УДК 622.24.051

ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ ОПОРНОГО УЗЛА НА ЗАГРУЖЕННОСТЬ ВЕНЦОВ ШАРОШЕК ДОЛОТА

Пяльченков В.А.

ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет» Минобрнауки России, Тюмень, e-mail: general@tsogu.ru

Экспериментально установлено, что осевая нагрузка распределяется неравномерно по венцам и шарошкам долота. Наибольшую нагрузку воспринимают средние венцы. Одним из факторов, обусловливающих эту неравномерность, является жесткость опорного узла шарошки, изменяющаяся в зависимости от радиуса приложения усилия. Приводятся результаты аналитического исследования вертикальной жесткости узла шарошки, установленной на трех подшипниках качения на деформируемой цапфе с учетом контактной деформации деталей подшипников. С целью проверки результатов аналитических расчетов проведены экспериментальные измерения вертикального перемещения шарошек долота при контакте их с забоем зубками различных венцов. Аналитические и экспериментальные результаты хорошо коррелируют и позволяют сделать вывод о том, что вертикальная жесткость шарошечного узла имеет максимальное значение при контакте с забоем средних венцов шарошки. Это обусловлено тем, что нагрузка воспринимается всеми тремя подшипниками, что подтверждают исследования на модели опорного узла, изготовленной из оптически чувствительного материала. Полученные результаты могут использоваться для оптимизации конструкции вооружения и опор шарошечных долот на стадии их проектирования.

Ключевые слова: бурение, долото, шарошка, опора, вооружение шарошки, нагрузка, жесткость

THE EFFECT OF STIFFNESS OF THE SUPPORT ASSEMBLY ON THE WORKLOAD OF THE CUTTERS BITS

Pyalchenkov V.A.

Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, e-mail: general@tsogu.ru

It was established experimentally that the axial load is distributed unevenly on the crowns and the cutter bits. The greatest load average perceive the crowns. One of the factors contributing to this irregularity is the rigidity of the reference node of the milling cutter, changing depending on the radius of application of force. The results of analytical studies of the vertical rigidity of the node of the milling cutter, mounted on three ball bearings on the trunnion with deformable into account contact deformation of bearing components. To verify the results of analytical calculations experimental measurements of vertical movement of the cutter bit in contact with the bottom teeth different crowns. Analytical and experimental results correlate well and suggest that the vertical stiffness of the roller node has a maximum value when in contact with the bottom of the middle frame sets of the milling cutter. This is due to the fact that the load perceived by all three bearings, which is confirmed by research on the model of the support Assembly, made of optically sensitive material. The obtained results can be used to optimize the design of the arms and bearings of roller bits under design.

Keywords: drilling, bit, cutter, support, cutter arms, the load, stiffness

Обследования шарошечных долот, отработанных при бурении скважин на нефть и газ и взрывных скважин на карьерах показали значительную неравномерность изнашивания и разрушения, как элементов вооружения, так и опорных узлов [2, 14]. Одной из основных причин этого является неравномерная загруженность отдельных элементов долот. Аналитические и экспериментальные исследования [1, 3, 5, 7] показали, что осевая нагрузка, действующая на долото, распределяется неравномерно как по шарошкам и венцам каждой шарошки, так и по подшипникам опоры. В то же время результаты исследований также зачастую носят противоречивый характер. Некоторые исследователи утверждают, что более нагруженными являются периферийные венцы, другие, что вершинные. Эти противоречия объясняются как сложным характером процесса взаимодействия шарошечного долота с забоем, зависящим от большого числа факторов, так и сложностью конструкции долота. А так как исследования проводились на долотах разных типоразмеров, то их результаты сложно сравнивать и обобщать. В процессе бурения каждая шарошка, перекатываясь по забою, совершает сложное движение, складывающееся из вращения шарошки вокруг оси цапфы, вращения вокруг вертикальной оси долота и вертикального поступательного движения по мере разрушения горной породы. Максимальное осевое усилие действует на зубок в момент перехода его через вертикальное положение. А так как зубки венцов шарошки смещены друг относительно друга по образующим, то наиболее часто каждая шарошка будет контактировать с забоем лишь одним зубком, находящимся в вертикальном положении. Это особенно справедливо при бурении крепких и особо крепких

пород, разрушение которых происходит весьма трудно и медленно. Исходя из этого, можно допустить, что каждая шарошка опирается на забой только одним зубком. Тогда долото можно представить в виде корпуса, опирающегося на забой упругими элементами (пружинами), число которых равно числу шарошек долота (рис. 1).

