

Исследование загруженности вооружения шарошечного долота в зависимости от погрешностей его изготовления

В. А. Пяльченков*, Д. В. Пяльченков, В. В. Долгушин, Г. А. Кулябин

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

**e-mail: pial228@rambler.ru*

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований загрузки вооружения шарошечного долота в зависимости от погрешностей его изготовления. Результаты промысловых исследований долот указывают на существенное снижение стойкости опор шарошек, элементов вооружения и проходки на долото с увеличением разнорысочности шарошек. Одной из причин снижения стойкости опор и вооружения в этом случае является неравномерное распределение осевой нагрузки по секциям. Для установления количественных закономерностей между показателями точности изготовления долот и загруженностью вооружения была испытана партия долот, разнорысочность которых изменялась в пределах от 0,34 до 1,28 мм. Испытания проводились на специальном стенде, позволяющем определить величину осевой силы, действующей на отдельные венцы каждой шарошки долота. Установлено, что при неблагоприятном сочетании взаимного положения шарошек, даже в пределах допуска на разнорысочность, осевая нагрузка, действующая на одну шарошку, может изменяться почти в два раза. Результаты исследований позволяют более обоснованно подходить к назначению показателей точности изготовления долот.

Ключевые слова: бурение; долото; шарошка; вооружение шарошки; нагрузка

Studying load of the cutting structure of rolling cutter bit depending on the errors of its manufacture

Vladimir A. Pyalchenkov*, Dmitry V. Pyalchenkov, Vladimir V. Dolgu-shin, Gennadiy A. Kulyabin

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**e-mail: pial228@rambler.ru*

Abstract. The article deals with the results of experimental studies of the load of the cutting structure of rolling cutter bit depending on the errors of its manufacture. The results of field studies of bits indicate a significant decrease in the resistance of the supports of the rollers, the elements of the cutting structure and sinking on the bit with an increase in the height of the rollers. One of the reasons for reducing the resistance of supports and cutting structure in this case is the uneven distribution of the axial load in the sections. We have tested a batch of bits to establish quantitative regularities between the accuracy of bit production and the load of the cutting structure. The difference in height of chosen bits is varied from 0,34 to 1,28 mm. We have carried out the tests on a special stand, which allowed us to determine the value of the axial force acting on the individual crowns of each cutter bit. It is established that with an unfavorable combination of the mutual position of the rollers, even within the tolerance of the difference in height, the axial load acting on one roller can change almost twice. The results of studies allow investigating the appointment of indicators of accuracy of bit production more reasonable.

