

Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, № 6. С. 51-57. ISSN 2073-0128 (print)

Petroleum Engineering. 2023. Vol. 21. No. 6. P. 51-57. ISSN 2073-0128 (print)

Научная статья

УДК 622.24.053

DOI: 10.17122/ngdelo-2023-6-51-57

РАСЧЕТ УГЛА ИЗГИБА БУРИЛЬНОГО ЗАМКА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Никита Вадимович Дурыманов, Петр Александрович Гаранин

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

Автор, ответственный за переписку

Петр Александрович Гаранин, ninarag@yandex.ru

Аннотация. Из проведенного многолетнего анализа аварийности бурильных колонн выявлено, что основной фактор отказов и чрезвычайных ситуаций связан с недостаточной устойчивостью соединительных элементов при циклических нагрузках. Этот вывод подчеркивает критическое значение прочности и надежности соединений в рамках процесса бурения.

Процесс бурения, предполагающий постоянное воздействие циклических нагрузок, оказывает значительное воздействие на структуру бурильных труб и соединений между ними. Циклические нагрузки, сопровождающиеся переменными нагрузками и моментами, могут вызывать появление критических дефектов в материалах и элементах бурильной колонны.

Для получения более глубокого понимания напряженного состояния замкового соединения бурильных труб было осуществлено исследование, в рамках которого применялся метод конечных элементов (МКЭ). Этот метод базируется на детализированном разбиении объекта на конечные элементы, каждый из которых представляет собой определенный участок объекта с четко определенными граничными условиями. После разбиения и установки граничных условий, МКЭ позволяет вычислить распределение напряжений и деформаций внутри объекта, предоставляя обширную информацию о его напряженном состоянии, включая данные о деформациях и направлениях главных напряжений.

Точная модель замкового соединения была создана и подвергнута экспериментам с применением метода конечных элементов (МКЭ). Этот подход позволяет детально рассмотреть поведение соединительных элементов в условиях циклических нагрузок и исследовать их устойчивость в различных рабочих сценариях. В процессе экспериментов был рассчитан угол изгиба трубы с учетом целевой долговечности. Данный параметр очень важен, поскольку долговечность бурильных труб напрямую влияет на их работоспособность и безопасность в условиях бурения. Полученные результаты могут быть использованы для снижения рисков аварий в процессе бурения, оптимизации конструкции бурильных труб и повышения безопасности в нефтегазовой промышленности.

Для цитирования

Дурыманов Н.В., Гаранин П.А. Расчет угла изгиба бурильного замка с применением метода конечных элементов // Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, № 6. С. 51-57. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-6-51-57>.

Ключевые слова

бурильная колонна; изгиб бурильной трубы; циклические нагрузки; резьбовое соединение; напряженно-деформированное состояние; метод конечных элементов; расчет угла изгиба; компьютерное моделирование

Original article

CALCULATION OF THE BENDING ANGLE OF THE DRILLING LOCK USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Nikita V. Durymanov, Petr A. Garanin

Samara state technical university, Samara, Russia

Corresponding author

Petr A. Garanin, ninarag@yandex.ru

Abstract. From a long-term analysis of drill string accidents, it was found that the main factor of failures and emergencies is associated with insufficient stability of connecting elements under cyclic loads. This finding highlights the critical importance of the strength and reliability of the joints during the drilling process.

The drilling process, which involves constant exposure to cyclic loads, has a significant impact on the structure of the drill pipe and the connections between them. Cyclic loads accompanied by variable loads and moments can cause critical defects in drill string materials and components.

A finite element method (FEM) study was conducted to gain a deeper understanding of the tightness of the drill pipe joint. This method is based on a detailed breakdown of the object into finite elements, each of which is a specific portion of the object with well-defined boundary conditions. After splitting and setting boundary conditions, FEA allows you to calculate the distribution of stresses and strains within an object, providing extensive information about its stress state, including data on strains and directions of main stresses.

An accurate model of the lock compound was created and subjected to experiments using the finite element method (FEM). This approach allows you to examine in detail the behavior of connecting elements under cyclic load conditions and investigate their stability in various operating scenarios. During the experiments, the bending angle of the pipe was calculated taking into account the target durability. This parameter is very important, since the durability of the drill pipe directly affects their operability and safety under drilling conditions. The obtained results can be used to reduce the risks of accidents during drilling, optimize the design of drill pipes and improve safety in the oil and gas industry.