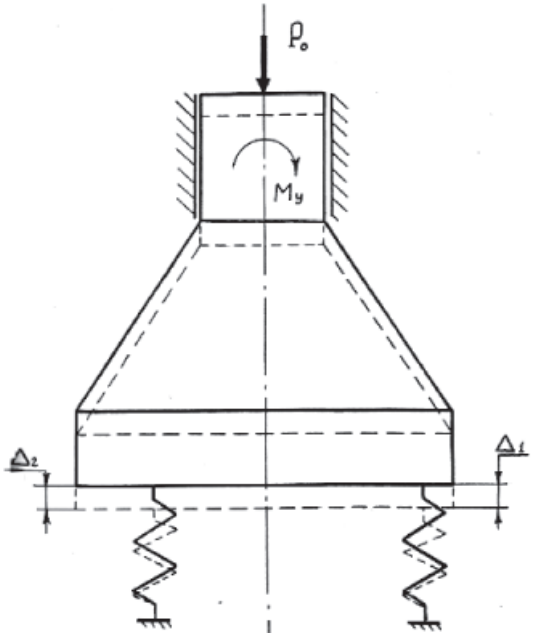

Рис. 1. Расчетная схема перемещения корпуса долота под действием осевой нагрузки

Если не учитывать перекосы долота, то доля осевой нагрузки, приходящейся на каждую шарошку (пружину), зависит от ее жесткости, так как вертикальное перемещение шарошек при принятых допущениях будет одинаковым. Исходя из этого, было сделано предположение, что одним из факторов, влияющих на распределение нагрузки по вооружению шарошек, является вертикальная жесткость системы «долото – забой». В работе [8] приводятся результаты аналитического исследования вертикальной жесткости узла шарошки, установленной на трех подшипниках качения на деформируемой цапфе с учетом контактной деформации деталей подшипников (рис. 2).

Деформация корпуса шарошки будет незначительной по сравнению с деформацией цапфы и контактными деформациями в подшипниках, и ею можно пренебречь. Таким образом, перемещение шарошки будет происходить за счет деформации цапфы и упругих контактных деформаций в подшипниках. Из условия равновесия шарошки и условия совместной деформаций деталей опоры в результате расчетов получены зависимости, позволяющие определить величины реакций в подшипниках и вертикальные перемещения зубка шарошки, взаимодействующего с забоем при различных вариантах приложения нагрузки к шарошке. Результаты расчетов позволили сделать вывод о том, что вертикальная жесткость шарошечного узла имеет максимальное значение при контакте с забоем средних венцов шарошки.

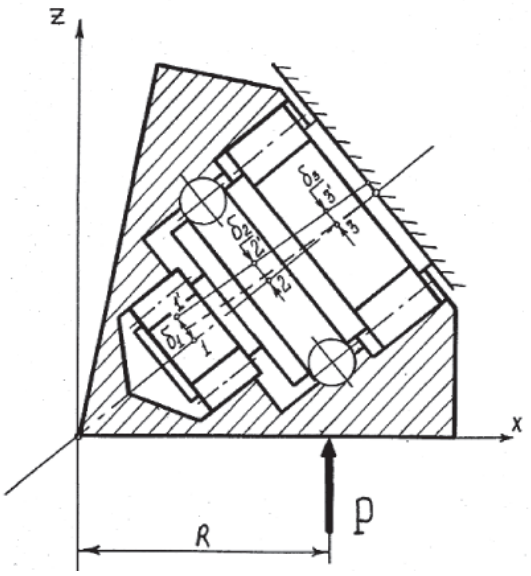

Рис. 2. Расчетная схема шарошечного узла

С целью проверки результатов аналитических расчетов были проведены экспериментальные измерения вертикального перемещения шарошек долота Ш215,9К-ПВ при контакте их с забоем зубками различных венцов [9]. Измерения производились на испытательном стенде, где с помощью специального приспособления и набора индикаторов часового типа снималась диаграмма «осевая нагрузка – вертикальное перемещение венца». На рис. 3 приведена схема измерения вертикальных перемещений венцов шарошки.

