

关于切削型多节式刮刀钻头的分析研究

汤凤林^{1,2}, 沈中华¹, 段隆臣², 柳少青¹, 孙环平¹, ЧИХОТКИН В. Ф.²
(1. 无锡钻探工具厂有限公司, 江苏 无锡 214174; 2. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要:刮刀(翼片)钻头在泥岩和页岩等软地层中可以得到高的机械钻速和长的钻头进尺,但是在硬地层和软硬交错地层,特别是在研磨性地层中,钻进效率低,钻头磨损快,钻头寿命受到影响。俄罗斯南方国立技术大学 Третьяк А. Я. 教授研制出了一种切削型两节式 D-2BB 钻头。这种钻头包括 2 个圆锥形回转节:领眼钻进部分回转节和井筒形成部分回转节,彼此独立、布置同轴,通过行星齿轮传动机构驱动,可以按不同(相反)方向回转,保证镶有数个 PDC 复合片切削具的刀翼,不论其处于如何位置,在单位时间内行走的路程都是相同的,所以磨损是均匀的,因而提高了耐磨性,提高了钻探的技术经济指标。该项技术取得了俄罗斯发明专利。

关键词:刮刀钻头;磨损;行星齿轮机构;切削具耐磨性;钻探技术经济指标

中图分类号: P634.4⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)06-0088-05

Analytical Research on Cutting Type Multitier Wing Bit/TANG Feng-lin^{1,2}, SHEN Zhong-hua¹, DUAN Long-chen², LIU Shao-qing¹, SUN Huan-ping¹, CHIKHOTKIN V. F.² (1. Wuxi Drilling Tools Factory Co., Ltd., Wuxi Jiangsu 214174, China; 2. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: In drilling engineering, especially in petroleum and gas drilling, the wing bit is widely used due to its simple design and easy manufacture, good penetration rate and long footage in soft formations drilling, such as clay and shale formations. However in hard and soft-hard interbedded formations, especially in abrasive formation drilling, its penetration rate is low and rapid bit wear influence its service life. Третьяк А. Я., who is a professor of South-Russian State Technical University, has worked out a cutting type two-tier wing bit D-2BB, two conic rotating tiers are mounted on the bit body for pilot drilling and well drilling (not depending on each other and located at the same axis of rotation), driven by planetary gearing transmission mechanism. They can rotate in different (opposite) directions to guarantee that the cutter wings with several PDC composite plates passing the same distance in unit time, no matter where they are. In this case, the bit wear resistance is improved by uniform bit wear with improved technical and economic indexes of drilling. This technology has obtained the Russia invention patent.

Key words: wing bit; wear; planetary gear mechanism; wear resistance of cutting elements; technical and economic indexes of drilling

在钻探工程中,特别是在石油天然气钻井中,刮刀(翼片)钻头,由于结构简单、制造方便,在泥岩和页岩等软地层中可以得到高的机械钻速和长的钻头进尺,得到了广泛应用。但在硬地层和软硬交错地层,特别是在研磨性地层中钻进时,钻进效率低,钻头磨损快,钻头寿命受到影响,影响了使用和发展^[1-7]。

一般在设计和制造刮刀钻头时,既要考虑钻头有高的破碎岩石效率,提高机械钻速,又要考虑钻头具有一定的耐磨性,使钻头获得较高的钻头进尺。因此,如何保证钻头能在工作过程中各部分磨损均匀,具有等耐磨性是一个重要问题^[8-12]。

俄罗斯南方国立技术大学 Третьяк А. Я. 教授团队通过多年研究研制出了一种切削型两节式 D-2BB 钻头。这种钻头分为两节:领眼钻进部分回转节和井筒形成部分回转节,这两个部分的回转节通过行星齿轮传动机构驱动,可以按不同(相反)方向回转。这种传动结构可以保证具有数个 PDC 切削具的刀翼,不论其处于如何位置,在单位时间内行走的路程都是相同的,所以磨损是均匀的,因而提高了耐磨性,提高了钻探的技术经济指标^[13-14]。

试验研究表明,尖刃切削具钻进坚硬岩石(普氏系数 $f=8.0 \sim 11.5$)时,机械钻速 V_m 可达 1 m/min ,进尺 $L=200 \text{ m}$ 。但是,在 $n=150 \sim 200 \text{ r/min}$ 时,外