Key words: well drilling; bit; roller; cutting structures of roller; load

Введение

При бурении глубоких скважин на нефть и газ, а также взрывных скважин на горнорудных карьерах широко применяются шарошечные долота. Шарошки долота, нагруженного осевой силой от веса бурильной колонны или гидравлическим усилием, при его вращении перекатываются по породе и разрушают ее. Долговечность вооружения и опоры буровых шарошечных долот зависит от многих факторов, таких как осевая нагрузка на долото, частота вращения, характеристики разрушаемых пород, свойства и состав промывочной жидкости, конструкция долота, качество изготовления его деталей, свойства материалов. Шарошечные долота работают в весьма тяжелых условиях, подвергаясь воздействию высоких статических и динамических нагрузок, абразивной и коррозионной среды, ударам и вибрациям. Долговечность вооружения шарошек, непосредственно разрушающего горную породу, во многом определяет основные показатели эффективности процесса бурения. В связи с этим вопросам износа и разрушения вооружения посвящено значительное число исследований. При этом наиболее полно исследованы вопросы долговечности долот с фрезерованным вооружением [1–4]. С расширением области применения шарошечных долот, оснащенных твердосплавным вооружением, приобретают первостепенное значение вопросы, связанные с повышением их эффективности и долговечности. В настоящее время для изготовления зубков применяют главным образом вольфрамосодержащие твердые сплавы ВК4В, ВК8ВК, ВК11ВК, ВК15. Эти материалы благодаря их высокой твердости хорошо противостоят абразивному изнашиванию [2, 5]. Вместе с тем, имея сравнительно низкую ударную вязкость и невысокое сопротивление действию растягивающих напряжений, эти материалы имеют склонность к хрупкому разрушению [5–8]. Проведенные исследования влияния состава, структуры, размеров карбидной фазы и особенностей технологии изготовления твердосплавных зубков на их прочность, долговечность и износостойкость позволили более обоснованно подходить к выбору твердосплавного материала зубков для различных типов бурового инструмента [9, 10]. Перспективными являются исследования, имеющие целью отыскать возможность замены используемых в буровом долоте дорогостоящих и дефицитных вольфрамосодержащих материалов на более дешевые и не уступающие им по стойкости. В процессе бурения шарошки долота перекатываются по забою, и зубки последовательно входят в контакт с породой, подвергаясь при этом сложному силовому воздействию. При взаимодействии зубка с забоем силы, действующие на зубок со стороны разрушаемой породы, постоянно изменяются, изменяя напряженное состояние материала зубка. В результате продольных колебаний долота, вызываемых рядом причин, взаимодействие зубков с породой носит ударный характер [2, 11–13]. Кроме того, зубки вооружения шарошек не только перекатываются, но и проскальзывают по забою, что приводит к их изнашиванию. Анализ состояния твердосплавного вооружения отработанных в промысловых условиях долот различной конструкции показал, что в процессе работы имеют место самые разнообразные виды изнашивания и разрушения [14].

Надежность и долговечность бурового инструмента зависят от многих конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, в том числе от величин усилий, действующих на их элементы в процессе работы. Результаты расчетно-аналитического и экспериментального методов определения загруженности рабочих элементов вооружения шарошечных долот, полученные даже при нулевой или близкой к нулю величине разницы высот шарошек, показали значительную перегруженность отдельных секций долота [15–17]. В то же время имеющая место в практике производства долот разницы высот шарошек будет дополнительно оказывать существенное и неблагоприятное влияние на перераспределение осевой нагрузки, вызывая в ряде случаев еще большую степень перегрузки отдельных элементов долота.

Стендовыми и промысловыми исследованиями работоспособности шарошечных долот, изготовленных с различной степенью отклонения основных геометрических параметров от номинальных значений, установлено отрицательное влияние этих отклонений на основные показатели работы долота. В частности, результаты промысловых исследований нескольких групп шарошечных долот различных типов указывают на существенное снижение стойкости опор шарошек и проходки на долото с увеличением разновысотности шарошек. Отмечается, что с увеличением твердости разбуриваемых пород отрицательное влияние разновысотности на стойкость опор шарошек возрастает. Одной из причин снижения стойкости долот с увеличением разновысотности шарошек является неравномерное распределение осевой нагрузки по секциям долота, вызывающее опережающий износ и разрушение элементов вооружения и опорных узлов отдельных шарошек.

Вопрос о влиянии разновысотности на загруженность элементов долота изучен еще недостаточно. Все известные исследования выполнены только для долот с фрезерованным вооружением. Предпринимались попытки оценить влияние разновысотности на величину нагрузки, действующей на роликовые подшипники опор шарошек модели долота [18]. Однако, вероятно, из-за сложности проведения исследований по данной методике испытывался лишь один вариант взаимного положения шарошек, что явно недостаточно для получения количественных зависимостей загруженности элементов опор от разновысотности. По методике, разработанной во ВНИИБТ [19], проводились исследования влияния разновысотности на загруженность секций шарошечного долота. Моделирование разновысотности осуществлялось за счет вертикального перемещения второй секции модели относительно первой и третьей секций в пределах от +5 до –5 мм через интервал 1 мм. Проведенные исследования позволяют установить качественную взаимосвязь между положением одной секции долота относительно других и действующей на нее вертикальной нагрузкой. Но выбранные пределы изменения разновысотности, обусловленные возможностями методики, в реальных долотах почти не встречаются, что снижает практическую ценность полученных результатов.