For citation

Durymanov N.V., Garanin P.A. Raschet ugla izgiba buril'nogo zamka s primeneniem metoda konechnykh elementov // [Calculation of the bending angle of the drilling lock using the finite element method] // *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2023, Vol. 21, No. 6. pp. 51-57. [in Russian]. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-6-51-57>.

Введение

Из анализа инцидентов, проведенного в течение многих лет, видно, что 60 % всех случаев аварий связаны с ограниченной циклической стойкостью резьбовых соединительных элементов бурильной колонны [1].

Извилистая траектория скважины представляет собой важный момент в бурении, который оказывает существенное влияние на технические аспекты процесса. Эта особенность скважины характеризуется криволинейным направлением ее оси в пространстве в результате проведения горизонтального или наклонного бурения. Извилистая траектория

часто используется с целью достижения определенных целей, таких как увеличение добычи углеводородов из сложных геологических образований [2]. Это позволяет бурить скважины вдоль пластов или обходить геологические препятствия, что позволяет повысить эффективность добычи.

Однако, извилистая траектория также вносит дополнительные технические вызовы: подобная траектория может дополнительно увеличить риск излома бурильных труб, что представляет собой потенциально серьезные последствия для процесса бурения и безопасности на месте работы. Изгиб бурильных труб

Keywords

drill string; bending of the drill pipe; cyclic loads; threaded connection; stressed-deformed state; finite element method; calculation of bending angle; computer simulations

в условиях извилистой траектории может вызвать усталость материала и, в конечном итоге, привести к их разрыву [3].

Такие инциденты не только приводят к необходимости замены поврежденных труб, что влечет за собой дополнительные затраты и временные задержки в процессе бурения, но и могут повлечь за собой потерю контроля над скважиной.

Метод конечных элементов (МКЭ) — это численный метод решения дифференциальных уравнений, который широко используется для анализа и моделирования различных физических явлений, таких как теплопроводность, механика деформируемых тел, электромагнетизм и другие [4].

Основная идея метода заключается в том, чтобы разбить сложную геометрию объекта или системы на более простые подобласти, называемые конечными элементами. Каждый конечный элемент представляет собой небольшой участок структуры, для которого можно легко записать и решить уравнения состояния. Затем, объединяя результаты для всех элементов, получается приближенное решение для всей системы [5–6].

В данном исследовании метод конечных элементов будет использоваться для расчета угла изгиба трубы, ориентированного на достижение определенного уровня целевой долговечности.

В начале исследования была разработана подробная модель бурильного замка. Конфигурация замковых соединений бурильных труб может изменяться в соответствии с

требованиями конкретной системы. На данный момент наиболее широко применяются конические резьбы, такие как те, которые предоставляют American Petroleum Institute (API) и соответствуют ГОСТ 633-80 «Резьбы конические цилиндрические. Допуски и контроль», обеспечивающие высокую прочность и способные выдерживать значительные нагрузки. Материалы, используемые при изготовлении резьбовых соединений бурильных труб, должны обладать высокой прочностью и стойкостью к коррозии, чтобы гарантировать долгий срок службы системы [7–10]. В связи с этим наиболее распространены сплавы на основе углерода и хрома, такие как 40Х, 40ХН, 38ХМЮА и другие. В качестве объекта исследования был выбран замок типа 3Н.

В качестве материала был выбран сплав 40Х. Прочностные характеристики представлены в таблице 1.

После проведения моделирования и определения материала была создана сетка, разбивающая модель на отдельные элементы. В результате формирования сетки было получено 776270 узлов и 209448 элементов. На рисунке 2 приведена конечно-элементная сетка.

Модель была анализирована в условиях симметрии. На рисунке 3 представлены граничные условия, которые были учтены при проведении исследования. Эти условия играют ключевую роль в определении взаимодействия модели с внешней средой и ограничивают свободу движения структурных элементов. Их правильное определение и учет в