Долото 1, установленное в шпинделе стенда и дополнительно закрепленное на корпусе редуктора, опирается на забой 2 зубками одного венца одной шарошки. На долото с помощью гидросистемы стенда создается осевая нагрузка, изменяющаяся ступенчато от 0 до 40 кН. При каждом значении усилия на долото индикаторами 3, 4, 5, 6, неподвижно закрепленными на стойках, замеряются перемещения различных точек шарошки, и в результате пересчета определяется вертикальное перемещение интересующей нас точки шарошки. Если сравнить экспериментальные зависимости с результатами расчетов, то при наличии значительных количественных различий

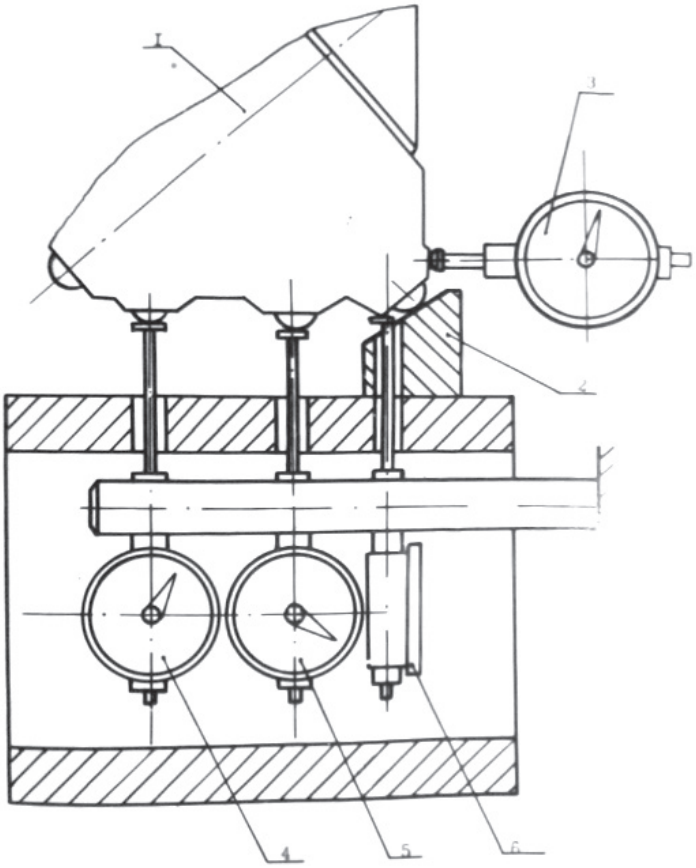

Рис. 3. Схема измерения вертикальных перемещений шарошки:
1 – долото; 2 – забой; 3, 4, 5, 6 – индикаторы

в полученных результатах качественная закономерность сохраняется. На рис. 4 приведены зависимости вертикального перемещения шарошки от радиуса приложения усилия, полученные в результате расчетов и экспериментально при осевой нагрузке на шарошку 20 кН. Обе зависимости имеют минимум, однако положение этого минимума различное. В результате экспериментальных измерений установлено, что наименьшее вертикальное перемещение (наибольшая вертикальная жесткость) шарошки наблюдается при радиусе приложения нагрузки равном 70 мм. Расчетами же установлено, что наибольшая вертикальная жесткость при принятых допущениях должна иметь место при радиусе приложения нагрузки равном 90 мм. При радиусе приложения нагрузки меньшем 60 мм разница между расчетными величинами вертикальных перемещений шарошек и фактическими перемещениями не превышает 0,15 мм. Расчетные значения перемещений при радиусе меньшем 70 мм больше фактических, а при радиусе большем 70 мм – меньше фактических.