Объект и методы исследования

С целью установления количественных закономерностей влияния разновысотности шарошек на загруженность элементов твердосплавного вооружения долот на специальном стенде [20] была испытана партия долот, разновысотность шарошек у которых менялась в пределах от 0,34 до 1,28 мм. Испытания проводились с помощью устройства, позволяющего замерять усилия, воспринимаемые каждым зубком каждой шарошки реального долота при его взаимодействии с неразрушающимся забоем [21]. Для раздельной регистрации усилий, действующих на венцы каждой шарошки, забой разделен на два сектора: рабочий (измерительный) сектор I и нерабочий сектор II (рис. 1). При вращении долота по забою шарошки последовательно контактируют с кольцевыми вставками рабочего сектора забоя I.

Для реализации данного метода спроектирован и изготовлен специальный стенд, позволяющий вращать испытуемое долото по забою измерительного устройства. Осевая нагрузка на долото может плавно изменяться в пределах от 0 до 200 кН, что позволяет испытывать долота различных типоразмеров при осевых нагрузках, близких или равных рабочим нагрузкам, зависящим от размера исследуемого долота. Привод стенда обеспечивает изменение угловой скорости долота от 0,16 до 11,34 с⁻¹, воспроизводя тем самым условия роторного бурения. Вертикальные составляющие реакций взаимодействия зубьев шарошки с забоем, параллельные оси вращения долота деформируют тензометрические балки 4, 5, 6. Чувствительными элементами для регистрации тангенциальных составляющих служат вкладыши 7, 8, 9. Деформации балок и вкладышей преобразуются датчиками в электрические сигналы, пропорциональные величинам осевых и тангенци-

альных реакций взаимодействия зубков шарошек долота с забоем, которые регистрируются осциллографами 11, 12 и обрабатываются с помощью специальной аппаратуры.

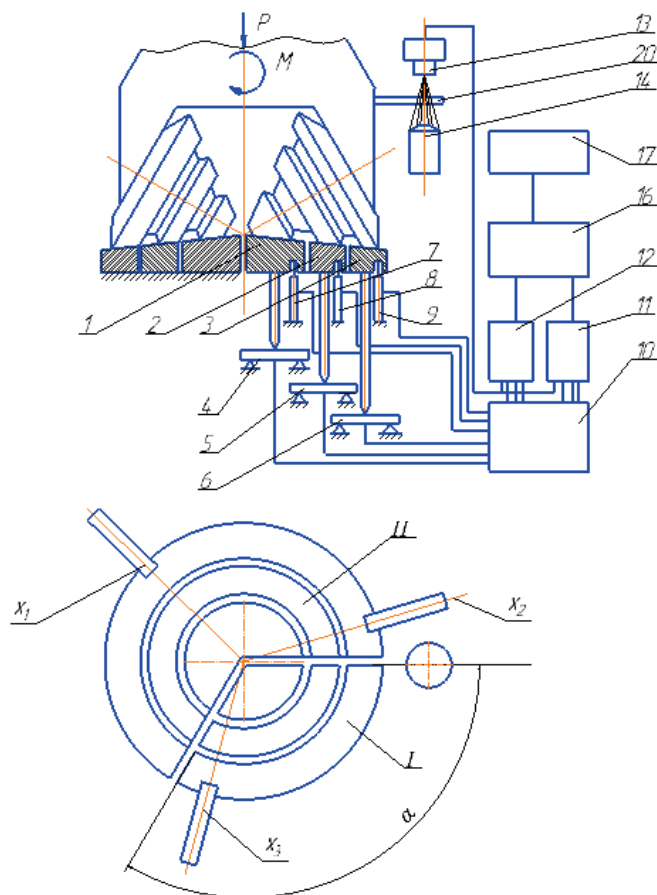


Рис. 1. Принципиальная схема замера и регистрации усилий, действующих на зубья шарошек: 1, 2, 3 — кольцевой забой рабочего сектора; 4, 5, 6, 7 — тензометрические балки; 7, 8, 9 — вкладыши; 10 — усилитель; 11, 12 — осциллографы; 16, 17 — преобразующая аппаратура; X_1 , X_2 , X_3 — оси шарошек

