

УДК 622.69

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИКИ БУРЕНИЯ РЕЗЦОВЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ



**Б.Т. РАТОВ<sup>1,2</sup>,**  
доктор технических наук, профессор



**Б.В. ФЕДОРОВ<sup>2</sup>,**  
доктор технических наук, профессор



**К.С. НАДИРОВ<sup>3</sup>,**  
доктор химических наук, профессор



**Д.Р. КОРГАСБЕКОВ<sup>2\*</sup>,**  
докторант

**А.Р. БАЙБОЗ<sup>2</sup>,** докторант

<sup>1</sup>Каспийский общественный университет,  
050000, г. Алматы, пр. Сейфуллина, 521

\*Автор для переписки. E-mail: [dkorgasbekov@gmail.com](mailto:dkorgasbekov@gmail.com)

<sup>2</sup>Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, 050013, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22

<sup>3</sup>Южно-Казахстанский государственный университет им. М.Ауэзова, 160012, г. Шымкент, пр. Тауке хана 5

*В работе установлена причина периодического «зависания» лопастных долот над центральной частью забоя скважины. Для устранения этого технологического осложнения использована модель вращательного бурения, основанная на одновременном горизонтальном и вертикальном перемещениях режущих элементов долота.*

*Решена задача о распределении осевой нагрузки, приложенной к долоту, вдоль лезвий (лопастей) инструмента. Показано, что наименьшая нагрузка действует на периферийные резцы лопастей; нагрузка на резцы возрастает в 8–10 раз в области, прилегающей к оси вращения долота. Для устранения чрезмерной нагрузки в упомянутой области рекомендуется выполнять укороченные лопасти с удалением резцов у оси вращения долота, а образующийся керн разрушать. Это повысит производительность и снизит энергоёмкость бурения лопастными долотами.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Лопастное долото, «зависание» над забоем, ось вращения, чрезмерная осевая нагрузка, укороченное лезвие, удаление резцов у оси.

## КЕСКІШТІ ҚҰРЫЛҒЫЛАРМЕН БҰРҒЫЛАУДЫҢ ТЕХНИКАСЫ МЕН ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЖЕТІЛДІРУ

**Б. Т. РАТОВ**<sup>1,2</sup>, техника ғылымдарының докторы, профессор

**Б. В. ФЕДОРОВ**<sup>2</sup>, техника ғылымдарының докторы, профессор

**К.С. НАДИРОВ**<sup>3</sup>, химия ғылымдарының докторы, профессор

**Д.Р. КОРГАСБЕКОВ**<sup>2\*</sup>, докторант

**А.Р. БАЙБОЗ**<sup>2</sup>, докторант

<sup>1</sup>Каспий қоғамдық университеті,  
050000, Алматы, Сейфуллин д-ы, 521

<sup>2</sup>Қ.И. Сатпаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті.  
050013, Алматы қ-сы. Сәтпаев к-сі, 22

<sup>3</sup>М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан мемлекеттік университеті,  
160012, Шымкент қ-сы, пр. Тауке хан 5

*Жұмыста ұңғыманың төменгі бөлігінің орталық бөлігінен қалақшалы қашаудың мерзімді «тұрып қалу» себептері анықталған. Бұл технологиялық асқынуды жою үшін қашау кесетін элементтерінің бір мезгілде көлденең және тік қозғалысына негізделген бұрылыс бұрғылау үлгісі пайдаланылды.*

*Құралдың жүздеріне (қалақшаларында) қашауға қолданылатын осьтік жүктемені бөлу мәселесі шешілді. Қалақшалардың перифериялық тетіктеріне ең аз жүктеме әсер ететіндігі көрсетілген; кескіштегі жүктеме қашау айналу осіне жақын аймақта 8–10 есе артады. Көрсетілген аймақта шамадан тыс жүктемені болдырмау үшін, қашаудың айналу осіне кедергі болатын кернді бұрғылап, қысқартылған қалақшаларды пайдалану. Бұл өнімділікті арттырады және қалақшалы қашаумен бұрғылаудың энергиялық қарқындылығын азайтады.*

**НЕГІЗГІ СӨЗДЕР:** қалақшалы қашау, ұңғы түбінде «тұрып қалу», айналу өсі, шамадан тыс осьтік жүктеме, қысқартылған кескіш, осьтердегі кескіштерді тойтару.