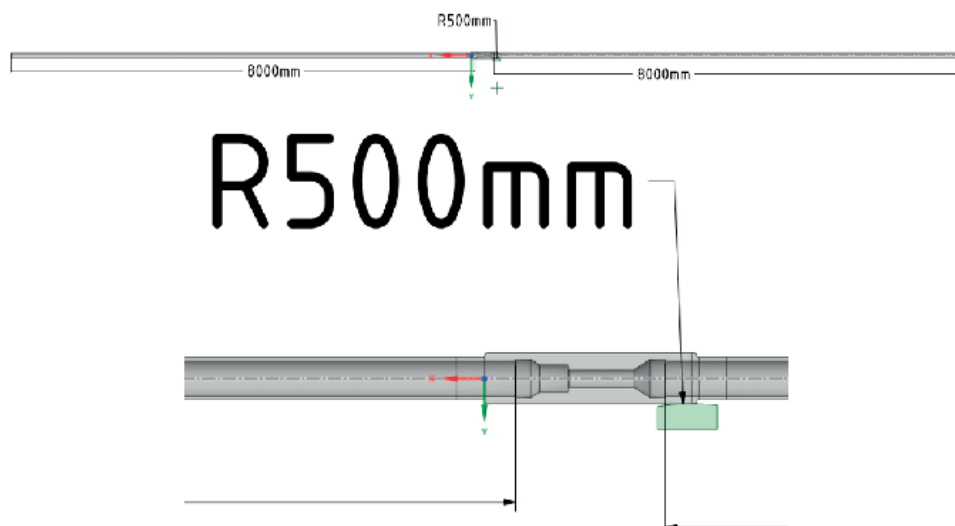


Рисунок 1. Геометрия объекта анализа

Figure 1. Geometry of the analysis object

Таблица 1. Прочностные характеристики стали

Table 1. Strength characteristics of steel

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	$2,14 \times 10^{11}$	Н/м ²
Коэффициент Пуассона	0,3	
Модуль сдвига	$8,5 \cdot 10^{10}$	Н/м ²
Массовая плотность	7820	кг/м ³
Предел прочности при растяжении	$9,4 \cdot 10^8$	Н/м ²
Предел текучести	$8 \cdot 10^8$	Н/м ²

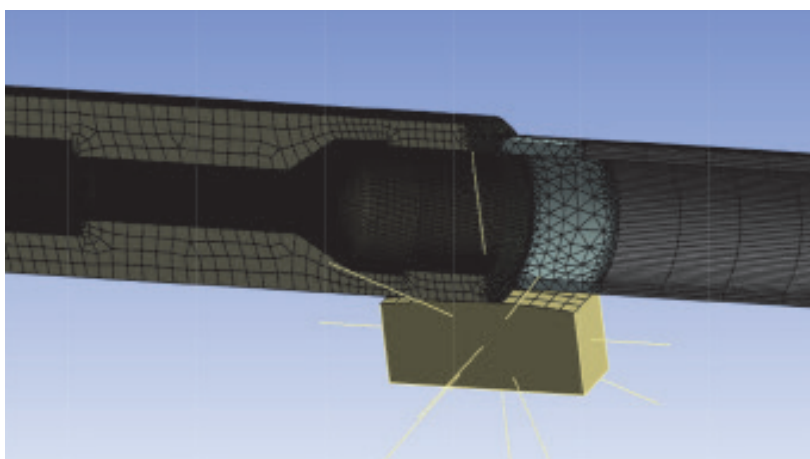


Рисунок 2. Конечно-элементная сетка

Figure 2. Finite-element grid

анализе способствуют достоверному моделированию реальных условий и поведения системы в различных сценариях нагрузки и воздействия.

Целевая долговечность составляет 450 часов, что в циклах равно 3,25 млн симметричных циклов изгиба. Согласно кривой усталости (рисунок 4), ориентировочная амплитуда напряжений составляет 680 МПа.

Исходя из этой информации, определяем перемещение радиусного сегмента, при котором достигается оптимальное значение полусуммы первых и третьих главных напряжений. На рисунке 5 представлена визуализация

напряжений для данного момента, что позволяет оценить распределение напряжений и выделить те области, где они могут достигать критических значений.

На рисунке 6 расчетный ресурс при симметричном изгибе трубы.

На рисунке 7 приведено деформированное состояние трубы, при котором возникают приведенные на рисунке 5 напряжения и угол изгиба колонны. При достижении данного угла изгиба возможно возникновение деформации металла, что влечет за собой потенциальный риск аварий.