Исследования выполнены на долотах ПП215, 9К-ПВ, предназначенных для бурения в крепких породах с очисткой забоя сжатым воздухом или воздушно-водяной смесью. Допускаемая предельная осевая нагрузка на долото составляет 250 кН, рекомендуемые угловые скорости долота — от 0,8 до 1,2 с⁻¹. Выбор данного типа долота обусловлен тем, что вооружение шарошек этого долота изготовлено из твердосплавных зубков одного типа с полусферической головкой, что позволяет исключить возможное влияние формы зубков на исследуемые параметры. Кроме того, опорные узлы шарошек этих долот выполнены по широко распространенной схеме: большой роликовый подшипник — шариковый замковый подшипник — малый роликовый подшипник. Это позволяет распространить результаты исследований данных долот на долота других типов, имеющих такую же схему опорных узлов.

На рисунке 2 приведены схема вооружения шарошек исследуемого долота и схема дифференциации забоя по венцам.

Величина разновысотности определялась как абсолютное значение максимальной разницы уровней расположения шарошек относительно упорного уступа резцы, замеряемых по периферийным рядам зубьев.

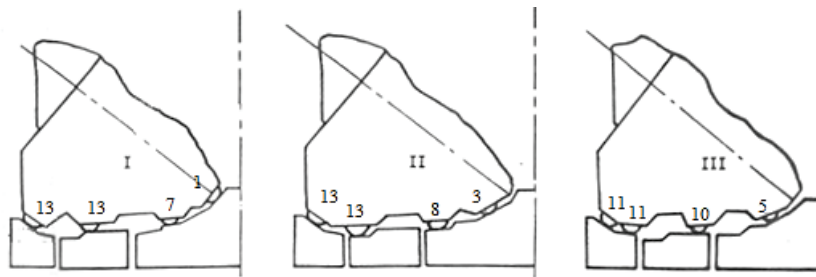


Рис. 2. Схема вооружения шарошек долота III215, 9К-ПВ и схема дифференциации забоя по венцам (I, II, III — номера шарошек; 13, 13, 7, 1 ... — количество зубков на венцах)

Для исключения погрешности при испытаниях, при переходе от опыта к опыту, долота были подобраны с одинаковыми радиальными и осевыми люфтами в опорах шарошек.

Очевидно, что взаимное положение трех шарошек вдоль оси резцы долота не может быть исчерпывающе охарактеризовано одним параметром — разновысотностью.

Поэтому у долот, предназначенных для исследований, взаимное положение шарошек определялось двумя параметрами — X_1 и X_2 (рис. 3). Здесь X_1 — разница уровней расположения первой и второй шарошек относительно упорного уступа, X_2 — разница уровней расположения второй и третьей шарошек.

За начало отсчета выбрано положение второй шарошки, и если первая или третья шарошка смещена относительно второй в направлении забоя, то соответствующий параметр имеет положительный знак, если же смещение в противоположном направлении, то отрицательный.

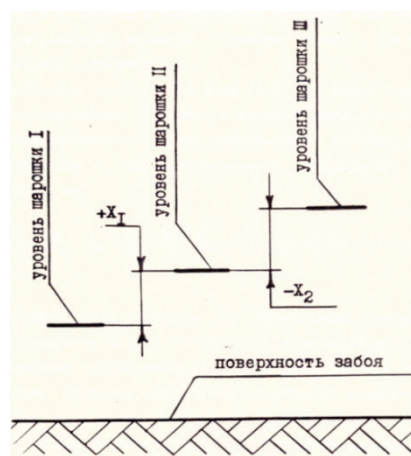


Рис. 3. Схема определения положения шарошек

Результаты

Чтобы выяснить влияние положения шарошек относительно упорного уступа на распределение осевой нагрузки по венцам каждой шарошки, необходимо установить зависимости вида

$$P_i = F_i(X_1, X_2); \quad (1)$$

где, P_i — средняя осевая нагрузка, действующая на i -й венец.