## IMPROVEMENT OF TECHNOLOGIES AND TECHNIQUES OF DRILLING WITH CUTTING TOOLS

**B. RATOV**<sup>1,2</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor  
**B. FEDOROV**<sup>2</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor  
**K. NADIROV**<sup>3</sup>, Doctor of Chemical Sciences, Professor  
**D. KORGASBEKOV**<sup>2\*</sup>, PhD student  
**A. BAIBOZ**<sup>2</sup>, PhD student

<sup>1</sup>Caspian Public University, Almaty,  
050000, Seifullin Ave, 521.

<sup>2</sup>Satpayev Kazakh National Research Technical University,  
050013, Almaty, Satpayev st., 22.

<sup>3</sup>South Kazakhstan State University M.Auezov,  
160012, Shymkent, Tauke Khan Ave 5.

*The work establishes the cause of the periodic «hanging» of blade bits over the central part of the bottom of a well. To eliminate this technological complication, a rotary drilling model based on simultaneous horizontal and vertical movements of the cutting elements of the bit was used. The problem of the distribution of the axial load applied to the bit along the blades (blades) of the tool has been solved. It is shown that the smallest load acts on the peripheral incisors of the blades; the load on the cutters increases by 8–10 times in the area adjacent to the axis of rotation of the bit. To eliminate excessive load in the mentioned area, it is recommended to perform shortened blades with removal of incisors at the axis of rotation of the bit, and crush the formed core. This will increase productivity and reduce the energy intensity of drilling with blade bits.*

**KEY WORDS:** Blade bit, «hanging» over the face, rotation axis, excessive axial load, short blade, removal of incisors at the axis.

**В** последние годы лопастные долота занимают все более расширяющуюся область эффективного применения при сооружениях скважин различного назначения. Это связано, прежде всего, с созданием алмазно-твердосплавных резцов (PDC), которыми начали оснащать лопастные инструменты вместо традиционного твердосплавного вооружения. В результате упомянутые долота с большим эффектом начали применяться не только в мягких, но и в неабразивных горных породах средней твердости и частично в твердых.

Вместе с тем существуют проблемы, осложняющие технологию и снижающие производительность бурения лопастными долотами. Одним из таких осложнений является так называемое «зависание» долота над центральной частью забоя скважины. Сущность этого явления заключается в том, что вращающийся инструмент на некоторое время прекращает углубление скважины, затем происходит медленное раздавливание породы в центре забоя, и бурение возобновляется до следующего «зависания» и т. д. Такое явление неоднократно наблюдалось и при бурении нефтяных скважин [1].

Для выявления сущности процесса «зависания» долота и выработке рекомендаций для его устранения, воспользуемся теорией вращательного бурения, разработанной профессором В.С. Владиславлевым [2].

Эта теория базируется на модели, представляющей процесс бурения, как одновременное сочетание вертикального и горизонтального перемещения резца. В результате такого сочетания резец движется по винтовой поверхности. Такая модель имеет несомненное преимущество при описании процесса бурения резанием мягких и средней твердости пластичных пород. Задача о «зависании» лопастного долота может быть достаточно просто решена с позиции упомянутой теории, один из основных принципов которой заключается в том, что глубина внедрения резца пропорциональна пути, им пройденным. Ниже приведены ее основополагающие принципы. [2, 3]

Тангенс угла  $\alpha$  наклона спирали, по которой двигаются резцы инструмента при углублении забоя:

$$\operatorname{tg} \alpha = 2q/A\delta, \quad (1)$$

где  $\delta$  – ширина конца индентора в направлении его движения;

$q$  – интенсивность вертикальной нагрузки;  $A$  – жесткость пары индентор – порода. Согласно работы [2] принято:

$$A = \frac{E}{1-\mu^2}, \quad (2)$$

где  $E$  и  $\mu$  – соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона породы.

