

ҚАЗАҚСТАН  
ЖОЛ  
ҒЫЛЫМИ-ЗЕРТТЕУ  
ИНСТИТУТЫ



КАЗАХСТАНСКИЙ  
ДОРОЖНЫЙ НАУЧНО-  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ

**ҚазжолҒЗИ  
ЖАРШЫСЫ**

---

---

**ВЕСТНИК  
КаздорНИИ**

**№ 1-2 (53-54) 2017**

*Арнайы шығарылым*

*Специальный выпуск*

*Ғылыми-практикалық журнал*

*Научно-практический журнал*



*Қайым Т.Т., Грибанов В.Ф., Темирбеков Е.С., Каимов С.Т., Каимов Аб.Т.* Метод определения параметров инновационного схвата манипулятора робота при перегрузке им высокорadioактивного тепловыделяющегося элемента из одного контейнера в другой .....

*Искаков Ж., Бисембаев К., Джамалов Н.* Колебания ортогонального механизма вибрационного стола с учетом трения.....

*Джамалов Н.К.* Программный комплекс автоматизированного анализа и синтеза параллельных рычажных механизмов.....

*Кудайбергенов Аскар К.* Анализ устойчивости и резонансных режимов движения бурильных колонн.....

*Кудайбергенов Аскар К.* О нелинейных математических моделях колебаний бурильных колонн с учетом внешних воздействий.....

## Транспорт и сооружения

*Айтматов И.Т.* Актуальные проблемы горных дорог в Кыргызстане: причины и пути решения.....

*Рашидов Т.Р., Бекмирзаев Д.А.* Сейсmodинамика подземных трубопроводов при нелинейном взаимодействии в системе «Труба–Грунт».....

*Жантаев Ж.Ш., Бибосинов А.Ж., Калдыбаев А.А., Нуракинов С.М., Шарипова Г.* Трехмерное моделирование распределения вертикальных смещений зданий с использованием данных радарной интерферометрии.....

*Rongji Cao, Wei Liu.* Study on long-term performance of asphalt pavement test sections in Jiangsu.....

*Уразбеков А.К., Ахмедов Д.Ш.* Цифровая железная дорога: создания интеллектуальной системы управления железнодорожным транспортом.....

*Баймахан Р.Б.* Влияние водонасыщенности грунта на деформацию крена зданий.....

*Шигаев Д.Т., Нуракинов С.М., Калдыбаев А.А., Бибосинов А.Ж., Искаков Б.А.* Оценка состояния Шардаринского гидрокомплекса методом георадарного профилирования.....

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

В настоящем специальном выпуске журнала «Вестник Казахстанского дорожного научно-исследовательского института» включены материалы Международного научного семинара «Актуальные проблемы инженерной механики», посвященного 95-летию академика АН КазССР, доктора технических наук, профессора, Заслуженного деятеля науки Казахстана **Жакана Сулейменовича Ержанова**.

Материалы Семинара содержат расширенную статью о жизни и научной деятельности академика Ж.С. Ержанова, научные работы его учеников, последователей и специалистов, занимающихся вопросами фундаментальной и прикладной механики.

Материалы Семинара по их содержанию разделены на следующие три направления: «Механика», «Машиноведение», «Транспорт и сооружения» и включены в программу Семинара для презентации и обсуждения.

### **Редакционная коллегия:**

#### ***Председатели:***

*Телтаев Б.Б., д.т.н., профессор, академик НИА РК,  
президент АО «КаздорНИИ»*

*Тулешов А.К., д.т.н., профессор, академик МИА и НИА РК,  
генеральный директор ИММаш*

#### ***Члены:***

*Искакбаев А.И., д.ф-м.н., профессор, АО «КаздорНИИ»*

*Мадалиев Т. Б., к.ф-м.н., ИММаш*

*Ногайбаева М. О., главный ученый секретарь ИММаш*

*Суплес Е.А., ученый секретарь АО «КаздорНИИ»*

*Амиржанова Л.Н., Пресс-секретарь АО «КаздорНИИ»*

*Богатова Е.А., инженер АО «КаздорНИИ»*



УДК 539.3:622.24

*Кудайбергенов Асхат К. - PhD докторант, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Институт механики и машиноведения им. акад. У.А. Джолдасбекова, e-mail: askhatkud92@gmail.com*

## АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ И РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ БУРИЛЬНЫХ КОЛОНН

**Тақырып:** Бұрғылау колонналары қозғалысының орнықтылығын мен резонанстық режимдерін талдау.

**Түйін:** Бұл мақалада білікке түсетін айнымалы жүк-салмақтың әрекеті, колоннаның бастапқы қисықтығы және сұйық ағынын (бұрғылау ерітіндісі) ескере отырып бұрғылау колоннасы қозғалысының резонанстық режимдерін моделдеу өткізіледі. Негізгі резонанстың амплитудалық жиілік сипаттамалары табылады мен бұрғылау колонналары қозғалысы орнықтылық аймақтары шекараларының анықталады. Резонанстық қисықтарға және орнықтылық аймақтарына жүйе параметрлері мен жүктеме шамаларының әсерін талдауы жүргізіледі.

**Түйін сөздер** бұрғылау колонна, сызықсыз үлгі, резонанстық қисықтар, орнықтылық.

**Тема:** Анализ устойчивости и резонансных режимов движения бурильных колонн.

**Аннотация:** В статье моделируются резонансные режимы движения бурильной колонны с учетом влияния переменной сжимающей нагрузки, начальной кривизны колонны и потока жидкости (буровой раствор). Находятся амплитудно-частотные характеристики основного резонанса и определяются границы зон неустойчивости движения бурильной колонны с последующим проведением анализа влияния основных параметров системы и величин нагрузок на резонансные кривые и области неустойчивости.

**Ключевые слова:** бурильная колонна, нелинейная модель, резонансные кривые, устойчивость.

**Topic:** Analysis of stability and resonance regimes of drill string motion.

**Abstract:** In the paper resonance regimes of drill string motion taking into account a variable compressive load, initial curvature of the drill string and liquid flow (drilling mud) are modeled. Amplitude-frequency characteristics of the basic resonance and boundaries of instability zones of the drill string motion are determined. Analysis of the effect of the main system parameters and loading magnitudes on the zones of instability and resonance curves is carried out.

**Keywords:** drill string, nonlinear model, resonance curves, stability.

Динамические системы с жесткими и/или мягкими характеристиками, осложненные нелинейным воздействием факторов окружающей среды, широко используются при моделировании движения различных элементов конструкций, машин и механизмов. В большинстве случаев задачи анализа динамической устойчивости механических систем и моделирования резонансных режимов их нелинейных колебаний сводятся к определению искомым функций  $u_{ij}$ ,  $\varepsilon_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$ ,



удовлетворяющих заданным граничным условиям и минимизирующих некоторый функционал  $\Phi(u_{ij}, \varepsilon_{ij}, \sigma_{ij})$  [1]. Среди вариационных методов решения подобного класса задач широкое применение получили методы Бубнова-Галеркина [2], Рэлея-Ритца [3], метод конечных элементов [4] и др.

Одной из наиболее важных и сложных проблем нефтегазодобывающей отрасли является исследование резонансных режимов и устойчивости движения бурильных колонн при неглубинном бурении нефтяных и газовых скважин. Для предупреждения интенсивных вибраций буровых штанг необходимо рекомендовать такие сочетания внешней нагрузки, скорости вращения штанги и плотности бурового раствора, при которых не будут возникать резонансные режимы колебаний [5].

**Нелинейная математическая модель**

Рассмотрим нелинейную математическую модель поперечных колебаний буровой штанги с учетом влияния внешней сжимающей нагрузки  $N(z, t)$  и начальной кривизны  $v_0$  [6]. Промывочную жидкость, движущуюся внутри бурильной колонны, будем моделировать в виде присоединенной массы [7]. Тогда математическая модель нелинейных колебаний колонны в потоке жидкости примет вид:

$$\begin{aligned}
 & (\rho A + \rho_l A_l) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + EI_x \frac{\partial^4 v}{\partial z^4} - \rho I_x \frac{\partial^4 v}{\partial z^2 \partial t^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( N(z, t) \frac{\partial (v + v_0)}{\partial z} \right) - \\
 & - \frac{EA}{1 - \nu} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^3 - (\rho A + \rho_l A_l) \omega^2 v = 0.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $\rho, \rho_l$  - плотности материала штанги и промывочной жидкости,  $E$  - модуль Юнга,  $I_x$  - осевой момент инерции поперечного сечения штанги,  $A, A_l$  - площади поперечных сечений штанги и ее внутреннего канала,  $\nu$  - коэффициент Пуассона,  $\omega$  - угловая скорость вращения штанги.

