Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 448-453 DOI: 10.31897/PMI.2020.4.7
О.Б.Трушкин, Х.И.Акчурин

УДК 622.24(075)

Давление резцов PDC на пластично-хрупкую горную породу в процессе ее разрушения

О.Б.ТРУШКИН ✉, Х.И.АКЧУРИН
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Трушкин О.Б. Давление резцов PDC на пластично-хрупкую горную породу в процессе ее разрушения / О.Б.Трушкин, Х.И.Акчурин // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 448-453. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.7

***Аннотация*.** На сегодняшний день не существует методики расчета параметров режима бурения породоразрушающими инструментами, оснащенными алмазно-твердосплавными резцами (резцами PDC). Для создания такой методики требуется изучение их работы. В статье приведены результаты стендовых исследований работы резцов PDC в процессе разрушения образца горной породы при воспроизводстве реальной схемы размещения резцов на рабочей поверхности долота.
Важным параметром работы резцов PDC, необходимым для расчета нагрузок на долото, является давление резцов на горную породу в процессе ее разрушения. Общее давление резца на породу может быть разложено на две взаимно перпендикулярные составляющие – давление вдавливания и давление резания.
Предложено оценку загрузки резцов PDC при разрушении пород различной твердости проводить с использованием относительных величин давлений вдавливания и резания, которые рассчитываются относительно предела текучести горной породы по штампу.
Установлено, что на изменчивость средних относительных давлений вдавливания и резания существенное влияние оказывают проходка за оборот долота и радиус расположения резца на долоте. Получены зависимости максимальных относительных давлений резцов PDC при разрушении пластично-хрупкой породы от проходки за оборот и радиуса расположения резца на долоте. Установлено, что при проходках за оборот до 0,4 мм основным механизмом разрушения является резание, а с увеличением глубины разрушения процесс вдавливания становится определяющим.

***Ключевые слова*:** долота PDC; резцы PDC; разрушение горной породы; осевая нагрузка на долота PDC; давления вдавливания резца PDC; давления резания резца PDC; твердость горной породы по штампу

Введение. В настоящее время при бурении нефтяных и газовых скважин широко применяются породоразрушающие инструменты режуще-скалывающего действия, оснащенные алмазно-твердосплавными резцами (резцами PDC) [6, 9, 10]. Эффективность разрушения горных пород долотами PDC и эффективность всего процесса бурения зависит как от конструкции долот, так и от параметров режима бурения. На сегодняшний день не существует четкой методики расчета параметров режима бурения этими инструментами.

В процессе бурения на долото создается нагрузка, которая распределяется неравномерно между отдельными резцами в зависимости от конструкции долота и механических свойств горной породы, поэтому разработка такой методики может базироваться на аналитических исследованиях работы резцов в процессе разрушения горной породы или на экспериментальных исследованиях – как промысловых, так и стендовых. В работах [1, 13] приведены результаты моделирования взаимодействия резцов с горной породой в специализированном программном комплексе с целью оптимизации расположения резцов на рабочей поверхности долота, однако нет описания математических методов, положенных в основу моделирования. В работах К.И.Борисова, В.В.Нескоромных, В.Л.Рубцова [2-5, 8] дано описание результатов изучения работы резцов в процессе разрушения горных пород на основе экспериментального изучения работы одиночного резца, при этом сам резец является неподвижным, а вращается образец горной породы, что не вполне соответствует реальной динамике работы резцов на забое. В работах [14-18] описаны результаты исследований силовой и энергетической загрузки резца PDC. Основной недостаток перечисленных работ заключается в том, что исследуется взаимодействие единичного резца с горной породой, тогда как в реальности на показатели работы каждого резца оказывает влияние профиль забоя, который формируется резцами, поражающими соседние участки.

В результате неравномерного распределения нагрузки происходит интенсивный износ отдельных резцов или их поломка, поэтому наиболее информативными являются стендовые исследования, воспроизводящие в значительной мере процесс разрушения горной породы при реаль-

ной схеме размещения резцов на рабочей поверхности долота PDC. В статье в качестве исходного материала используются результаты стендовых исследований [7, 11, 12], параметров и показателей работы резцов PDC при разрушении образца горной породы.

Методология. Для оценки загруженности отдельных резцов в качестве аргумента была принята проходка за один оборот долота, а регистрировались силы, действующие на резец. Исследования проводились на специально сконструированном стенде, который представляет собой напольный сверлильный станок, снабженный электронным регистрирующим блоком, исполнительным узлом, с установленными на нем тремя резцами PDC и системой промывки рабочей зоны резцов [12]. Образец горной породы крепится в специальной державке на рабочем столе сверлильного станка. Конструкция исполнительного узла стенда позволяет воспроизводить требуемый участок профиля долота PDC: устанавливать необходимые параметры размещения резцов относительно друг друга и оси долота [11, 12].