С учетом условий работы породоразрушающего инструмента в бурящейся скважине:

$$q = \frac{Q}{kb}, \quad (3)$$

где  $Q$  – осевая нагрузка на долото;  $k$  – число резцов, перекрывающих ширину забоя;  $b$  – ширина забоя (по радиусу).

Исходя из формул (1) – (3) получена формула углубки забоя скважины за один оборот долота:

$$h = x_{об} \frac{2Q(1-\mu^2)}{bkE\delta\gamma}, \quad (4)$$

где  $x_{об}$  – длина окружности вращения резца, приведенная к середине его ширины;  $\gamma$  – коэффициент, учитывающий стесненные условия работы резцов в скважине. Принимается  $\gamma = 1,38$  [2].

Механическая скорость бурения:

$$V_m = hn, \quad (5)$$

где  $n$  – частота вращения долота.

При движении резца по забою он, преодолевая сопротивление породы, воздействует передней гранью на стенку породы с силой:

$$P = \sigma_{сд} bH, \quad (6)$$

где – предел прочности породы на сдвиг,  $b$  – ширина канавки,  $H$  – ее глубина. В свою очередь

$$H = h/K, \quad (7)$$

На передней грани резца сила  $P$  вызывает силу трения  $T$ , направленную вверх, противодействуя вертикальной нагрузке  $Q$ :

$$T = Pf, \quad (8)$$

где – коэффициент трения на контакте резец-порода. = 0,1–0,14.

Таким образом, истинное значение осевой нагрузки:

$$Q_{и} = Q - T. \quad (9)$$

Из (9) следует, что требуемая осевая нагрузка на долото, назначаемая на поверхности, для получения желаемого эффекта должна быть увеличена на силу  $T$  с учетом (6–8)

$$T = \frac{\tau_{сд} b Y_{ов} f}{K}. \quad (10)$$

Приведенные зависимости (1–9) дают возможность получить распределение нагрузки по радиусу лопастей долота и выяснить причину периодического «зависания» последнего.

При бурении к лопастному долоту приложена осевая статическая сила  $Q$  и крутящий момент, трансформирующийся в частоту вращения инструмента (рисунк 1). Разобьем мысленно каждое лезвие лопасти долота по ее длине  $R_{max}$  на необходимое количество равных участков (например, на 6, как показано на рисунке 1).

В работе при каждом обороте долота разные участки будут перемещаться по окружности, длина которых пропорциональна радиусу. Максимальный путь будут совершать резцы, расположенные у наружного края долота: резцы, расположенные вблизи центра, прибегают путь в разы меньше. Путь резца, расположенного на оси вращения долота, будет равен нулю.

Если бы участки кромки лезвия были бы никак друг с другом не связаны, то разные участки имели бы разную углубку на оборот, и тем большую, чем дальше от оси вращения они расположены. Но, поскольку речь идет об едином целом, то углубка для всех его участков не может не быть одинаковой. Одинаковая углубка для резцов, пробегающих разный путь, обеспечивается за счет перераспределения действующей на долото осевой нагрузки, а именно такой; когда осевая нагрузка на режущей кромке растет в направлении центра вращения. Это и является причиной «зависания» долота на его центральной части.

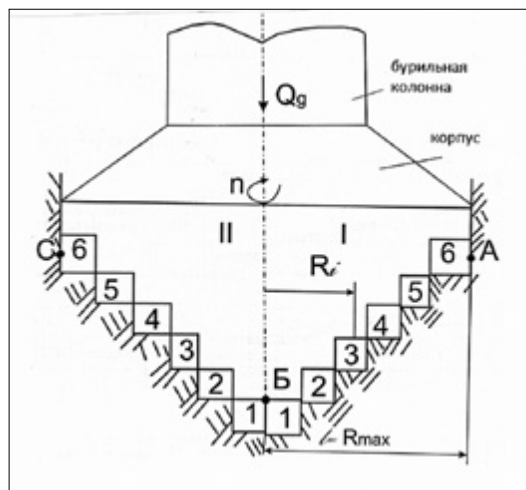


Рисунок 1 – Схема бурения пикообразным лопастным долотом  
 1,2,3...6 – режцы;  $R_i$  – радиус вращения  $i$ -го режца;  $R_{max}$  – максимальный радиус вращения;  
 I,II – лезвия (лопасти).