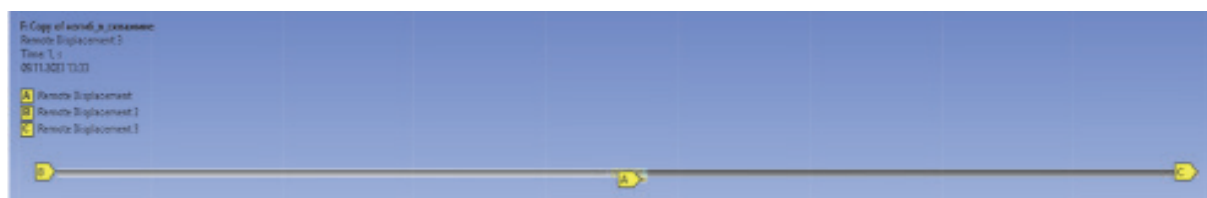


Рисунок 3. Граничные условия (А — перемещение радиусного сегмента для изгиба трубы, В — шарнирно-подвижная опора, С — шарнирно-неподвижная опора)

Figure 3. Boundary conditions (A — moving the radius segment for bending the pipe, B — hinged-movable support, C — hinged-fixed support)

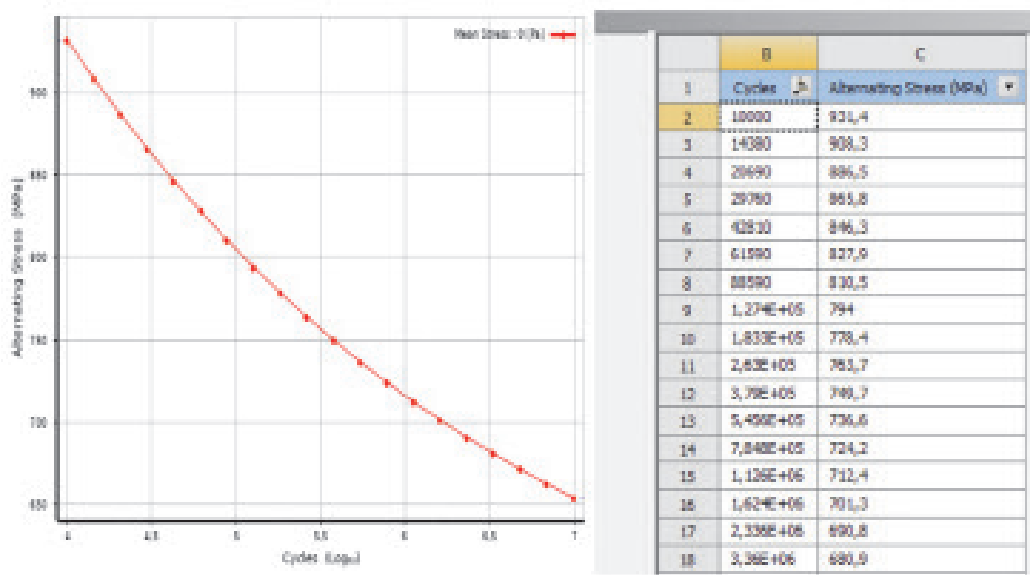


Рисунок 4. Характеристики усталости материала трубы

Figure 4. Pipe material fatigue characteristics

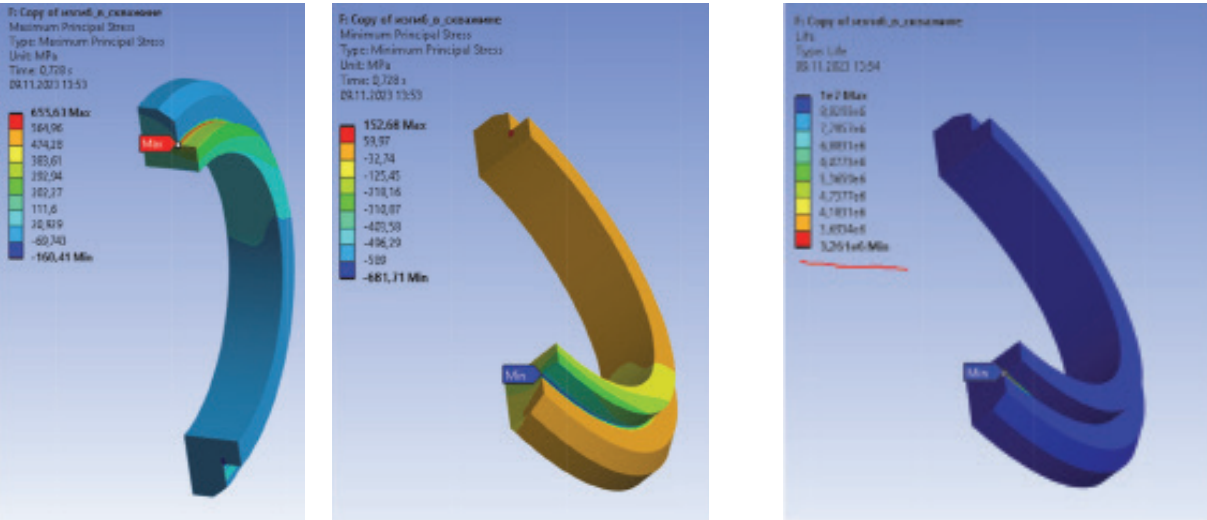


Рисунок 5. Первые и третьи главные напряжения

Figure 5. First and third main stresses

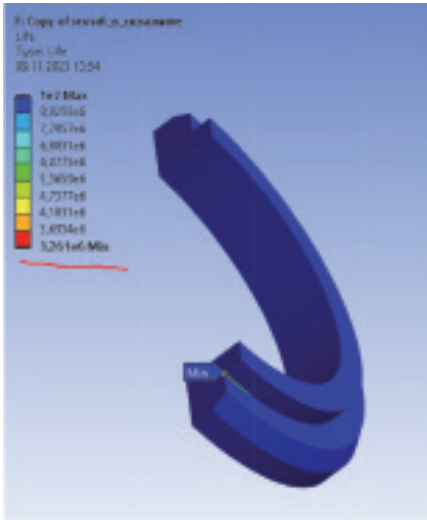


Рисунок 6. Расчетный ресурс трубы

Figure 6. Design pipe life

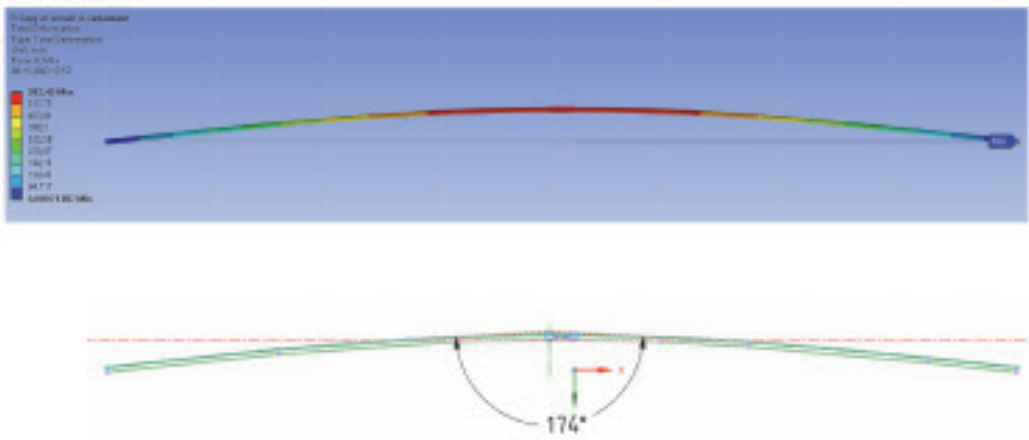


Рисунок 7. Деформированное состояние буровой колонны и угол изгиба

Figure 7. The deformed state of the drill string and the bending angle

Выводы

В рамках данного исследования был осуществлен подробный расчет угла изгиба бурильной колонны, с учетом целевой долговечности. Анализ результатов позволил выявить

критический угол, при достижении которого начинается деформация труб. Этот параметр становится ключевым, поскольку приводит к возникновению аварийных ситуаций в процессе бурения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Асадов Т.Г. Исследование влияния отклонения параметров резьбы на работоспособность замков для бурильных труб // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2011. № 11. С. 7–11.

2. Курячий А.Е., Калягин С.М. Повышение эффективности традиционного наклонно-направленного бурения за счет использования системы импульсного управляемого бурения // Перспективы устойчивого развития нефтегазовой отрасли и электроэнергетики в российской федерации и мире: матер. междунар. науч.-практ. конф. / Под общей ред. И.И. Босикова, Р.В. Ключева Владикавказ: СКГМИ (ГТУ), 2019. С. 52–57.