Средний из трех резцов PDC исполнительного узла является основным, два других – вспомогательными. Основной резец устанавливается в специальной тензометрической стойке, позволяющей измерять три составляющие нагрузки на резец: осевую F_g, окружную F_t и радиальную F_r силы.

Перед началом эксперимента задаются: расположение резцов, угол их установки, частота вращения исполнительного узла и продольная подача шпинделя сверлильного станка за один его оборот (проходка за один оборот резцов). В процессе эксперимента результаты измерения нагрузки на резец автоматически записываются в цифровом виде в собственную энергонезависимую память электронного блока стенда, а после окончания эксперимента – переписываются на жесткий диск компьютера.

Все эксперименты проводились на образце горной породы средней твердости – мраморе, имеющем следующие показатели механических свойств, определенные методом статического вдавливания штампа: твердость по штампу $p_ш$ = 950 МПа; предел текучести p_0 = 650 МПа; условный коэффициент пластичности К = 1,7-2; энергоемкость разрушения A_v = 110 Дж/см^3. Исследовалась работа резцов PDC диаметром 13,5 мм с острой кромкой и фаской. Для проведения экспериментов были выбраны следующие параметры расположения основного и вспомогательных резцов (рис.1): смещение вспомогательных резцов X_1 = 8 мм, X_2 = 8 мм; разновысокость вспомогательных резцов Z_1 = 3,7 мм, Z_2 = 2,8 мм; радиус расположения основного резца R = 25; 50; 85 мм; угол установки резцов α = 20°.

Проходка δ за один оборот резца задавалась на шести уровнях δ = 0,28, 0,4, 0,56, 0,8, 1,12, 1,6 мм при частоте вращения 90 мин$^{-1}$. Зоны резания основного и вспомогательных резцов промывались струями технической воды.

Обсуждение. По результатам проведенных экспериментов были получены следующие диапазоны изменения нагрузок:

• резец с острой кромкой: средняя осевая сила F_g = 328-1427 Н; максимальная осевая сила $F_{g\max}$ = = 472-1970 Н; средняя окружная сила F_t = 315-1388 Н; максимальная окружная сила $F_{t\max}$ = 519-2296 Н;

• резец с фаской: средняя осевая сила F_g = 744-2745 Н; максимальная осевая сила $F_{g\max}$ = 1124-4175 Н; средняя окружная сила F_t = 534-1617 Н; максимальная окружная сила $F_{t\max}$ = 853-2739 Н.

Важным параметром работы резца PDC для расчетов нагрузок на долото является давление его резцов на горную породу. Общее давление резца на породу p – вектор, направленный перпендикулярно рабочей поверхности резца, – может быть разложен на два взаимно перпендикулярных направления

$$p = \sqrt{p_g^2 + p_t^2},$$

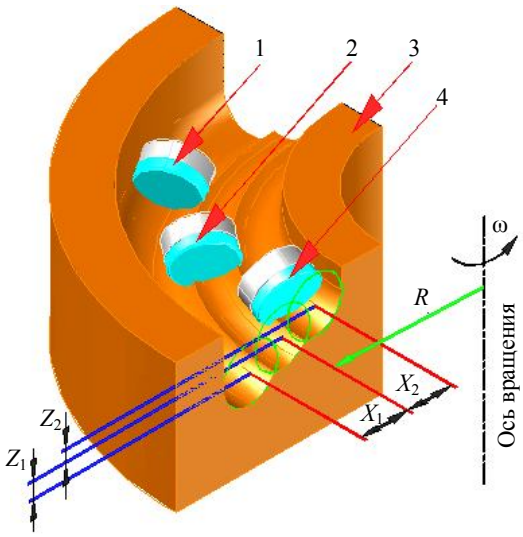


Рис.1. Участок схемы перекрытия забоя резцами PDC на стенде
1 и 4 – вспомогательные резцы, воспроизводящие участок профиля долота; 2 – основной тензометрируемый резец; 3 – блок горной породы