Для получения зависимостей (1) непосредственно из эксперимента необходимо провести несколько серий испытаний, оставляя постоянным в одной серии значения одного параметра и меняя значения второго параметра. Однако результаты обмера долот показали, что параметры X_1 и X_2 являются случайными и независимыми величинами, и почти невозможно подобрать необходимое для проведе-

ния исследований количество долот с заранее заданными сочетаниями параметров X_1 и X_2 . Поэтому нами для решения поставленной задачи был избран другой путь. У долот, отобранных для проведения исследований, величина разновысотности менялась в пределах от 0,34 до 1,28 мм, причем сочетание параметров X_1 и X_2 произвольное и разнообразное. Отобранные долота испытывались при осевой нагрузке на долото 80 кН и угловой скорости долота $3,3 \text{ с}^{-1}$.

В результате проведенного исследования получены значения P_i , соответствующие относительной средней загрузженности в процентах к общей осевой нагрузке всех венцов долота при различных взаимных положениях шарошек.

Определение зависимостей вида (1) по полученным экспериментальным данным для каждого венца осуществлялось с помощью математического аппарата регрессионного анализа. Поскольку вид функции P_i заранее неизвестен, выбирали его в виде отрезка полинома

$$P_i = B_{0i} + B_{1i} \cdot X_1 + B_{2i} \cdot X_2 + B_{3i} \cdot X_1^2 + B_{4i} \cdot X_2^2 + \dots \quad (2)$$

Оценка коэффициентов регрессии B_i производилась методом наименьших квадратов. Были рассчитаны коэффициенты регрессии для различных степеней полинома. Проверка адекватности полученных математических моделей опытным данным осуществлялась по критерию Фишера. Значимость коэффициентов регрессии оценивалась по t -критерию Стьюдента.

В результате расчетов установлено, что изменение загрузженности периферийных венцов в зависимости от положения шарошек адекватно при уровне доверительной вероятности 0,95 описывается полиномами третьей степени. Так, для периферийного венца первой шарошки эта зависимость имеет вид

$$P_1 = 10,21 + 4,65 X_1 - 1,83 X_2 + 1,9 X_1^2 - 0,9 X_2^2 + 4,03 X_1^3 - 1,71 X_2^3. \quad (3)$$

Зависимость загрузженности среднего и вершинного венцов этой же шарошки описывается следующими полиномами:

$$P_2 = 20,32 + 1,23 X_1 - 0,53 X_2 + 1,45 X_1^3 - 0,82 X_2^3, \quad (4)$$

$$P_3 = 13,84 + 1,07 X_1 - 0,69 X_2. \quad (5)$$

Аналогичные зависимости получены и для остальных шарошек долота.

Обсуждение

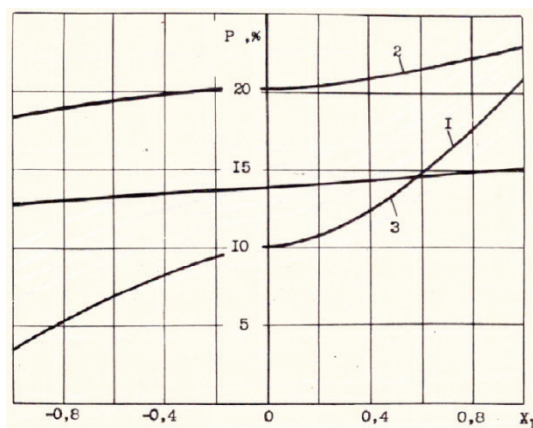


Рис. 4. Зависимости относительной загрузженности венцов первой шарошки (долота III215, 9К-ПВ) от взаимного положения шарошек при $P = 80 \text{ кН}$, $\dot{\omega} = 3,3 \text{ с}^{-1}$:
 1 — периферийный венец;
 2 — средний венец;
 3 — вершинный венец; $X_2 = 0$

По рассчитанным математическим моделям изменения P_i от X_1 и X_2 построены графические зависимости относительной загрузженности всех венцов первой шарошки от X_1 при $X_2 = 0$ (рис. 4).