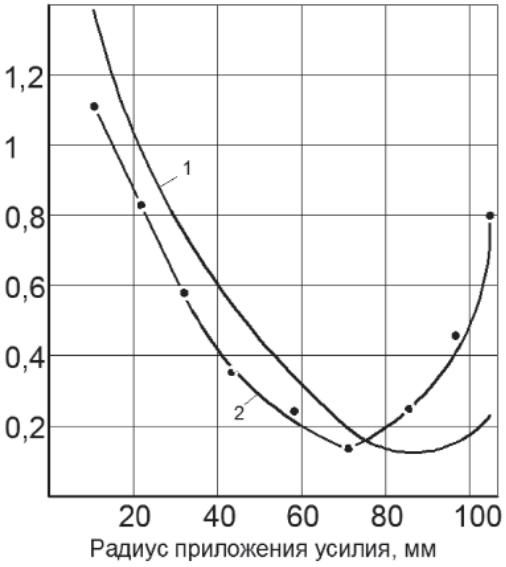

Рис. 4. Расчетная и экспериментальная зависимости перемещений шарошки от радиуса приложения нагрузки (P = 20 кН):
1 – расчетное значение;
2 – фактическое значение

Однако при радиусе приложения нагрузки равном 100 мм отличие расчетных перемещений от фактических достигает уже 0,4 мм, т.е. фактические перемещения почти в три раза превышают расчетные. Столь существенные различия в результатах обусловлены, вероятно, теми допущениями, которые были введены при расчете деформации и усилий [5, 8] в деталях опоры шарошки. Так, при расчетах было принято, что зазоры в подшипниках равны нулю и нагрузка воспринимается всеми тремя подшипниками. Кроме того, при определении контактных деформаций и перемещений в роликовых подшипниках предполагалось, что нагрузка распределена равномерно вдоль образующей ролика и ее равнодействующая приложена в середине линии контакта. В реальных условиях из-за наличия зазоров в подшипниках и разных величин суммарных деформаций в концевом и периферийном роликовых подшипниках, происходит перекос шарошки на цапфе. Это приводит к перераспределению удельных нагрузок вдоль линий контакта роликов с цапфой и шарошкой, что, на наш взгляд, существенно уменьшает контактную жесткость в роликовых подшипниках. При дальнейшем увеличении радиуса приложения нагрузки расчетная осевая жесткость системы вновь несколько снижается. Изменение осевой жесткости шарошечного узла при изменении радиуса приложения внешней нагрузки на шарошку обусловлено изменением напряженного состояния деталей опоры шарошки, что подтверждено как аналитически [5, 6], так и экспериментально на модели опорного узла шарошки [4, 11]. При изменении радиуса приложения внешней нагрузки происходит перераспределение нагрузки между подшипниками.

В результате экспериментальных исследований загруженности вооружения шарошечных долот, проведенных по новой методике [10, 15] с использованием оригинального измерительного устройства, установлено, что осевая нагрузка и вращающий момент распределяются по вооружению долот весьма неравномерно. Наибольшую по величине осевую нагрузку для долот исследуемых типоразмеров воспринимают венцы, расположенные в средней части радиуса долота.

Из них наиболее загруженным является венец, расположенный на радиусе **долота** R = 70–71 мм. Причем эта неравномерность сохраняется при различном конструктивном исполнении вооружения. Исследование напряженного состояния деталей опорного узла плоской модели позволило установить, что в этом случае нагрузка воспринимается всеми тремя подшипниками опорного узла и система «шарошка – забой» имеет наибольшую вертикальную жесткость. Экспериментально и теоретически доказана связь между вертикальной жесткостью шарошечного узла и долей общей осевой нагрузки, воспринимаемой шарошкой. Если каждая из трех шарошек опирается на забой только одним зубком, то наибольшую осевую нагрузку будет воспринимать та из них, вертикальная жесткость которой в данном положении будет больше. На рис. 5 показана схема опорного узла шарошки исследуемых долот, совмещенная с зависимостями изменения загруженности и вертикального перемещения венцов от их положения на образующей шарошки. Этот рисунок наглядно подтверждает вывод о том, что относительная загруженность различных венцов шарошек долота зависит от их вертикальной жесткости, определяемой главным образом конструкцией опорного узла и положением венца на шарошке.