Граничные условия представляют собой шарнирное закрепление колонны по концам:

$$v(z, t) = 0, \quad EI_x \frac{\partial^2 v(z, t)}{\partial z^2} = 0 \quad (z = 0, z = l).
 \tag{2}$$

Внешняя нагрузка  $N(z, t)$  задается в виде периодической функции, сложенной из постоянной  $N_0$  и переменной  $N_t$  во времени составляющих:

$$N = N_0 + N_t \cos \Omega t.$$

Применение метода Бубнова-Галеркина, когда начальная кривизна оси буровой штанги  $v_0$  аппроксимируется синусоидальной функцией, а поперечное перемещение  $v(z, t)$  сечения колонны конечным рядом синусоидальных функций вида



$$v(z, t) = \sum_{i=1}^n f_i(t) \sin\left(\frac{i\pi z}{l}\right), \quad (3)$$

с учетом введения безразмерного времени  $\tau$  [6] дает следующее нелинейное обыкновенное дифференциальное уравнение относительно функции  $f(\tau)$ :

$$\frac{d^2 f}{d\tau^2} + (1 + \beta \cos \Omega \tau) f + \alpha f^3 = F_0 + F_1 \cos \Omega \tau \quad (4)$$

где

$$\beta = \frac{a_3}{a_2}, \quad \alpha = \frac{a_4}{a_2}, \quad F_0 = \frac{d_1}{a_2}, \quad F_1 = \frac{d_2}{a_2}, \quad \Omega = \frac{\bar{\Omega}}{\Omega_0}, \quad \Omega_0 = \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}, \quad (5)$$

$$a_1 = \frac{1}{2l} (\rho A l^2 + \rho_l A_l l^2 + \rho I_x \pi^2),$$

$$a_2 = \frac{1}{2l^3} [EI_x \pi^4 - N_0 \pi^2 l^2 - (\rho A + \rho_l A_l) \omega^2 l^4], \quad (6)$$

$$a_3 = -\frac{N_l \pi^2}{2l}, \quad a_4 = \frac{3EA\pi^4}{8l^3(1-\nu)}, \quad d_1 = f_0 \frac{N_0 \pi^2}{2l}, \quad d_2 = f_0 \frac{N_l \pi^2}{2l}.$$

При выводе уравнения возмущенного состояния (4) был удержан первый член в разложении (3) и опущен индекс у функции  $f(\tau)$ .

**Моделирование резонансных режимов движения бурильной колонны**

Как известно, резонанс в рассматриваемой системе возникает при совпадении частот внешних воздействий с собственными частотами колебаний бурильной колонны в результате действия осевой сжимающей нагрузки и нелинейных факторов окружающей среды, что сопровождается резким возрастанием амплитуды вынужденных колебаний на резонансной частоте. На частотные характеристики системы существенное влияние также оказывают начальные искривления бурильной колонны, которые при моделировании могут быть аппроксимированы рядом гладких функций [8].

При моделировании резонансных явлений бурильной колонны в потоке жидкости ограничимся случаем основного резонанса:

$$f(\tau) = r_0 + r_1 \cos(\Omega \tau - \varphi_1) \quad (7)$$

Применяя метод гармонического баланса, получены следующие уравнения относительно неизвестных амплитуд  $r_0, r_1$  и фазы  $\varphi_1$ :



$$\begin{aligned}
 r_0 + \frac{\beta r_1}{2} \cos \varphi_1 + \alpha r_0 \left( r_0^2 + \frac{3}{2} r_1^2 \right) &= F_0, \\
 r_1 \left[ -\Omega^2 + 1 + 3\alpha \left( r_0^2 + \frac{r_1^2}{4} \right) \right] \cos \varphi_1 + \beta r_0 &= F_1, \\
 r_1 \left[ -\Omega^2 + 1 + 3\alpha \left( r_0^2 + \frac{r_1^2}{4} \right) \right] \sin \varphi_1 &= 0.
 \end{aligned} \tag{8}$$