3. Шестеркин С.О., Папировский В.Л., Опарин В.Б. Влияние геометрических параметров бурильной трубы на усталостный излом // КиберЛенинка. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-geometricheskikh-parametrov-burilnoy-truby-na-ustalostnyy-izlom?ysclid=lp5s2t5clf530434819> (дата обращения: 19.11.2023).

4. Гнибидин В.Н., Подъячев А.А. Оценка степени влияния интеграции RFID-метки на прочностные характеристики и работоспособность замковых соединений бурильных труб // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2021. № 2 (338). С. 25–34. DOI: 10.33285/0130-3872-2021-2(338)-25-34.

5. Дурьманов Н.В., Гаранин П.А. Анализ напряженного состояния замкового соединения бурильных труб с применением метода конечных элементов // Ашировские чтения. 2023. Т. 2 (15). С. 30–37.

6. Дурьманов Н.В., Гаранин П.А. Моделирование напряженного состояния замкового соединения бурильных труб с использованием метода конечных элементов // Ашировские чтения. 2023. Т.1 (15). С. 65–71.

7. ГОСТ 32696-2014. Трубы стальные бурильные для нефтяной и газовой промышленности: дата введения 2016-01-01. М.: Стандартинформ, 2015. 86 с.

8. ГОСТ 631-75 Трубы бурильные с высаженными концами и муфты к ним. Технические условия: дата введения 04.12.1975. СССР: Стандартинформ, 2010. 22 с.

9. ГОСТ 631-75 Трубы бурильные с высаженными концами и муфты к ним. Технические условия: дата введения 04.12.1975. СССР: Стандартинформ, 2010. 22 с.

10. ГОСТ 27834-95 Замки приварные для бурильных труб. Технические условия: дата введения 08.04.1996. Минск: Стандартинформ, 2008. 18 с.

11. ГОСТ Р 50278-92 Трубы бурильные с приварными замками. Технические условия: дата введения 16.09.1992. М.: Стандартинформ, 2010. 20 с.

12. ГОСТ Р 54918-2012 Трубы обсадные, насосно-компрессорные, бурильные и трубы для трубопроводов нефтяной и газовой промышленности. Формулы и расчет свойств: дата введения 27.06.2012. М.: Стандартинформ, 2014. 252 с.

13. ГОСТ 23786-79 Трубы бурильные из алюминиевых сплавов. Технические условия: дата введения 17.08.1979. М.: Издательство стандартов, 1990. 22 с.

REFERENCES

1. Asadov T.G. Issledovanie vliyaniya otkloneniya parametrov rez'by na rabotosposobnost' zamkov dlya buril'nyh trub [Study of the Effect of Deviations in Thread Parameters on the Operability of Drill Pipe Locks]. *Stroitel'stvo neftyanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more — Construction of Oil and Gas Wells on Land and at Sea*, 2011, No. 11, pp. 7–11. [in Russian].

2. Kuryachy A.E., Kalyagin S.M. Povyshenie effektivnosti tradicionnogo naklonno-napravlennoogo bureniya za schet ispol'zovaniya sistemy impul'snogo upravlyаемого bureniya [Increasing the Efficiency of Traditional Directional Drilling at the Expense of the Use a Pulse Controlled Drilling System] *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Perspektivy ustojchivogo razvitiya neftegazovoy otrasli i elektroenergetiki v rossijskoj federacii i mire»* [Materials of The International Scientific and Practical Conference «Prospects for the Sustainable Development of the Oil and Gas Industry and the Electric Power Industry in the Russian Federation and the World»] Managing Ed. Bosikova I.I., Klyueva R.V. Vladikavkaz: SKGMI (GTU), 2019. pp 52–57. [in Russian].

3. Shesterkin S.O., Papirovsky V.L., Oparin V.B. Vliyanie geometricheskikh parametrov buril'noj truby na ustalostnyy izlom [Impact of drill pipe geometry on fatigue fracture]. *CyberLeninka*. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-geometricheskikh-parametrov-burilnoy-truby-na-ustalostnyy-izlom?ysclid=lp5s2t5clf530434819> (accessed: 19.11.2023). [in Russian].