收稿日期:2017-03-16

基金项目:江苏省江苏双创团队资助项目(编号:苏人才办[2014]27号)

作者简介:汤凤林,男,汉族,1933年生,教授,博士生导师,俄罗斯工程院院士,俄罗斯自然科学院院士,国际矿产资源科学院院士,探矿工程专业,从事探矿工程方面的教学和科研工作,湖北省武汉市鲁磨路388号中国地质大学(武汉),ftang_wuhan@aliyun.com。

缘切削具切削速度不应大于临界速度: $V_{\text{切削}} \leq V_{\text{临界}}$, 否则钻头切削具会产生破坏性磨损(见图 1)^[13-14]。

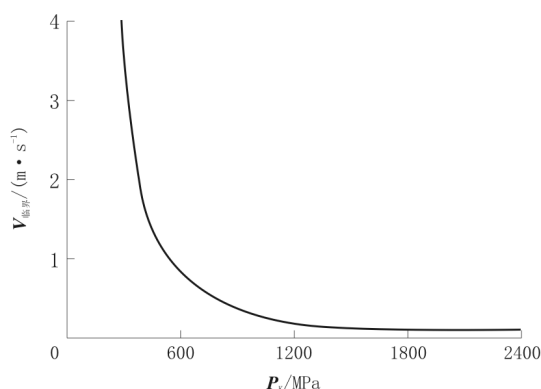


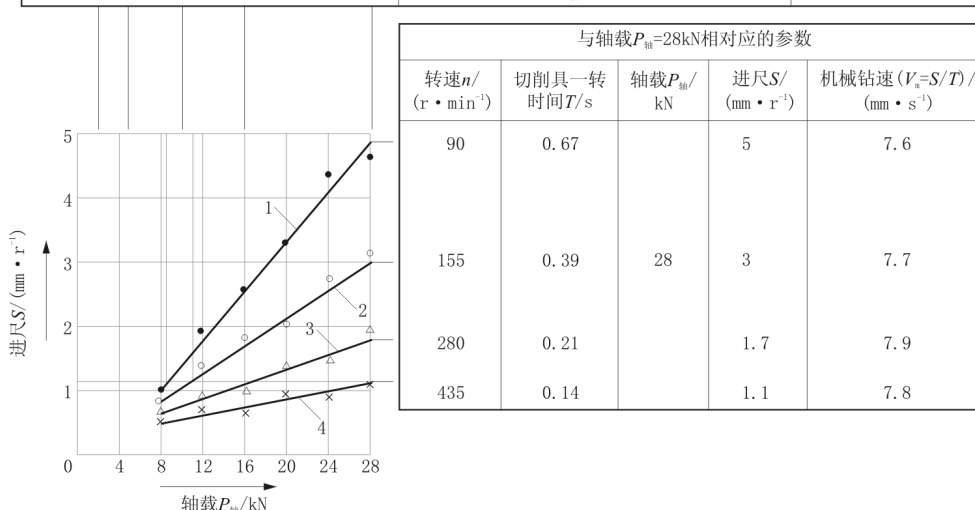
图 1 临界切削速度 $V_{\text{临界}}$ 与岩石具体强度 $P_{\text{к}}$ 的关系曲线(硬质合金 BK8B)

1 问题的提出和设计思想的产生

俄罗斯科研人员试验研究使用的是 БИ741А 切削具对接触强度为 1776 MPa、研磨性为 15.3 mg 的砂岩,在轴载力为 8、12、16、20、24 和 28 kN、回转速度为 90、155、280 和 435 r/min 条件下,进行钻进试验研究。对试验结果进行了处理,步骤如下:

- (1) 对每个转速 n (r/min) 计算切削具每转进尺的时间 T (s): $T = 60n^{-1}$;
 - (2) 对每一个轴载值 $P_{\text{轴}}$ (kN), 根据曲线图确定切削具每转的进尺值 S (mm/r);
 - (3) 对每一个 S 、 T 和确定的 $P_{\text{轴}}$, 计算机械钻速 $V_{\text{机械}}$ (mm/s): $V_{\text{机械}} = S/T$ 。
- 其结果如图 2 所示。