и соответствующие амплитудно-частотные характеристики, которые позволяют определить критическую частоту колебаний на резонансных кривых:

$$\begin{aligned}
 r_1^2 \left( \lambda(r_0, r_1) - \Omega^2 \right)^2 &= (F_1 - \beta r_0)^2, \\
 \frac{\beta r_1^2}{2(F_1 - \beta r_0)} \left( \lambda(r_0, r_1) - \Omega^2 \right) + r_0 \left( \lambda(r_0, r_1) - \alpha \left( 2r_0^2 - \frac{3r_1^2}{4} \right) \right) &= F_0,
 \end{aligned} \tag{9}$$

где

$$\lambda(r_0, r_1) = 1 + 3\alpha \left( r_0^2 + \frac{r_1^2}{4} \right). \tag{10}$$

#### Устойчивость движения бурильной колонны

При анализе устойчивости нелинейной динамики бурильной колонны в потоке жидкости задается малое возмущение  $\delta f$ , и временная функция  $f(\tau)$  заменяется на величину  $\overline{f_0} + \delta f$ , где под  $\overline{f_0}(\tau)$  понимается периодическое решение уравнения (4).

В результате, пренебрегая степенями  $\delta f$  выше первой и смешанными производными величин  $\delta f$  и  $\overline{f_0}$ , для случая основного резонанса (7) приходим к следующему разрешающему уравнению в вариациях типа Хилла:

$$\frac{d^2 \delta f}{d\tau^2} + (\theta_0 + \theta_{1c} \cos \Omega \tau + \theta_{2s} \sin 2\Omega \tau + \theta_{2c} \cos 2\Omega \tau) \delta f = 0, \tag{11}$$

где

$$\theta_0 = 1 + \frac{3}{2} \alpha r_1^2, \quad \theta_{1c} = \beta, \quad \theta_{2s} = \frac{3}{2} \alpha r_1^2 \sin 2\varphi_1, \quad \theta_{2c} = \frac{3}{2} \alpha r_1^2 \cos 2\varphi_1. \tag{12}$$

Задавая малую вариацию как  $\delta f = e^{n\tau} a_1 \cos(\Omega \tau - \psi_1)$ , находится первая область неустойчивости резонансных кривых. Подстановка последнего в (11) и дальнейшее применение метода гармонического баланса дает уравнение в вариациях, определяющее границы первой области неустойчивости. Для уточнения первой зоны неустойчивости выражение для малого возмущения  $\delta f$

задается в виде  $\delta f = e^{n\tau} (a_1 \cos(\Omega\tau - \psi_1) + a_3 \cos(3\Omega\tau - \psi_3))$ , что позволяет получить уравнение, определяющее границы уточненной первой зоны неустойчивости основного резонанса.

#### Численный анализ и обсуждения

Численный анализ основного резонанса исследуемой системы (4) проводится при следующих значениях параметров системы:  $D = 0,18$  м (внешний диаметр бурильной колонны),  $d = 0,12$  м (внутренний диаметр),  $l = 100$  м,  $E = 2,1 \times 10^5$  МПа,  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu = 0,28$ ,  $\omega = 1,05$  рад/с, начальная кривизна  $f_0 = 0,01$  м.

На рисунках 1а, 1б получены графики резонансных кривых, на рисунках 2а, 2б – зоны неустойчивости основного резонанса для различных значений плотности бурового раствора. Сравнение первых зон неустойчивости без учета и с учетом третьей моды дается на рисунке 3.

