

关于钻井液净化及岩屑回收利用的试验研究

汤凤林^{1,2}, 赵荣欣¹, 李 博¹, 薛志佳³, 段隆臣², Третьяк А.А.⁴, Чихоткин В.Ф.²

(1. 上海市建筑科学研究院有限公司, 上海 200032; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 长安大学, 陕西 西安, 710064; 4. 普拉托夫南俄罗斯国立理工大学 (Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова), 新切尔卡斯克 (Новочеркасск) 346428, 俄罗斯 (Россия))

摘要: 钻井液是钻探工程的核心介质, 其净化效率直接影响钻进效率、钻井质量与生态环境。针对岩屑净化难题, 俄罗斯科研团队提出了超声波与永久磁场协同净化钻井液及岩屑回收利用技术。通过理论分析建立了磁化条件下颗粒沉降动力学模型, 设计了集成超声波辐射器与Π字型磁铁的闭环处理装置, 并开展了实验室与现场试验。结果表明: 该技术能促使钻井液中岩屑颗粒形成稳定的“集群结构”, 显著提升其沉降速度, 有效改善钻井液的流变性能, 滤失量降低50%, 黏度提高20%, 岩屑沉淀率达30%; 岩屑经焙烧可制成压裂支撑剂, 实现资源化利用。研究成果为解决钻井液净化与岩屑污染问题提供了创新技术路径, 对推动钻探工程绿色化具有重要参考价值。

关键词: 钻井液净化; 岩屑回收; 磁化处理; 超声波处理; 支撑剂; 资源化利用; 绿色钻探

中图分类号: TE926; P634.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)01-0079-06

Experimental research on drilling fluid purification and cuttings recycling

TANG Fenglin^{1,2}, ZHAO Rongxin¹, Li Bo¹, XUE Zhijia³, DUAN Longchen²,
TRETYAK A.A.⁴, CHIKHOTKIN V.F.²

(1. Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd, Shanghai 200032, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 3. Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China; 4. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk 346428, Russia)

Abstract: Drilling fluid is the core medium in drilling engineering and its purification efficiency directly affects drilling efficiency, drilling quality, and the ecological environment. To address the challenge of the cuttings purification, the Russian research team has proposed a technology of drilling fluid purification and cuttings recycling using ultrasonic waves and permanent magnetic fields. Through theoretical analysis, a kinetic model for particle sedimentation under magnetization conditions has been established. A closed-loop treatment apparatus, integrating an ultrasonic radiator and a Π-shaped magnet, has been designed and subsequently subjected to both laboratory and field tests. The results of the tests demonstrate that this technology can promote the formation of stable "cluster structures" of cuttings particles in the drilling fluid, significantly enhancing their sedimentation rate and effectively improving the fluid's rheological properties, leading to 50% reduction in fluid loss, 20% increase in viscosity, and cuttings precipitation rate reaching 30%. Furthermore, the recovered cuttings can be calcined to produce fracturing proppants, achieving resource utilization. These results provide a new innovative solution way for resolving the problems of drilling fluid purification and cuttings pollution and have significant reference value for promoting greening of drilling engineering.

Key words: drilling fluid purification; cuttings recovery; magnetization treatment; ultrasonic treatment; proppant; resource utilization; green drilling

收稿日期: 2025-10-18; 修回日期: 2025-12-10 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.01.012

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“液动冲击回转作用下热压WC-Cu基孕镶金刚石钻头的磨损行为研究”(编号: 41972327)

第一作者: 汤凤林, 男, 汉族, 1933年生, 教授, 博士生导师, 俄罗斯工程院外籍院士, 俄罗斯自然科学院外籍院士, 国际矿产资源科学院院士, 探矿工程专业, 主要从事探矿工程相关的教学和科研工作, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, fttang_wuhan@aliyun.com。

引用格式: 汤凤林, 赵荣欣, 李博, 等. 关于钻井液净化及岩屑回收利用的试验研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(1): 79-84.

TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, Li Bo, et al. Experimental research on drilling fluid purification and cuttings recycling[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(1): 79-84.