1.1				进尺 S / (mm · r ⁻¹)	与进尺 $S=1.1$ mm/r 相对应的参数
90	155	280	435	转速 n / (r · min ⁻¹)	
0.67	0.39	0.21	0.14	切削具一转时间 T / s	
1.6	2.8	5.2	7.8	机械钻速 ($V_{\text{机}}=S/T$) / (mm · s ⁻¹)	
9	11	16	28	轴载 $P_{\text{轴}}$ / kN	



1— $n = 90$ r/min; 2— $n = 155$ r/min; 3— $n = 280$ r/min; 4— $n = 435$ r/min

图 2 切削具给进值 S 与轴载 $P_{\text{轴}}$ 和转速 n 的关系曲线^[13-14]

在图 2 中表的下部给出了 $P_{\text{轴}} = 28$ kN 时的切削具回转一转的时间 T 、每转进尺 S 和 $V_{\text{机械}}$ 值。从这些数值可见,钻进硬岩时,在轴载 $P_{\text{轴}}$ 一定情况下,在给定每转进尺条件下,机械钻速 $V_{\text{机械}}$ 几乎是不变的(7.6~7.9 mm/s),是个常数,并与回转速度 n 无关。在钻进试验接触强度为 960 和 1270 MPa 的岩石时,也得到了类似的结果^[13-14]。这个结果很有启发,利用这个结果,可以研制出钻头上的切削刀翼可以有不同转速,但是能够保持机械钻速不变的钻头来,由此形成了新钻头的设计思想。

2 Д-2BB 钻头设计及其组成

现以两节式切削型 Д-2BB 钻头为例说明如下(钻头模型见图 3)^[13-14]。

参见图 4,两节式切削型 Д-2BB 钻头包括有钻头体 1 和切削刀翼 2 和 3,每个刀翼的正面都是倾斜的,其上分别镶有高耐磨性的 PDC 切削具 4、4'、4''和 5、5'、5'',在垂直投影平面上的投影呈折线形状。在钻头体 1 上,装有两个圆锥形、相对独立的领眼钻进回转节 6 和井筒形成回转节 7,它们可以按相反方向回转。在这种情况下,远离回转中心线的