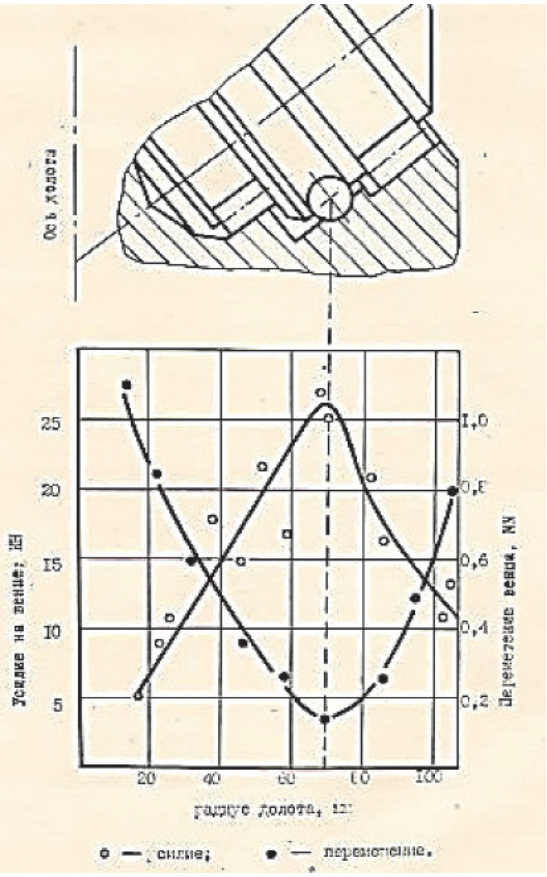

Рис. 5. Влияние положения венцов шарошек на их загруженность и жесткость

Полученные результаты позволяют проанализировать существующие конструкции долот с точки зрения загруженности их элементов и предложить рекомендации

по их оптимизации, что и было подтверждено в результате промысловых испытаний опытных долот с уменьшенной неравномерностью распределения осевой нагрузки по элементам вооружения [14].

Список литературы

1. Долгушин В.В., Кулябин Г.А. Метод расчета усилий в подшипниковом узле шарошки бурового долота // Известия вузов. Нефть и газ. – 2012. – № 2. – С. 49–56.

2. Пяльченков В.А. Повышение работоспособности шарошечных долот путем рационального распределения нагрузок по элементам вооружения: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук // Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина. – М., 1983. 216 с.

3. Пяльченков В.А. Повышение работоспособности шарошечных долот путем рационального распределения нагрузок по элементам вооружения: автореф. дис. … канд. техн. наук. – М., 1983. – 23 с.

4. Пяльченков В.А. Исследование распределения нагрузки между подшипниками опоры шарошечного долота с использованием фотоупругой модели // Известия вузов. Нефть и газ. – 2014. – № 1. – С. 57–61.

5. Пяльченков В.А. Аналитическое определение реакций в опорах шарошечного долота // Известия вузов. Нефть и газ. – 2014. – № 3. – С. 66–72.

6. Пяльченков В.А. К оценке долговечности подшипников опоры шарошечного долота // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – URL: www.science-education.ru/120-16677 (дата обращения: 08.01.2015).

7. Пяльченков В.А. Методы исследования нагруженности вооружения и подшипников опоры шарошечных долот // Известия вузов. Нефть и газ. – 2015. – № 1, – С. 88–95.

8. Пяльченков В.А. Аналитическое исследование деформируемости деталей шарошечного долота // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – URL: www.science-education.ru/121-17246 (дата обращения: 02.02.2015).

9. Пяльченков В.А. Экспериментальное исследование деформируемости элементов шарошечного долота // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – URL: www.science-education.ru/121-17926 (дата обращения: 05.04.2015).

10. Пяльченков В.А. Стенд для исследования загруженности вооружения шарошечных долот// Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – URL: www.science-education.ru/129-21473 (дата обращения: 28.08.2015).

11. Пяльченков В.А. Моделирование загруженности подшипников опоры шарошечного долота // Механика и процессы управления. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – С. 105–109.

12. Пяльченков В.А. Способ уменьшения неравномерности распределения осевой нагрузки по вооружению шарошечных долот // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12–5. – С. 945–949. – URL: http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id = 39656 (дата обращения: 13.01.2016).

13. Пяльченков В.А. Испытания шарошечного долота с уменьшенной неравномерностью распределения осевой нагрузки по элементам вооружения // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 1–1. – С. 48–52. – URL: http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id = 39791 (дата обращения: 12.02.2016).

14. Пяльченков В.А. Критерии работоспособности вооружения буровых шарошечных долот // Известия вузов. Нефть и газ. – 2016. – № 1.