Наибольшее влияние взаимное расположение шарошек, относительно уступа резбы оказывает на загруженность периферийного венца. Это, очевидно, можно объяснить конструкцией вооружения шарошек. Дело в том, что у всех трех шарошек периферийные венцы разрушают один и тот же кольцевой участок забоя, в то время как каждый другой венец разрушает свой кольцевой участок забоя. Поэтому наибольшая доля работы по разрушению периферийного участка забоя приходится на периферийный венец той шарошки, которая выступает относительно двух остальных шарошек в сторону забоя.

Просуммировав выражения P_1, P_2, P_3 , получим зависимость относительной загруженности первой шарошки от ее положения относительно второй и третьей шарошек

$$P_1 = 44,37 + 6,95X_1 - 3,05X_2 + 1,9X_1^2 - 0,9X_2^2 + 5,48X_1^3 - 2,53X_2^3. \quad (6)$$

Графическая интерпретация зависимости (6) при изменении X_1 и X_2 в пределах от -1 до $+1$ мм приведена на рисунке 5.

Выводы

Нетрудно убедиться, что при наиболее неблагоприятных сочетаниях X_1 и X_2 , изменяющихся даже в пределах допуска на разновысотность шарошек, нагрузка, действующая на одну из шарошек (долота Ш215, 9К-ПВ), может увеличиваться почти в два раза. Это в свою очередь приведет к увеличению интенсивности изнашивания и разрушения вооружения и элементов опорного узла шарошки и, как следствие, к уменьшению долговечности долота в целом. Приведенные результаты исследования влияния разновысотности шарошек на распределение осевой нагрузки по элементам твердосплавного вооружения шарошечных долот вполне согласуются с результатами промысловых исследований влияния точности их изготовления на показатели эффективности работы долот. Они еще раз подтверждают важность задачи уменьшения разновысотности шарошек и более обоснованного назначения допуска на ее величину, что, несомненно, позволит существенно повысить работоспособность шарошечных долот.

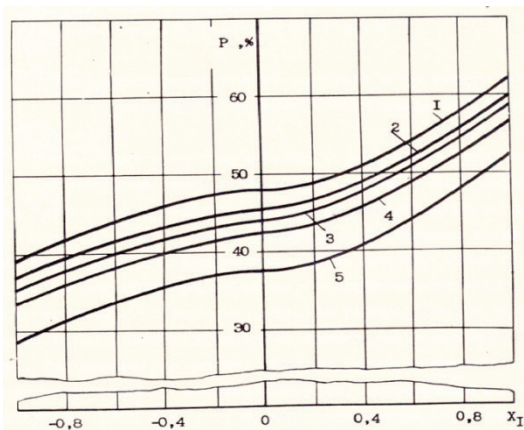


Рис. 5. Зависимость относительной загруженности первой шарошки (долота Ш215, 9К-ПВ) от взаимного положения шарошек при $P = 80$ кН, $\omega = 3,3$ с⁻¹:
1 — $X_2 = -1$ мм; 2 — $X_2 = -0,5$ мм; 3 — $X_2 = 0$ мм;
4 — $X_2 = +0,5$ мм; 5 — $X_2 = +1$ мм

Библиографический список

1. Беликов В. Г., Постах С. А. Рациональная отработка и износостойкость шарошечных долот. — М.: Недра, 1972. — 160 с.
2. Долговечность буровых долот / В. Н. Виноградов [и др.]. — М.: Недра, 1977. — 256 с.
3. Мокшин А. С., Владиславлев Ю. Е., Комм Э. Л. Шарошечные долота. — М.: Недра, 1971. — 216 с.
4. Симонов В. В., Вискребцов В. Г. Работа шарошечных долот и их совершенствование. — М.: Недра, 1975. — 240 с.
5. Креймер Г. С. Прочность твердых сплавов. — М.: Металлургия, 1971. — 247 с.
6. Бабаев С. Г., Сеидов Э. Н. Пути повышения долговечности штыревых долот. — Баку, 1977. — 46 с.