0 引言

钻探工程和钻井工程在地质勘探和石油天然气勘探开发中起着重要作用。钻井液是钻探(井)工程的“血液”,在钻进过程中发挥着重要作用。其作用包括清洗井底、排出岩屑、冷却、润滑钻头和钻柱,平衡地层压力和保护井壁等,最重要的是清洗井底和排出岩屑,可以提高钻进效率,保证钻井质量,提高钻井的技术经济效益。如果无法及时净化钻井液、排出岩屑,会产生很大的负面影响。地质钻探和油气钻井工程中会产生大量的岩屑,如不进行净化处理,不但影响钻井工程效率和质量,还会对生态环境产生很大危害^[1-6]。据俄罗斯专家的资料,俄罗斯每年排出的岩屑量高达 $5 \times 10^6 \text{ m}^3$,其中经处理的仅占4%^[7]。

为此,俄罗斯钻井科研人员做了大量的工作^[7-28],提出了用超声波和永久磁场效应净化钻井液中岩屑的技术,并获得了发明专利^[17]。在此基础上,开展了大量试验,研究了利用永久磁场效应来净化钻井液和回收岩屑^[7],取得了很好的效果,值得引起我们的注意。

1 钻井液处理方法、装置和使用效果^[17]

普拉托夫南俄罗斯国立理工大学 Третьяк А. А.等取得了一项名为“钻井液处理方法及其使用装置”的发明专利(专利号RU2255199),如图1所示。

钻井液处理装置包括聚氯乙烯管、钻井液隔板

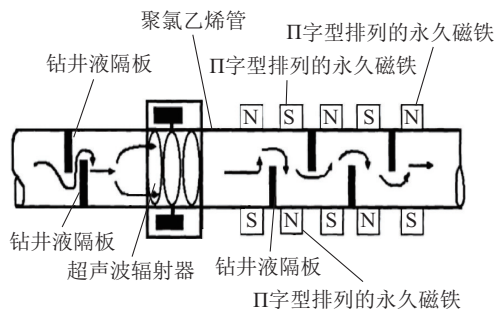


图1 钻井液处理方法及其所用装置

Fig.1 Method for processing drilling fluid and device for realization of said method

(反射器)、超声波辐射器和一组Π字型排列的永久磁铁。钻井液经过反射器进入聚氯乙烯管,反射器使钻井液呈紊流状,超声波辐射器使其范围内的黏土颗粒粉碎并破坏水分子之间的氢键连接。Π字型排列的永久磁铁的磁场可在钻井液中产生集群结构。超声波频率为20~24 kHz,功率为1.0~3.5 kW,磁场强度为20000 Oe(1 Oe $\approx$ 79.577 A/m,后同)。永久磁铁的最优数量和布置方案通过试验确定。该装置安装在钻探水泵高压管线上,并以闭环形式运行。

应用试验在罗斯托夫南部不稳定细粒砂和不同大小颗粒砂的含水层进行,取得了很好的效果,满足了钻探对该地层的要求。试验使用低固相聚合物钻井液,试验结果见表1。从表1可见,3种钻井液处理方法均有一定效果,第三种方法的效果最为明显。

表1 不同方法处理后钻井液的性能参数

Table 1 Performance parameters of drilling fluid after treatment with different methods

处理方法	钻井液配方	处理前钻井液参数			处理后钻井液参数		
		密度/(g·cm ⁻³)	黏度/s	滤失量/[mL·(30 min) ⁻¹]	密度/(g·cm ⁻³)	黏度/s	滤失量/[mL·(30 min) ⁻¹]
超声波处理	水+0.5% 甲基纤维素 +1% 水解聚丙烯腈 +3% 羧基改性膨润土	1.1	22	12	1.1	25	10
磁场处理					1.1	25	10
综合处理(超声波+磁场)					1.0	27	6

在此基础上,还通过试验研究了钻井液净化和岩屑回收利用技术,亦取得了很好的技术经济效果。

2 磁化处理的基础理论与技术^[9]