Допустим, что пикообразное долото имеет диаметр  $D$ , число лопастей –  $m$ , а на каждой лопасти размещено  $K$  режущих элементов  $i$ , считая от оси вращения (рисунок 1). Тогда расстояние от произвольного радиуса  $R_i$  середины  $i$ -того элемента до оси вращения определится по формуле:

$$R_i = 0,5b + b(i - 1), \quad (11)$$

где  $b$  – ширина  $i$ -го режущего элемента по лопасти от оси вращения пикобура. При равенстве длина режущих элементов  $b = D/2K$ ,

Если общая нагрузка на долото при бурении составляет  $Q_g$ , а число лопастей –  $m$ , то можно записать

$$Q_g = m \sum_1^k Q_i, \quad (12)$$

Используя формулы (8–16), приведенные в работе [3], получена следующая формула для определения осевой нагрузки для любого режца, расположенного на режущей кромке лопастного долота:

$$Q_i = h \left( \frac{E\delta\gamma}{4\pi(i-0.5)(1-\mu^2)} + \frac{D\sigma_{сдв}f}{2K} \right) H, \quad (13)$$

где  $h$  – глубина снимаемого слоя породы за один оборот долота, которая определяется из зависимости:

$$h = \frac{v_m}{n}, \quad (14)$$

где  $v_m$  – скорость бурения,  $n$  – частота вращения долота (1/сек),

Анализ формулы (13) показывает, что первые слагаемые в скобках зависят от положения режущего элемента на лопасти, т. е. от его радиуса вращения  $R_i$ , определяемому по формуле (11). Второе слагаемое от  $R_i$  не зависит.

Поясним распределение нагрузок  $Q_i$  по радиусу лопасти на конкретном примере при следующих исходных данных:  $D = 220\text{мм} = 0,22\text{м}$ ;  $\sigma_{\text{сдв}} = 40\text{МПа} = 4 \cdot 10^7 \text{ Па}$ ;  $\nu = 0,4$ ;  $K=6$ ;  $E=60000 \text{ МПа} = 6 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ ;  $\delta = 0,5\text{мм} = 0,0005\text{м}$ ;  $\mu = 0,3$ ;  $v_m = 18\text{м/ч} = 18/3600 = 0,005 \text{ м/с}$ ;  $\gamma = 1,38$ ;  $n = 100 \text{ об/мин} = 1,67 \text{ об/сек}$ ;  $m=4$ .

Расчет распределения осевой нагрузки по лопастям долота проводится в следующей последовательности:

1. Определяется глубина снимаемого за один оборот долота слоя породы по формуле (14);
2. Определяется ширина каждого резца (пояснение к формуле (11));
3. Определяются расстояния  $R_i$  от середины  $i$ -го резца до оси вращения по формуле (11) (в данном случае по шесть значений  $i$  и  $R_i$ );
4. Определяются нагрузки в точках лопасти для шести значений  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  и соответствующих значений  $R = R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$  по формуле (13);
5. Определяются общая нагрузка  $Q_i^*$  в упомянутых точках  $R_i$  с учетом количества лопастей по формуле (12).

Результаты расчетов  $Q_i$  и  $Q_i^*$  проведены в *таблице 1* и на *рисунке 2*.