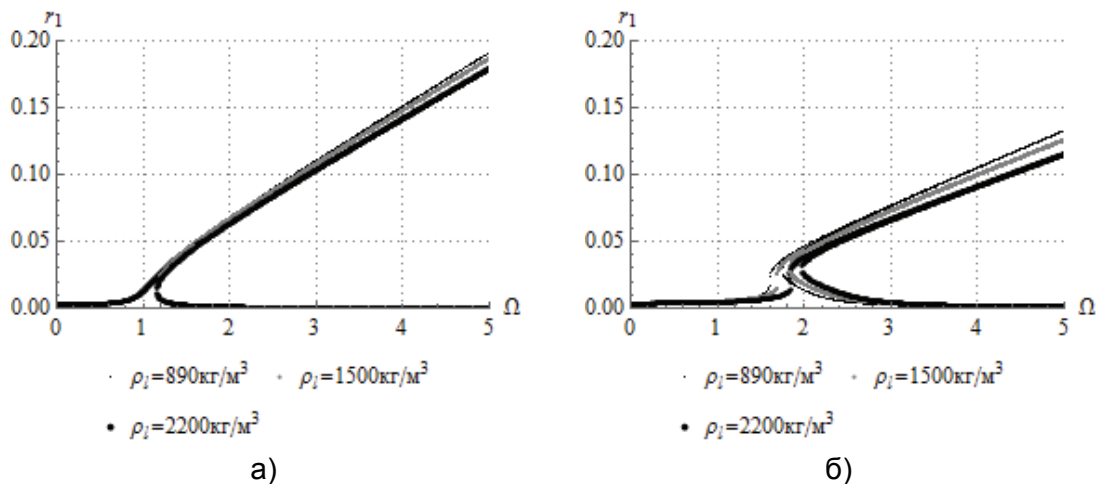


Рисунок 1. Влияние плотности промывочной жидкости на резонансные кривые поперечных колебаний бурильной колонны при  
а)  $N_0 = 1,7$  кН, б)  $N_0 = 3,5$  кН

Как видно из рисунка 1а, увеличение плотности бурового раствора приводит к появлению резонанса при меньших амплитудах колебаний. При этом его влияние на «затягивание» и сдвиг резонансных кривых оказывается незначительным. Увеличение величины постоянной составляющей продольной сжимающей нагрузки до  $N_0 = 3,5$  кН приводит к более сильному расхождению резонансных кривых (Рис. 1б).



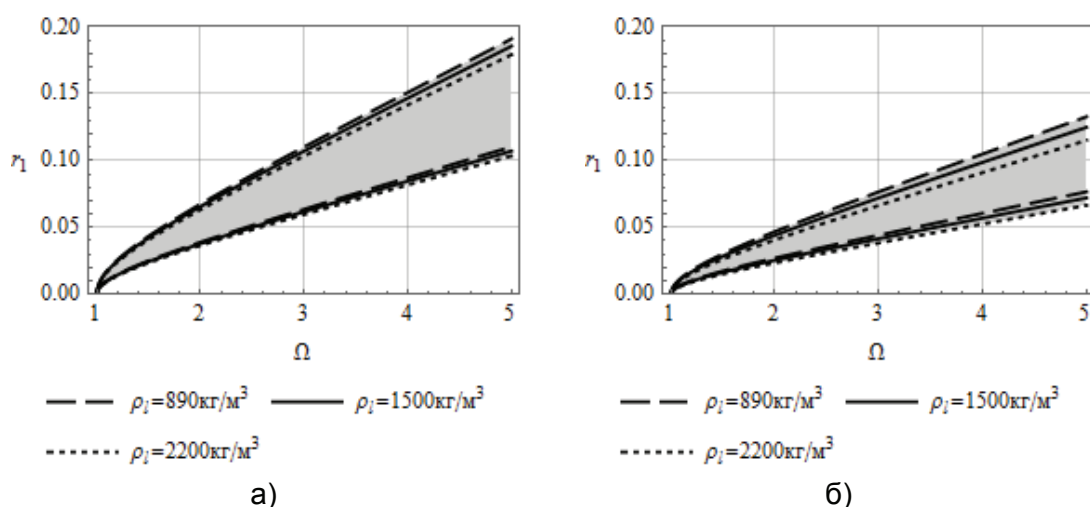


Рисунок 2. Первая область неустойчивости основного резонанса при различных значениях плотности промывочной жидкости при а)  $N_0 = 1,7$  кН, б)  $N_0 = 3,5$  кН

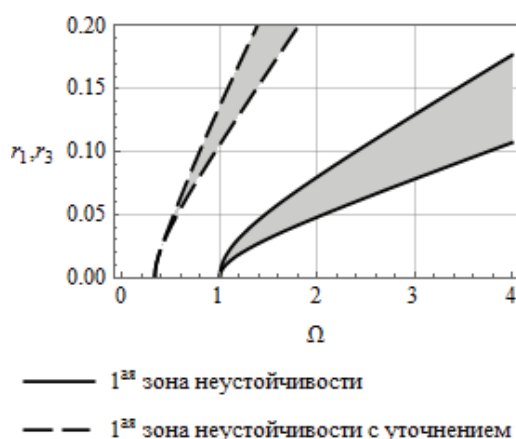


Рисунок 3. Сравнение первых зон неустойчивости основного резонанса буровой колонны при  $D = 0,2$  м,  $N_0 = 1,7$  кН

Из рисунков 2а, 2б следует, что при изменении плотности бурового раствора  $\rho_l$  происходит наложение зон неустойчивости друг на друга, что подтверждает результаты, полученные при моделировании резонансных режимов движения буровой колонны.