4. Gnibidin V.N., Podyachev A.A. Ocenka stepeni vliyaniya integracii RFID-metki na prochnostnye harakteristiki i rabotosposobnost' zamkovykh soedinenij buril'nyh trub [Assessment of the Degree of RFID Tag Integration Impact on the Strength Characteristics and Performance of Drill Pipes Joint]. *Stroitel'stvo neftyanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more — Construction of Oil and Gas Wells on Land and at Sea*, 2021, No. 2 (338), pp. 25–34. DOI: 10.33285/0130-3872-2021-2(338)-25-34. [in Russian].

5. Durymanov N.V., Garanin P.A. Analiz napryazhennogo sostoyaniya zamkovogo soedineniya buril'nyh trub s primeneniem metoda konechnykh elementov [Analysis of the Stress State of the Lock cConnection of Drill Pipes Using the Finite Element Method]. *Ashirovskie chteniya — Ashirov Readings*, 2023, Vol. 2 (15), pp. 30–37. [in Russian].

6. Durymanov N.V., Garanin P.A. Modelirovanie napryazhennogo sostoyaniya zamkovogo soedineniya buril'nyh trub s ispol'zovaniem metoda konechnykh elementov [Modeling of the Stress State of the Locking Joint of Drill Pipes Using the Finite Element Method]. *Ashirovskie*

chteniya — *Ashirov Readings*, 2023, Vol. 1 (15), pp. 65-71. [in Russian].

7. *GOST 32696-2014. Truby stal'nye buril'nye dlya neftyanoj i gazovoj promyshlennosti: data vvedeniya 2016-01-01* [State Standard 32696-2014. Drilling steel pipes for the oil and gas industry: date of introduction 2016-01-01]. Moscow, Standardinform, 2015. 86 p. [in Russian].

8. *GOST 631-75 Truby buril'nye s vysazhennymi koncami i mufty k nim. Tekhnicheskie usloviya: data vvedeniya 04.12.1975.* [State Standard 631-75 Drill pipes with planted ends and couplings to them. Specification: date of introduction of the 04.12.1975]. USSR: Standardinform, 2010. 22 p. [in Russian].

9. *GOST 631-75 Truby buril'nye s vysazhennymi koncami i mufty k nim. Tekhnicheskie usloviya: data vvedeniya 04.12.1975.* [State Standard 631-75 Drill pipes with planted ends and couplings to them. Specification: date of introduction of the 04.12.1975]. USSR: Standardinform, 2010. 22 p. [in Russian].

10. *GOST 27834-95 Zamki privarnye dlya buril'nyh trub. Tekhnicheskie usloviya: data vvedeniya 08.04.1996* [State Standard 27834-95 Welded locks for drill pipe.

Specification: date of introduction of the 08.04.1996]. Minsk: Standardinform, 2008. 18 p. [in Russian].

11. *GOST R 50278-92 Truby buril'nye s privarennymi zamkami. Tekhnicheskie usloviya: data vvedeniya 16.09.1992* [State Standard R 50278-92 Drill pipes with welded locks. Specification: date of introduction of the 16.09.1992]. Moscow, Standardinform, 2010. 20 p. [in Russian].

12. *GOST R 54918-2012 Truby obsadnye, nasosno-kompressornye, buril'nye i truby dlya truboprovodov neftyanoj i gazovoj promyshlennosti. Formuly i raschet svoystv: data vvedeniya 27.06.2012* [State Standard R 54918-2012 Casing Pipes, Tubing, Drilling Pipes and Pipes for Oil and Gas Industry Pipelines. Formulas and property calculation: date of 27.06.2012 introduction]. Moscow, Standardinform, 2014. 252 p. [in Russian].

13. *GOST 23786-79 Truby buril'nye iz alyuminievyh splavov. Tekhnicheskie usloviya: data vvedeniya 17.08.1979* [State Standard 23786-79 Drilling pipes made of aluminum alloys. Specification: date of introduction of the 17.08.1979. Moscow, Publishing House of Standards, 1990. 22 p. [in Russian].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Никита Вадимович Дурьманов, студент, Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

Nikita V. Durymanov, student, Samara state technical university, Samara, Russia

durymanov.nik@mail.ru

Петр Александрович Гаранин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

Petr A. Garanin, candidate of technical sciences, associate professor, Oil and gas drilling department, Samara state technical university, Samara, Russia

ninarag@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 09.09.2023; одобрена после рецензирования 15.10.2023; принята к публикации 30.11.2023.

The article was submitted 09.09.2023; approved after reviewing 15.10.2023; accepted for publication 30.11.2023.