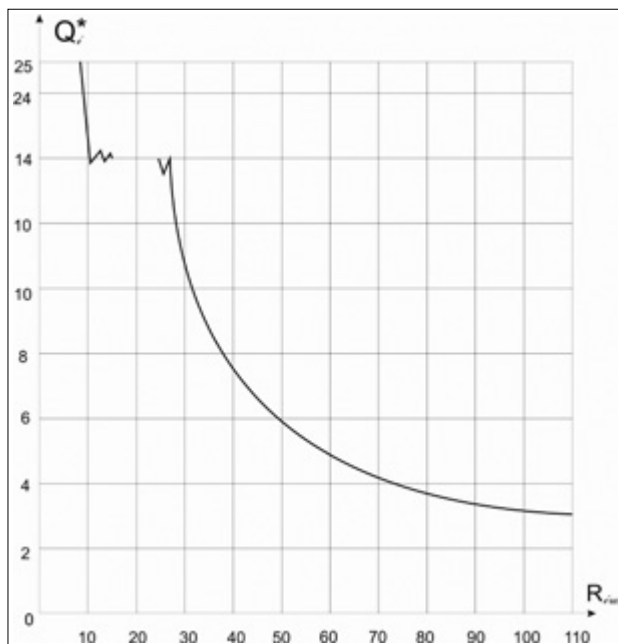
**Таблица 1 – Распределение осевой нагрузки на одну ( $Q_i$ ) и четыре лопасти ( $Q_i^*$ ) по радиусу лопасти пикообразного долота**

$i$	1	2	3	4	5	6
$R_i$ , мм	9,15	27,45	45,75	64,05	82,35	100,65
$Q_i$ , кН	6,3	3,27	1,5	1,12	0,92	0,80
Нагрузка на четыре лопасти, $Q_i^*$ , кН	25,2	13,08	6,0	4,48	3,65	3,20

Анализ *таблицы 1* и графика функции  $Q_i^* = f(R_i)$  (*рисунок 2*) показывает, что минимальная осевая нагрузка для бурения породы с заданной скоростью, находится на периферии долота при  $R_i = 110\text{мм}$ , где  $Q_i^*$  составляет всего 3 кН. Осевая нагрузка по оси долота напротив, достигает большой величины, возрастая до 25 кН, т. е. в 8 с лишним раз.

Естественное желание снять эту чрезмерную нагрузку за счет ликвидации нескольких ступеней лопастей долота, прилегающих к осевой зоне его вращения. Такое конструктивное решение имеют запатентованные пикообразные лопастные долота, в которых лопасти (лезвия) вблизи оси вращения ликвидированы, а конструкция инструмента снабжена пилотом, бурящим скважину малого диаметра [4–11]. Скважина затем расширяется укороченными лопастями до номинального размера. Однако здесь возникает другая проблема, связанная с рекомендацией определения рационального диаметра пилот-скважины.

Если минимальный диаметр пилот-скважины принять 40 мм, то, судя по графику (*рисунок 2*),  $Q^* = 16 \text{ кН}$ , что является достаточно большой величиной, увеличивающей энергоемкость бурения. Если принять диаметр керна 80 мм ( $R_i = 40 \text{ мм}$ ), то из графика  $Q_i^* = f(R_i)$  следует резкое снижение нагрузки ( $Q^* = 7 \text{ кН}$ ), и энергоемкости



**Рисунок 2 – Зависимость нагрузки  $Q_i^*$ , действующей на четыре лопасти пикообразного долота, в зависимости от радиуса вращения  $R$  режущих элементов**

бурения. Однако выбуриваемый керн будет достаточно массивный, что вызовет дополнительные проблемы с его разрушением.

### ВЫВОДЫ

1. Причиной «зависания» лопастного долота при вращательном бурении является перераспределение осевой нагрузки по лопастям долота от минимальной величины на периферии лопастей до ее резкого возрастания к оси долота, чтобы компенсировать уменьшение пути, пройденной резцом в этой зоне.

2. Для устранения негативного влияния «зависания» долота необходимо решить две разнонаправленные задачи:

– бурение пилот-скважины достаточно малым диаметром: малый диаметр колонкового бурения позволяет достаточно просто решить проблемы разрушения формируемого керна, но не может снять чрезмерную нагрузку, действующую на часть лезвия долота, примыкающую к оси его вращения.