7. Беляев А. И. Исследование технологических процессов сборки шарошек буровых долот с твердосплавным вооружением: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1977. – 205 с.
8. Богомолов Р. М. Исследование работоспособности твердосплавного вооружения шарошечных долот: Автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1975. – 22 с.
9. Линдо Г. В. Исследование эксплуатационной стойкости и совершенствование твердосплавных зубков для шарошечных долот: Автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1972. – 26 с.
10. Кирпичников В. М. Исследование износостойкости спеченных твердых сплавов применительно к вооружению шарошечных долот: Автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1981. – 21 с.
11. Балицкий П. В. Взаимодействие бурильной колонны с забоем скважины. – М.: Недра, 1975. – 293 с.
12. Мавлютов М. Р. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: Недра, 1978. – 215 с.
13. Симонов В. В., Юнин Е. К. Влияние колебательных процессов на работу бурильного инструмента. – М.: Недра, 1977. – 216 с.
14. Pyalchenkov V. A., Dolgushin V. V., Kulyabin G. A. Work Capacity and Durability of Rolling Cutter Drill Bits (Analysis of Criteria and Research Results) // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2016. – RJPBCS 7(6). – P. 468–475.
15. Пяльченков В. А. Повышение работоспособности шарошечных долот путем рационального распределения нагрузок по элементам вооружения: дис. ... канд. техн. наук / Российский государственный ун-т нефти и газа имени И. М. Губкина. – М., 1983. – 216 с.
16. Пяльченков В. А. Расчет нагруженности элементов вооружения долота [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – Режим доступа: www.science-education.ru/121-18865 (дата обращения: 08.07.2015).
17. Пяльченков В. А. Моделирование нагруженности подшипников опоры шарошечного долота // Механика и процессы управления: материалы Всеросс. науч.-практ. конф. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – С. 105–109.
18. Посташ С. А., Касинцев А. А. О влиянии точности изготовления долот на режим работы подшипников // Машины и нефтяное оборудование. – 1976. – № 7. – С. 22–25.
19. Комм Э. Л. Исследование влияния конструктивных и технологических факторов на работоспособность, износ и нагруженность опор шарошечных долот: Автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1978. – 28 с.
20. Пяльченков В. А. Стенд для исследования нагруженности вооружения шарошечных долот [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – Режим доступа: www.science-education.ru/129-21473 (дата обращения: 28.08.2015).
21. Experimental Method for Measuring the Forces Acting On the Cutters of the Rolling Cutter Bit / V. A. Pyalchenkov [et al.] // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2016. – RJPBCS 7(5). – P. 663–669.

Сведения об авторах

Пяльченков Владимир Алексеевич, к. т. н., доцент кафедры прикладной механики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: pial228@rambler.ru

Пяльченков Дмитрий Владимирович, к. т. н., доцент кафедры бизнес-информатики и математики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: pjalchenkovdv@tyuiu.ru

Долгушин Владимир Вениаминович, д. т. н., профессор кафедры станков и инструментов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: dolgusinvv@tyuiu.ru

Кулябин Геннадий Андреевич, д. т. н., профессор кафедры бурения нефтяных и газовых скважин, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: kuljabinga@tyuiu.ru

Information about the authors

Vladimir A. Pyalchenkov, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Applied Mechanics, Industrial University of Tyumen, e-mail: pial228@rambler.ru

Dmitry V. Pyalchenkov, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Business Informatics and Mathematics, Industrial University of Tyumen, e-mail: pjalchenkovdv@tyuiu.ru

Vladimir V. Dolgushin, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Machines and Tools, Industrial University of Tyumen, e-mail: dolgusinvv@tyuiu.ru

Gennadiy A. Kulyabin, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Drilling Oil and Gas Wells, Industrial University of Tyumen, e-mail: kuljabinga@tyuiu.ru