2.1 磁化处理的基础理论

目前,通常使用黏土类泥浆作为钻井液。由于

黏土中含有高度分散的铁磁性颗粒,可以把钻井液看作一个铁磁性系统。施加磁场时,电子的运动及其能量将发生明显改变。当排斥力大于吸引力时,黏土颗粒会从钻井液中絮凝沉降出来。黏土颗粒具有一定的磁矩,在外磁场作用下,可将其看作电荷的载体。因此,絮凝过程不仅分子能平衡、静电

能平衡、热能平衡,磁场能也平衡。颗粒沉降速度:

$$V(r) = Cr^j = \frac{H}{t} \quad (1)$$

式中: $V(r)$ ——半径为 r 的颗粒沉降速度,规定单位; C ——常数,无量纲; j ——幂数(2, 1, 1/2),无量纲; H ——磁场强度, Oe; t ——时间, h。

钻井液中的黏土颗粒可视为处于布朗运动的微小物体,能以一定速度在钻井液中随机运动。钻井液是胶体颗粒悬浮体,胶体颗粒在磁场的作用下可以产生相对介质一定方向的运动,胶体分散体系在磁场作用下形成结构。当胶体溶液的稳定性被破坏(排斥力大于吸引力)时,其沉降性质会发生显著变化,不仅各个颗粒沉降,絮凝物也会沉降。可见,磁场的作用促进了岩屑从钻井液中沉淀出来,增大了其沉降速度,有利于钻井液中岩屑的净化。此技术主要用于黏土类钻井液。

2.2 磁化处理技术

普拉托夫南俄罗斯国立理工大学 Третьяк А. А. 等对钻井液磁化处理进行了理论和试验研究,提出了利用磁场处理岩屑技术,如图2所示,钻井液净化过程如图3所示。

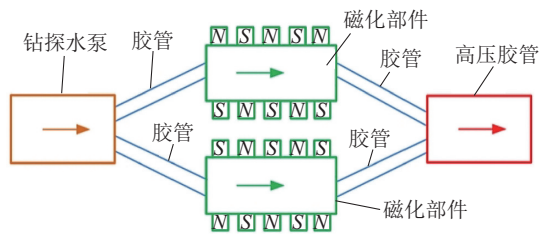


图2 钻井液磁化处理示意

Fig.2 Schematic diagram of magnetization treatment of drilling fluid

3 钻井液净化试验研究^[7]

钻井液岩屑净化试验研究在俄罗斯克拉斯诺达尔斯克边区莫罗左夫矿区和东丘马科夫矿区进行。根据矿区的地质条件,同时保证安全生产,使用木质素磺酸盐基膨润土聚合物钻井液,其主要成分为:膨润土(30~40 kg/m³)、Na₂CO₃(1.0~2.0 kg/m³)、NaOH(1.0 kg/m³)、缩合亚硫酸盐酒精废液(10~20 kg/m³)、羧甲基纤维素500(1~3 kg/m³)、去污剂(1 kg/m³)、水解聚丙烯酰胺(1~2 kg/m³)、消泡剂(0.3 kg/m³)和润滑剂(3~6 kg/m³)。但是,该钻井液在钻进后期还是出现了三高现象,即密度高

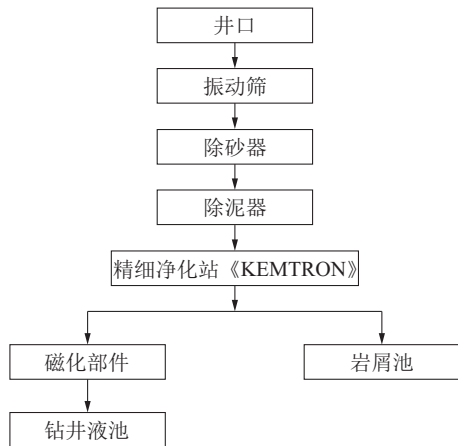


图3 钻井液净化过程示意

Fig.3 Schematic diagram of drilling fluid cleaning process

(2100 kg/m³)、静切力高(30~40/60~90 dPa)、动切力高(30~40 Pa)。

为解决这一问题,俄罗斯钻探技术人员在前述发明的基础上,提出了采用永久磁场处理钻井液以实现净化的方法,从而改善钻井液的流变性能,将更多岩屑排至地表,减少井底堵塞。

该技术的实验室试验研究在磁场强度 2200 Oe、钻井液流速 0.3 m/s、温度 20 ℃ 条件下进行,钻井液磁化处理时间为 40 min。试验表明,被处理的钻井液的“记忆”时间和衰减随时间变化,如图4所示。