图3 D-2BB 钻头模型

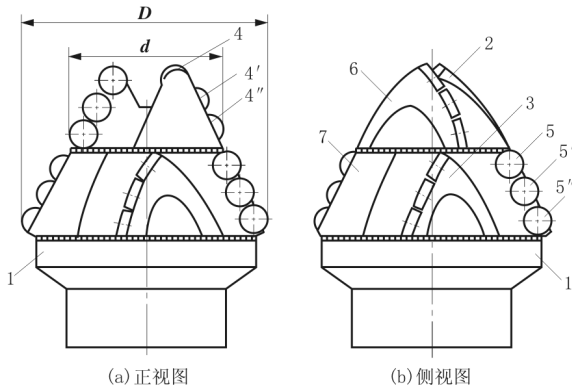


图4 D-2BB 钻头两个回转节剖面图

切削具的切削速度将是相等的,或最大接近临界速度值,但又不超过临界值^[15-18]。

回转节6是通过井底动力机(未示出)和装在钻头体上行星齿轮传动装置进行回转的(见图5)。回转节6以角速度 ω_1 向右回转(见图6)。

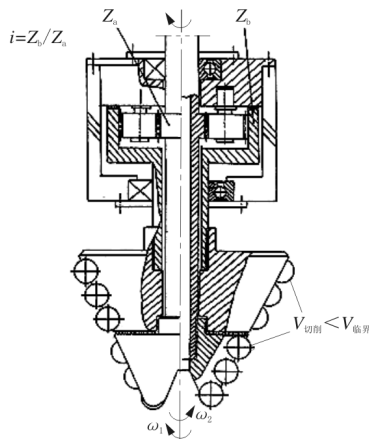


图5 钻头2个回转节逆向回转的行星齿轮传动图

当回转节6的刀翼2以角速度 ω_1 回转并使钻头做轴向向下给进时,开始钻进,随着钻进,把井眼

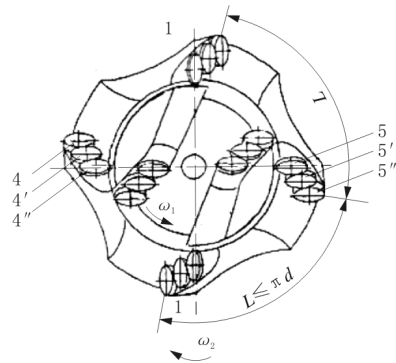


图6 钻头2个回转节逆向回转时俯视图

直径扩大到边缘切削具4''和5''位置决定的 d 。由于回转节6上的刀翼正面镶有PDC复合片切削具4、4'、4''和回转节7上的刀翼镶有PDC切削具5、5'、5'',而且它们距离回转中心线的距离不同,所以切削速度随着切削具远离回转中心线而增加,近于达到由岩石硬度和切削具耐磨性决定的切削速度临界值。

双节式钻头机械钻速取决于领眼钻进回转节6的可能钻进速度:

$$V_{机械} = S_n \times n_n = S_n / T_n$$

式中: $V_{机械}$ ——领眼回转节的机械钻速, mm/s;
 S_n ——领眼回转节每转的给进量, mm/r; n_n ——领眼回转节的转速, r/s; T_n ——领眼回转节每转的时间, s。

在领眼回转节6回转一圈的时间 T_n 内,整个钻头完成轴向移动 S_n ,而形成井筒回转节7的每一个刀翼3,在此时间内只完成自己回转一圈的一部分(见图6),以机械钻速 $V_{机械}$ 的速度破碎厚度为 $h = S_n$ 的岩石。

为了在 T_n 时间内,井底形成回转节7能够破碎整个井底,必须使这个回转节的刀翼数量 z 为:

$$z \geq \pi D / \pi d$$

式中: z ——井筒形成回转节的刀翼数量; D ——井筒形成回转节的最大直径, mm; d ——领眼回转节的最大直径, mm。

临界切削速度 $V_{临界}$ 是切削型钻头在坚硬岩石中应用范围的主要限制。在转速为 n_n 时,钻头切削具切削速度达到临界切削速度时的钻头直径称为临界直径 d 。

切削速度 $V_{切削}$ (m/s) 等于:

$$V_{切削} = \pi d n_n / (1000 \times 60) \leq V_{临界}$$

式中: $V_{切削}$ ——切削速度, m/s; n_n ——领眼回转节转

速, r/s ; d ——领眼回转节最大直径, mm ; $V_{\text{临界}}$ ——临界切削速度, m/s 。

领眼回转节 6 是多节式钻头受极限直径限制的钻头组成部分。

继续增加钻头直径时, 切削具 4、4'、4'' 将被损坏。为使切削具 4、4'、4'' 不被损坏, 距回转中心线最远的切削具 4'' 的切削速度不应超过极限切削速度。

以角速度 ω_2 回转的井筒形成回转节 7 的回转, 是通过位于钻头上方的行星减速器完成的。井筒形成回转节 7 固定在减速器的导杆上, 通过棘轮进行驱动。如果回转的棘轮轴固定在行星减速器不动壳体上, 则回转节 7 以较小的转速向左回转, 因为 $i = Z_b/Z_a$ (其中: i 为行星减速器的传动比; Z_b 为行星减速器内齿圈的齿数; Z_a 为行星减速器中心齿轮的齿数。见图 5 和图 6)。

在下一个回转节(井筒形成回转节)7 切削刀翼 3 上的切削具 5、5'、5'', 以角速度 ω_2 回转时, 这些切削具应与领眼回转节 6 上与其对应的切削具具有同样的切削速度, 即:

$$V_{\text{切削}} = \pi d n_n / (1000 \times 60) = \pi D n_c / (1000 \times 60) \leq V_{\text{临界}}$$
式中: $V_{\text{切削}}$ ——切削速度, m/s ; n_n ——领眼回转节转速, r/s ; n_c ——井筒形成回转节转速, r/s ; d ——领眼回转节最大直径, mm ; D ——井筒形成回转节最大直径, mm ; $V_{\text{临界}}$ ——临界切削速度, m/s 。

所以, 井筒形成回转节 7 的转速按下式计算:

$$n_c = (d/D) n_n$$

式中: n_c ——井筒形成回转节转速, r/s ; d ——领眼回转节最大直径, mm ; D ——井筒形成回转节最大直径, mm ; n_n ——领眼回转节转速, r/s 。