– бурение пилот-скважины увеличенным диаметром по сравнению с ранее рассмотренным. С увеличением диаметра колонкового бурения проблема разрушения формируемого керна становится сложнее, но чрезмерная нагрузка устраняется на большой длине лезвий долота, примыкающей к оси вращения последнего;

3. Окончательное решение упомянутой противоречивой задачи следует искать в направлении минимальной энергоемкости бурения скважины пикообразными лопастными долотами. 📌



## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Дик Гисмин. Технологическое сопровождение совершенствования буровых долот // Offshore (Russia). – 2013. – № 1. – С. 42– 45. [Dick Gismin. Technological support for the improvement of drill bits // Offshore (Russia). – 2013. – № 1 – P. 42–45].
- 2 Владиславлев В.С. Разрушение горных пород при бурении скважин. –М.: Гостоптехиздат, 1958. – 242 с. [Vladislavlev V.S. The destruction of rocks during drilling. – M.: Gostoptekhizdat, 1958. – 242.]
- 3 Билецкий М.Т., Ратов Б.Т., Байбоз А.Р. Использование компьютерных пользовательских программ для анализа теоретических моделей разрушения горных пород при бурении скважин // Новости науки Казахстана. – 2018. – № 3. – С. 80–93. [Biletsky M.T., Ratov B.T., Bayboz A.R. The use of computer user programs for the analysis of theoretical models of rock destruction during drilling // Science News of Kazakhstan. – 2018. – № 3. – P. 80–93.]
- 4 Вуујdfwbjyуsq Патент РК № 32993 Буровое долото типа покобур авторы: Аубакиров М.Т., Федоров Б.В., Косьминов С.Г. опубл. 06.08.2018
- 5 Инновационный патент № 31414 РК. Билецкий М.Т. и др. Опубл.15.08.2016. Бюлю № 10. [Innovative patent of the Republic of Kazakhstan № 31414 / Biletsky M.T. and others. Publ. 15.08.2016. Bull. 10.]
- 6 Инновационный патент на изобретение № 33077 РК. Ратов Б.Т. и др. Буровая долото типа пикобур. Опубл. 10.09.2018. Бюл. № 34. [Innovative patent of the Republic of Kazakhstan № 33077 / Ratov B.T. and others. Drill bit type picobur. Publ. 10.09.2018. Bull. 34.]
- 7 Sudakov A.K., Khomenko O.Ye., Isakova M. L., Sudakova D.A. Concept of numerical experiment of isolation of absorptive horizons by thermoplastic materials // Scientific bulletin of National Mining University. – 2016. – № 5 (155). – Pp. 12–16.
- 8 Khomenko O. Ye., Sudakov A.K., Malanchuk Z. R., Malanchuk Z. Ye. Principles of rock pressure energy usage during underground mining of deposits // Scientific Bulletin of NMU. – 2017. – № 2 (158). – Pp. 34–43.
- 9 Федоров Б.В., Хузина Л.Б., Ратов Б.Т., Шараяова А.Б. Моделирование процесса углубления скважины долотами PDC // Нефть и Газ. – 2017. – № 4. – С. 77–85. [Fedorov, B.V., Khuzina, L.B., Ratov, B.T., Sharauova, A.B. Modeling the process of well deepening with PDC bits // Oil and Gas. – 2017. – № 4. – Pp. 77–85.]
- 10 Biletsky M. T., Ratov B. T., Baiboz A. R. Theoretical justification of an automatic device for drilling mud funnel viscosity measurement // News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of geology and technical sciences. – 2017. – Vol. 4. – № 424. – P. 123 – 132.
- 11 Ratov B. T., Fedorov B. V., Sabirov B. F., Korgasbekov D. R. Research parameters of an ejector knot of device for coring from deep well // News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan series of geology and technical sciences. – 2017. – Vol. 3. – № 423. – P. 143 – 150.