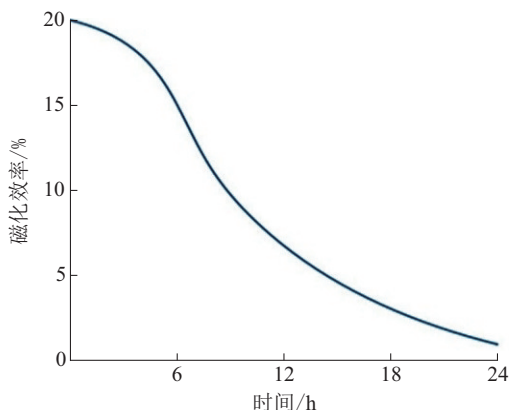


图4 钻井液磁化衰减曲线

Fig.4 Damping curve of drilling fluid magnetization

24 h后,由于磁化的钻井液失去磁化性质,钻井液永久磁铁处理采用闭式循环,如图5所示。

在试验研究过程中,确定了永久磁场对钻井液的影响,聚合物钻井液泥皮(饼)厚度与固相含量的关系如图6所示。

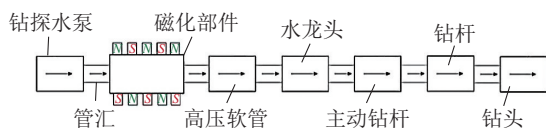


图5 钻井液闭式循环磁化处理示意

Fig.5 Scheme of drilling fluid magnetization treatment in a closed cycle

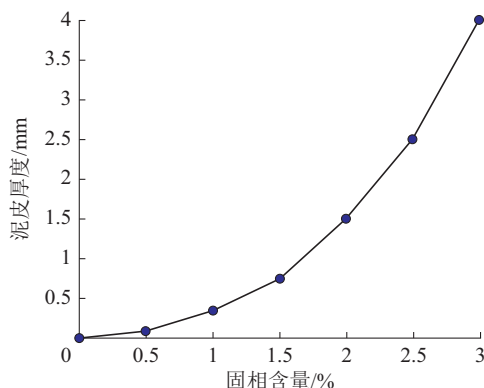
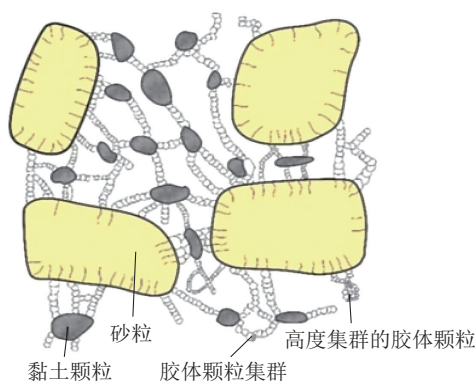


图6 聚合物泥皮厚度与固相含量的关系

Fig.6 Dependence of the thickness of the polymer mud cake from the solid phase content

钻井液净化主要通过研究聚合物钻井液的泥皮进行。聚合物泥皮通过BM-6型失水量测量仪获得,并在QUANTA200型显微镜下进行观察,见图7~9。

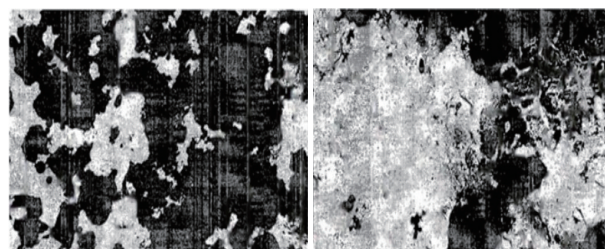
图7 钻井液泥皮干燥样品放大 10^9 倍Fig.7 Structure of dried drilling fluid mud cake sample, magnified 10^9 times

