродвигателем / Н.Д. Деркач [и др.] // Булатовские чтения. Материалы IV международной научно-практической конференции: Технические и технологические разработки. Электрооборудование в нефтегазовой отрасли. – 2020. – Т. 6. – С. 92–102. – URL : <http://id-yug.com/images/id-yug/Bulatov/2020/6/PDF/2020-6.pdf>

References:

1. State and prospects of horizontal drilling in Russia / V.V. Kulchitskiy [et al.] // Drilling and Oil. – 2020. – № 10. – P. 12–20. – URL : <https://burneft.ru/archive/issues/2020-10/11> (Date of last viewing 27.13.2021)
2. Beam model of a rotary steerable system with electric motor / N.D. Derkach [et al.] // Bulatov readings. Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference: Technical and technological developments. Electrical equipment in oil and gas industry. – 2020. – VOL. 6. – P. 92–102. – URL : <http://id-yug.com/images/id-yug/Bulatov/2020/6/PDF/2020-6.pdf>