Первая зона неустойчивости, построенная с учетом первой и третьей форм колебаний, позволяет уточнить решение задачи динамической устойчивости буровых колонн и определить те частоты, при которых система теряет устойчивость. Потеря устойчивости буровой колонны, в свою очередь, может привести в итоге к полному выходу из строя бурового оборудования, поломке самой колонны, обрушению стенок ствола скважины и многим другим неблагоприятным явлениям, которые сопутствуют непосредственному процессу бурения нефтяных и газовых скважин.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Зубчанинов В.Г. Основы теории упругости и пластичности: Учеб. для машиностроит. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1990. – 368 с.
2. Vaz M.A., Patel M.H. Analysis of drill strings in vertical and deviated holes using the Galerkin technique // Engineering Structures. – 1995. – Vol. 17, No. 6. – P. 437-442.
3. Lewandowsky R. Application of the Ritz method to the analysis of non-linear free vibrations of beams // Journal of Sound and Vibration. – 1987. – Vol. 114. – P. 91-101.
4. Germaу C., Denoel V., Detournay E. Multiple mode analysis of the self-excited vibrations of rotary drilling systems // Journal of Sound and Vibration – 2009. – Vol. 325. – P. 362-381.
5. Григулецкий В.Г. Оптимальное управление при бурении скважин. – М.: Недра, 1988. – 229 с.
6. Kudaibergenov Askat K., Kudaibergenov Askar K., Khajiyeva L.A. Modelling of resonance and stability of drill string nonlinear dynamics // Int. Journal of Mechanics. – 2007. – Vol. 11. – P. 92-100.
7. Гуляев В.И., Луговой П.З., Борщ Е.И. Самовозбуждение колебаний долота бурильной колонны // Прикл. Механика. – 2013. - Т. 49, № 3. - С. 114-124.
8. Sergaliyev A.S., Khajiyeva L.A. Flat flexural vibration of drill-string with an initial curvature // Advances in Mechanism Design II. – 2017. – Vol. 44. – P. 231-237.

**LITERATURA**

1. Zubchaninov V.G. Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti: Ucheb. dlya mashinostroit. spec. vuzov. – М.: Vyssh. shk., 1990. – 368 s.
2. Vaz M.A., Patel M.H. Analysis of drill strings in vertical and deviated holes using the Galerkin technique // Engineering Structures. – 1995. – Vol. 17, No. 6. – P. 437-442.
3. Lewandowsky R. Application of the Ritz method to the analysis of non-linear free vibrations of beams // Journal of Sound and Vibration. – 1987. – Vol. 114. – P. 91 101.
4. Germaу C., Denoel V., Detournay E. Multiple mode analysis of the self-excited vibrations of rotary drilling systems // Journal of Sound and Vibration – 2009. – Vol. 325. – P. 362-381.
5. Griguleckij V.G. Optimal'noe upravlenie pri bureнии skvazhin. – М.: Nedra, 1988. – 229 s.
6. Kudaibergenov Askat K., Kudaibergenov Askar K., Khajiyeva L.A. Modelling of resonance and stability of drill string nonlinear dynamics // Int. Journal of Mechanics. – 2007. – Vol. 11. – P. 92-100.
7. Gulyaev V.I., Lugovoj P.Z., Borshch E.I. Samovozbuzhdenie kolebanij dolota buril'noj kolonny // Prikl. Mekhanika. – 2013. - Т. 49, № 3. - S. 114-124.
8. Sergaliyev A.S., Khajiyeva L.A. Flat flexural vibration of drill-string with an initial curvature // Advances in Mechanism Design II. – 2017. – Vol. 44. – P. 231-237.