利用显微镜对磁化处理前后的钻井液泥皮进行烘干后对比研究,岩屑发生了不可逆转的絮凝变化。在磁场强度为2200 Oe的永久磁场中对钻井液进行处理后,岩屑颗粒彼此絮凝、增大,岩屑沉淀率达到了30%。同时,形成了分子-偶极形式的交互



(a)磁化处理前

(b)磁化处理后

图8 钻井开始前钻井液泥皮放大 1.9×10^4 倍Fig.8 Photos of drilling fluid filter cake before drilling magnified 1.9×10^4 times

(a)磁化处理前

(b)磁化处理后

图9 钻进过程中钻井液泥皮放大 1.9×10^4 倍Fig.9 Photos of drilling fluid filter cake while drilling magnified 1.9×10^4 times

结构(图10),钻井液的滤失量降低了50%,黏度增加了20%。

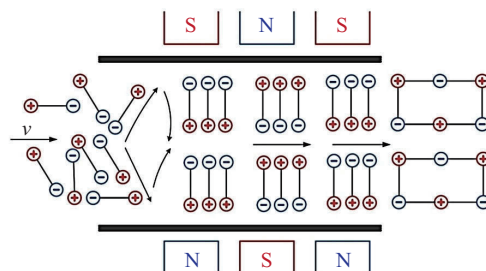


图10 钻井液通过永久磁场后形成的集群结构示意图

Fig.10 Diagram of cluster structure of drilling fluid when it passes through a permanent magnetic field

4 岩屑回收利用技术试验研究^[7]

油层水力压裂是一种通过水力传压扩展地层深部裂缝,以提高石油开采效率的技术。水力压裂技术利用液体传压原理,使用地面高压大泵量的泵,将高黏度液体以超过油层吸收能力的速度注入油层,当压力超过油层破裂阈值时,油层便会产生一条或多条沿不同方向的裂缝。裂缝形成后,随着液体持续注入,裂缝不断扩展延伸,直至注入速度与油层吸收速度平衡。此时若停止外力作用,裂缝

会重新闭合。为了保持压开的裂缝保持张开状态,须在压入液体中加入支撑剂(如砂子等),支撑已张开的裂缝。油层中存在这种被支撑剂所充填的一条或多条裂缝时,会大大增加油层的渗透能力,减少石油的流动阻力,增加油井产量。可见,这种支撑剂非常必要。

为了讨论利用岩屑生产支撑剂的可能性,对岩屑的物理化学、矿物和生物性能进行了实验室试验研究。为确定其岩相组成,对样品进行了X射线粉末衍射分析,所用仪器为ARL XTR型衍射仪。所得数据是参照国际衍射数据中心(ICDD)的数据库资料进行解析的。对上述矿区X射线衍射谱进行的分析表明,岩屑中的最主要岩相为石英,占11~30%,其余为蒙脱石、方钠石、重晶石和方解石。岩屑中含有这些物质,特别是含有石英,可以利用其来合成高质量的支撑剂。

岩屑回收利用系统示意图11。焙烧温度900、1000℃时的支撑剂外貌见图12。

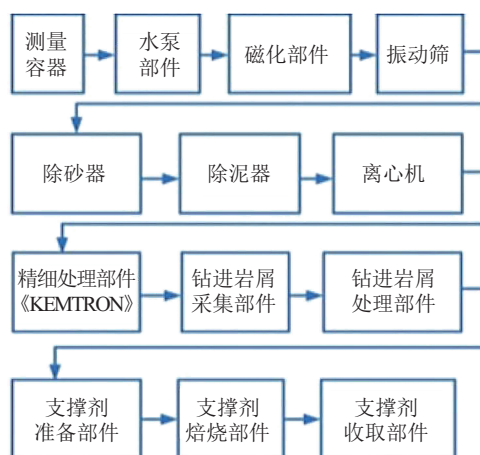
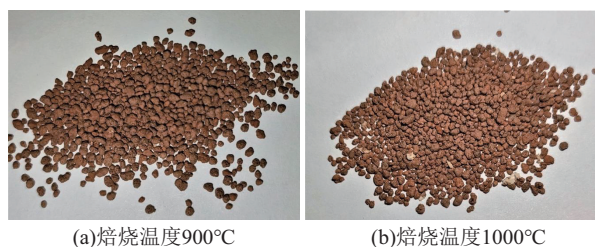