15. Устройство для исследования шарошечного долота; а.с. 840268 СССР: МКИЗ Е 21 В 9/08 / В.Н. Виноградов, В.А. Коротков, А.Н. Пашков, А.Ф. Брагин, В.А. Пяльченков. – № 2729036/22-03; заявл. 23.02.79; опубл. 23.06.81, Бюл. № 23. – 4 с.: черт.

References

1. Dolgushin V.V., Kulyabin G.A. Metod rascheta usilij v podshipnikovom uzle sharoshki burovogo dolota // Izvestiya vuzov. Neft i gaz. 2012, no. 2. pp. 49–56.

2. Pyalchenkov V.A. Povyshenie rabotosposobnosti sharoshechnykh dolot putem ratsionalnogo raspredeleniya nagruzok po ehlementam vooruzheniya: dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Rossijskij gosudarstvennyj universitet nefti i gaza imeni I.M. Gubkina. Moskva, 1983, 216 p.

3. Pyalchenkov V.A. Povyshenie rabotosposobnosti sharoshechnykh dolot putem ratsionalnogo raspredeleniya nagruzok po ehlementam vooruzheniya: Avtoref. dis…. kand. tekhn. nauk. Moskva, 1983, 23 p.

4. Pyalchenkov V.A. Issledovanie raspredeleniya nagruzki mezhdu podshipnikami opory sharoshechnogo dolota s ispolzovaniem fotouprugoj modeli // Izvestiya vuzov. Neft i gaz. 2014. no. 1. pp. 57–61.

5. Pyalchenkov V.A. Analiticheskoe opredelenie reaktsij v oporakh sharoshechnogo dolota // Izvestiya vuzov. Neft i gaz. 2014. no. 3. pp. 66–72.

6. Pyalchenkov V.A. K otsenke dolgovechnosti podshipnikov opory sharoshechnogo dolota // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. no. 6; URL: www.science-education.ru/120-16677 (data obrashheniya: 08.01.2015).

7. Pyalchenkov V.A. Metody issledovaniya nagruzhennosti vooruzheniya i podshipnikov opory sharoshechnykh dolot // Izvestiya vuzov. Neft i gaz. 2015, no. 1, pp. 88–95.

8. Pyalchenkov V.A. Analiticheskoe issledovanie deformiruemosti detalej sharoshechnogo dolota // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2015. no. 1; URL: www.science-education.ru/121-17246 (data obrashheniya: 02.02.2015).

9. Pyalchenkov V.A. EHksperimentalnoe issledovanie deformiruemosti ehlementov sharoshechnogo dolota // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2015. no. 1; URL: www.science-education.ru/121-17926 (data obrashheniya: 05.04.2015).

10. Pyalchenkov V.A. Stend dlya issledovaniya zagruzhennosti vooruzheniya sharoshechnykh dolot// Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2015. no. 2; URL: www.science-education.ru/129-21473 (data obrashheniya: 28.08.2015).

11. Pyalchenkov V.A. Modelirovanie zagruzhennosti podshipnikov opory sharoshechnogo dolota // Mekhanika i protsessy upravleniya. Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferentsii. Tyumen: TyumGNGU, 2015. pp. 105–109.

12. Pyalchenkov V.A. Sposob umensheniya neravnomernosti raspredeleniya osevoj nagruzki po vooruzheniyu sharoshechnykh dolot// Fundamentalnye issledovaniya. 2015. no. 12–5; pp. 945–949; URL: http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id = 39656 (data obrashheniya: 13.01.2016).

13. Pyalchenkov V.A. Ispytaniya sharoshechnogo dolota s umenshennoj neravnomernostyu raspredeleniya osevoj nagruzki po ehlementam vooruzheniya // Fundamentalnye issledovaniya. 2016. no. 1–1. pp. 48–52; URL: http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id = 39791 (data obrashheniya: 12.02.2016).

14. Pyalchenkov V.A. Kriterii rabotosposobnosti vooruzheniya burovykh sharoshechnykh dolot // Izvestiya vuzov. Neft i gaz. 2016. no. 1.

15. Ustrojstvo dlya issledovaniya sharoshechnogo dolota; a.s. 840268 SSSR: MKIZ E 21 V 9/08 / V.N. Vinogradov, V.A. Korotkov, A.N. Pashkov, A.F. Bragin, V.A.Pyalchenkov. no. 2729036/22-03; zayavl.23.02.79; opubl.23.06.81, Byul. no. 23. 4 p.: chert.