在与领眼回转节 6 完成完整一转时间相应的时间内, 在(井筒形成)回转节 7 上, 距回转节中心线最远的切削具, 只走过大直径 D 井筒形成回转节 7 回转一转的一部分路程(见图 6), 即:

$$L \leq \pi d$$

式中: L ——回转节 7 上切削具走过的距离, mm ; d ——领眼回转节最大直径, mm 。

在这种情况下, 切削速度不会超过临界切削速度^[15-18]。

如果需要, 可以把棘轮的轴固定在减速器的回转部分(导杆)上, 则钻头的回转节 6 和 7 以不同的转速同向(向右)回转($i = 1 + Z_b/Z_a$, 式中 i 为行星减速器的传动比; Z_b 为行星减速器内齿圈的齿数;

Z_a 为行星减速器中心齿轮的齿数), 参见图 7 和图 8^[18]。

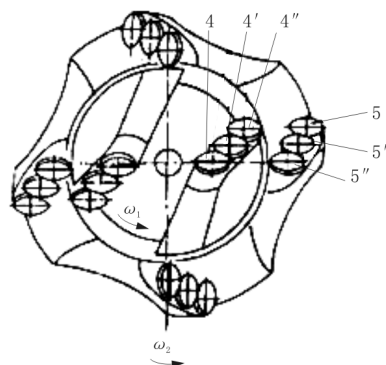


图 7 2 个回转节同向回转时的钻头俯视图

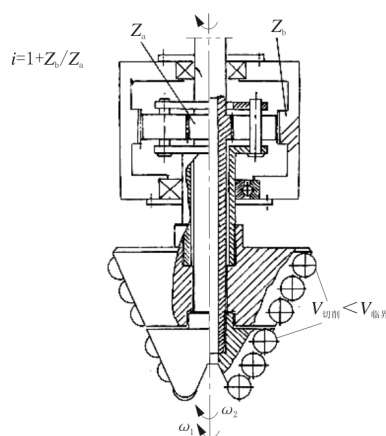


图 8 2 个回转节同向回转时的行星齿轮传动图

钻头在井底进行如下工作: 钻井液通过冲洗液泵出来, 经过钻杆柱、井底动力机、行星齿轮减速器和切削式钻头到达井底, 冷却回转的钻头, 把岩粉排送到地表。同时, 钻头通过井底动力进行回转。在钻头上方的行星齿轮减速器存在, 可以使钻头的 2 个回转节向相反方向回转, 转速与其直径成反比。

这种钻头结构具有创新性质, 已获俄罗斯发明专利, 专利号为 No2310732。经俄罗斯南方地质公司批准, 在卡尔梅吉亚共和国希尔-胡杜克地区奥列格夫矿区推广使用, 用这种钻头打了 22 口井, 按照全俄钻井技术研究所的计算方法, 每个钻头的经济效益为 27.5 万卢布^[13-14]。

3 讨论和建议

根据上述情况可以做如下讨论和建议。

(1) 试验研究表明, 切削具钻进坚硬岩石时, 切削具切削(破碎岩石)速度不应大于临界速度: $V_{\text{切削}} \leq V_{\text{临界}}$, 否则钻头切削具会产生毁灭性磨损。

(2)俄罗斯研究人员得到的结果表明,在用刮刀钻头钻进硬岩时,在轴载 $P_{轴}$ 一定情况下,在给定每转进尺条件下,机械钻速 $V_{机械}$ 几乎是不变的(7.6~7.9 mm/s),是个常数,并与回转速度 n 无关。这个结果很有启发,可以在保证机械钻速不变的情况下,来改变钻头不同部分的回转速度^[13-14]。

(3)Д-2BB 钻头包括有钻头体和切削刀翼。在钻头体上,装有2个圆锥形回转节:相对独立回转的领眼钻进回转节和并筒形成回转节,采用的行星齿轮减速器传动可以使其按相反方向回转($i = Z_b / Z_a$,其中 i 为行星减速器的传动比; Z_b 为行星减速器内齿圈的齿数; Z_a 为行星减速器中心齿轮的齿数)。通过改变 Z_b 和 Z_a 来改变传动比并合理设计和计算出了2个回转节直径 D 和 d 的大小,保证了镶有几个切削具的各个刀翼,不管它们在哪个回转节上,切削速度都是相同的,实现了等机械钻速的钻进工艺^[15-18]。