图11 钻井液中岩屑回收利用系统
Fig.11 Technological scheme of recycling processing rock cuttings in drilling fluid



(a)焙烧温度900℃

(b)焙烧温度1000℃

图12 支撑剂外貌

Fig.12 Proppant appearance

5 讨论与建议

(1)地质钻探和油气钻井中使用的钻井液,主要作用是冷却钻头、排除岩屑和保护井壁。钻井液在流动过程中携带岩屑到达井口后流入沉淀池,岩屑同时沉淀在沉淀池中。如果不对岩屑进行处理,不但影响钻进效率和钻井质量,还会对生态环境产生严重影响。因此,应该非常重视岩屑的处理问题。

(2)为了解决上述问题,俄罗斯专家进行了大量研究,提出了利用超声波和磁场综合效应来提高钻井液的流变性能,取得了发明专利,并在俄罗斯斯托夫南部钻进不稳定细粒砂和大小不同颗粒砂的含水层中使用,取得了很好的效果,满足了该地层对钻井液的要求。

(3)俄罗斯科研人员利用永久磁铁效应研究了改善钻井液性能、清理井底岩屑的机理,认为主要是此时形成了分子-偶极形式的交替结构,为利用永久磁铁效应改善钻井液性能、清理井底岩屑找到了理论解释,具有重要意义。

(4)俄罗斯科研人员提出的利用岩屑回收系统生产压裂油层需要的支撑剂技术,既解决了岩屑危害周围生态环境的问题,又可以大大提高油层的渗透能力,减少石油流动阻力,增加油井产量,做到了“废”物利用。

(5)中国地质钻探和油气钻井所用的钻井液中,也存在岩屑处理及其资源化利用问题,相关研究和报道较少。俄罗斯的相关成果值得我们参考,建议国内有关单位和专家对此进行研究和试验,以确定其可行性和实用性,提高岩屑处理效果及其回收利用的效益。

参考文献(References):

- [1] 胡郁乐,张惠,王稳石.深部岩心钻探关键技术[M].武汉:中国地质大学出版社,2018.
HU Yule, ZHANG Hui, WANG Wenshi, et al. Key Technologies in Deep Core Drilling [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018.
- [2] 朱恒银.深部岩心钻探技术与管理[M].北京:地质出版社,2014.
ZHU Hengyin. Deep Core Drilling Technology and Management [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [3] 朱恒银,王强,杨展,等.深部地质钻探金刚石钻头研究与应用[M].武汉:中国地质大学出版社,2014.
ZHU Hengyin, WANG Qiang, YANG Zhan, et al. Research and Application of Diamond Bit for Deep Geological Drilling

- [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014.
- [4] 汤凤林, 加里宁, 段隆臣. 岩心钻探学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2009.
- TANG Fenglin, GALINING, DUAN Longchen. Core Drilling Technology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2009.
- [5] 楼一珊, 李琪, 龙芝辉, 等. 钻井工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- LOU Yishan, LI Qi, LONG Zhihui. Drilling Engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [6] 陈涛平, 胡靖邦. 石油工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- CHEN Taoping, HU Jingbang. Petroleum Engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
- [7] Александрович Т А, Альфредовна Я Е, Андреевич Б К, et al. Технология очистки и рециклинга бурового раствора[J]. Известия Томского политехнического университета, 2022, 333(2):62-70.
- [8] Александрович Т А, Альфредовна Я Е, Александрович О С, et al. Идентификация отходов бурения и их использование [J]. Известия Томского политехнического университета, 2021, 332(2):36-43.
- [9] Рахматуллин Д В. Разработка комплексного метода утилизации буровых шламов [D]. Россия г. Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2011.
- [10] С Г А, И П Н, Ю Я М. Идентификация отходов бурения [J]. Нефть, газ, новации, 2019, 11:82-86.
- [11] В М В, А К В, Ц М. В. К вопросу о современных методах переработки и утилизации отходов бурения[J]. Нефть и газ Сибири, 2017, 3(28):147-151.
- [12] Гражданкин А С, Янишевский Е А. Буровой раствор для строительства скважин в сложных условиях[J]. Вестник Науки, 2025, 2(11):1221-1227.
- [13] Третьяк А Я, Рыбальченко Ю М. Теоретические исследования по управлению буровым раствором в осложненных условиях [J]. Известия высших учебных заведений СевероКавказский регион. Технические науки. Приложение, 2006, 7:56-61.
- [14] Шерстнёв Н М, Шандин С П, Толоконский С И, et al. Применение физических полей для регулирования свойств буровых растворов и тампонажных материалов [J]. Российский химический журнал, 1995, 39:22-26.
- [15] Наноструктурированный, высокоингибированный буровой раствор: 2708849[P]. 2024-01-19.
- [16] Высокоингибированный буровой раствор: 2303047 [P]. 2005-10-06.
- [17] Способ обработки бурового раствора и устройство для его осуществления[P]. 2255199[P]. 2005-10-01.
- [18] Чихоткин В Ф, Третьяк А Я, Рыбальченко Ю М, et al. Буровой раствор и управление его реологическими свойствами при бурении скважин в осложненных условиях [J]. Бурение на нефть, 2007, 7/8:58-60.
- [19] Caenn R, Darley H C H, Gray G R. Drilling and Drilling Fluids Waste Management[M]//Caenn R, Darley H C H, Gray G R. Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. 7th ed. Cambridge .Gulf Professional Publ., 2017: 597-636.
- [20] Sanzone D M, Neff J M, Vinhateiro N. Environmental fates and effects of ocean discharge of drill cuttings and associated drilling fluids from offshore oil and gas operations: IOGP Report 543[R]. Affiliation: AECOM, 2016.
- [21] Можжерин А В, Сакулин А В, Скурихин В В, et al. Исследование остаточной проводимости алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов при циклических нагрузках[J]. Бурение и нефть, 2017, 5:42-45.
- [22] Можжерин А В, Коржавин А Ю. Керамический пропант или песок?[J]. Сфера. Нефть и газ, 2018, 2(64):20-23.
- [23] Рахматуллин Д В, Барахнин В, Ягафаров Г Г, et al. Изучение биостойкости буровых реагентов на основе производных целлюлозы [J]. Нефтегазовое дело, 2007, 5(2):151-153.
- [24] Рахматуллин Д В, Барахнин В, Ягафаров Г Г, et al. Оценка биостойкости полимерных буровых химических реагентов компании «Baroid Limited» [J]. Башкирский химический журнал, 2007, 14(5):51-53.
- [25] В Рахматуллин Д, Рахматуллин В Р, Карабаев У С, et al. Утилизация буровых отходов реагентным методом [J]. Бурение и нефть, 2009, 12:14-15.
- [26] Рахматуллин Д В, Ягафаров Г Г, Рахматуллин В Р, et al. Утилизация отходов бурения с последующей биологической доочисткой [J]. Экология и промышленность России, 2010, 5:42-44.
- [27] Рахматуллин Д В, Ягафаров В Б, Барахнин И Р. Экономические аспекты применения нефтеокисляющего биопрепарата «РОДОТРИН» [C]//Материалы XXI Международной научно-технической конференции «Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии», Уфа, 2008:220-221.
- [28] Рахматуллин Д В, Ягафаров Г Г, Барахнин В Б. Утилизация буровых отходов, содержащих полимерные добавки [C]//Материалы 3 научно-технической конференции с международным участием «Основные проблемы освоения и обустройства нефтегазовых месторождений и пути их решения». Россия. Оренбург, ВолгоУралНИПИ газ. 2009:75-78.

(编辑 王跃伟)