(4)Д-2BB 钻头由于采用的行星齿轮减速器传动并合理设计和计算确定了回转节的直径 D 和 d ,可以使2个回转器按相反方向回转,可以得到相同的切削速度,所以在单位时间内走过的切削路程都是一样的,走过的摩擦路程也是相同的,钻头各个部分的磨损强度是相同的,实现了等磨损的设计思想。

(5)Д-2BB 钻头由于采用的行星齿轮减速器传动,可以使2个回转器按相反方向回转,在这种情况下洗井时,在井底容易形成紊流型地带,有利于比较快速和高质量地排除井底岩粉,冷却钻头,润滑钻具和保护井壁。

(6)Д-2BB 钻头采用的行星齿轮减速器传动可以使钻头2个回转节逆向回转,有利于平衡井底破碎岩石时岩石对钻头的反力力矩,可以减小井眼偏斜。

(7)钻井时使用Д-2BB 钻头可以降低钻头回转阻力的力矩和给进压力的阻力力矩,有利于有效破碎井底岩石,从而提高了钻头的机械钻速。

总之,Д-2BB 钻头由于采用的行星齿轮减速器传动并合理设计和计算确定出了回转节的直径 D 和 d 的大小,所以排除岩粉情况改善了,机械钻速提

高了,实现了等磨损强度设计,提高了钻头进尺,钻探技术经济指标提高了,并在生产中得到了证实。这种钻头具有创新性质,值得研究,建议试验。

参考文献:

- [1] 左汝强. 国际油气井钻头发展概述(一)——Kymera 组合式(Hybrid)钻头系列[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(1): 4-6.
- [2] 左汝强. 国际油气井钻头发展概述(二)——Fuse 融合式钻头与Pexus组合钻头[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(2): 1-4.
- [3] 左汝强. 国际油气井钻头发展概述(三)——PDC 钻头发展过程及当今态势(上)[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(3): 1-8.
- [4] 吴焯, 王建华, 卢予北. “钻探+”在民生日地地质工作中的作用与地位[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(11): 1-5.
- [5] 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]. 湖北武汉: 中国地质大学出版社, 2014.
- [6] 朱恒银, 等. 深部岩心钻探技术与工程[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
- [7] 潘秉锁, 方小红. 金刚石工具的设计与制造[M]. 湖北武汉: 中国地质大学出版社, 2012.
- [8] 汤凤林, A. Г. 加里宁, 段隆臣. 岩心钻探学[M]. 湖北武汉: 中国地质大学出版社, 2009.
- [9] Чихоткин В. Ф., 高申友, 蒋国盛, 等. 关于金刚石钻进工艺优化几个问题的研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(9): 18-22.
- [10] 汤凤林, 高申友, Чихоткин В. Ф., 等. 纳米金刚石钻头试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(6): 76-80.
- [11] 汤凤林, Чихоткин В. Ф., 高申友, 等. 关于金刚石钻进规程参数合理配合的分析研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(10): 76-80.
- [12] 汤凤林, 彭莉, Чихоткин В. Ф., 等. 关于提高金刚石钻头胎体耐磨性的试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(1): 7-13.
- [13] А. Я. Третьяк, В. Ф. Чихоткин, Ю. Ф. Литкевич и др. Метод расчета осевой нагрузки и механической скорости бурения двухъярусного долота режущего типа [J]. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море, 2006, 3: 13-18.
- [14] А. Я. Третьяк, В. Ф. Чихоткин, Ю. Ф. Литкевич и др. Двухъярусное долото режущего типа Д-2ВВ [J]. Интервал, 2006, 01(84): 25-28.
- [15] Способ бурения направленных скважин: 俄罗斯, 2306399 [P].
- [16] Буровой инструмент: 俄罗斯, 2246603 [P].
- [17] Алмазная коронка для бурения: 俄罗斯, 148333 [P].
- [18] Многоярусное долото режущего типа: 俄罗斯, 2310732 [P].