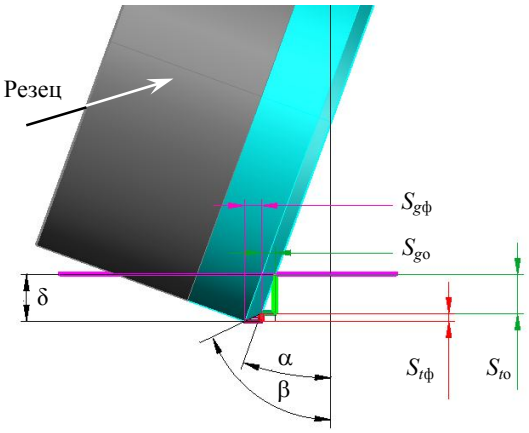


Рис.2. Профиль резца PDC

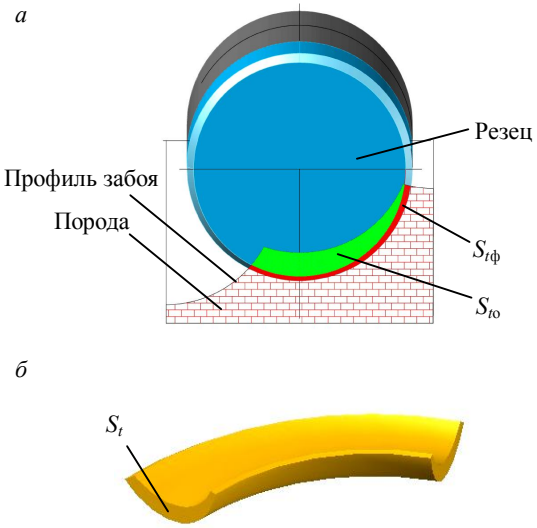


Рис.3. Фронтальный вид резца (*а*) и фрагмент срезаемой за один оборот породы (*б*)

где p_g – давление вдавливания, создается осевой силой F_g на горизонтальной проекции S_g контактной поверхности резца, перпендикулярной оси вращения, т.е. $p_g = F_g/S_g$ при допущении о равномерном распределении давления по площадке контакта; p_t – давление резания, создается окружной силой F_t на вертикальной проекции S_t контактной поверхности резца, перпендикулярной этой силе, т.е. $p_t = F_t/S_t$.

На рис.2 приведен профиль резца с фаской, осуществляющего проходку за один оборот δ.

Основная рабочая поверхность резца наклонена к оси вращения под углом α (угол установки резца α=20°), поверхность фаски наклонена под углом β = 65°. Для резца с фаской площадь S_t рассматривается как сумма основной вертикальной проекции S_{to} и вертикальной проекции фаски $S_{t\phi}$

$$S_t = S_{to} + S_{t\phi}, \quad (1)$$

горизонтальная проекция:

$$S_g = S_{go} + S_{g\phi}, \quad (2)$$

где S_{go} и $S_{g\phi}$ – проекции основной поверхности резца и фаски соответственно на горизонтальную плоскость (плоскость забоя).

Из рис.2 выводятся следующие соотношения:

$$S_{go} = S_{to}\mathrm{tg}\alpha,$$
$$S_{g\phi} = S_{t\phi}\mathrm{tg}\beta. \quad (3)$$

Расчет площади контакта S_t резца с породой при заданной проходке δ за один его оборот проводится в системе автоматизированного проектирования AutoCAD (рис.3).

Проекцией контура резца на вертикальную плоскость является эллипс с большой осью *d* и малой осью *d*Cosα, расположенной по вертикале. Поскольку S_t лежит в плоскости, проходящей через радиус *R* и ось вращения (вертикальная плоскость), то в этой плоскости строились проекции контуров основного и вспомогательных резцов в двух положениях – при одном проходе и последующем со смещением на величину *d*. Таким образом, получался профиль забоя и проекции площадей контакта S_{to} и $S_{t\phi}$, которые измерялись средствами AutoCAD.

Механизм деформирования и разрушения различных пластично-хрупких пород отличается незначительно. Оценка загрузки резцов при разрушении пород этого класса различной твердости может быть проведена с использованием относительных величин давлений вдавливания p_{go} и резания p_{to}, которые рассчитываются относительно предела текучести породы по штампу p_o следующим образом:

$$p_{go} = p_g/p_o; \quad (4)$$

$$p_{to} = p_t/p_o. \quad (5)$$

Средние давления вдавливания p_g и резания p_t резца на горную породу обратно пропорциональны, соответственно, горизонтальной S_g и вертикальной S_t проекциям площади контакта резца с породой. Площадь контакта зависит от проходки за оборот δ при определенной схеме поражения забоя.

На рис.4 для резца с фаской приведены графики изменения S_g и S_t от δ для исследуемой схемы перекрытия забоя. Графики $S_g = f(\delta)$ и $S_t = \varphi(\delta)$ аппроксимируются линейными зависимостями

при величине достоверности аппроксимации не менее $R^2 = 0,9962$. Темп роста вертикальной проекции площади контакта резца с породой S_t выше, чем темп роста S_g.

Средние относительные давления резца PDC на горную породу для резца с фаской:

Радиус расположения резца R, мм	Проходка за один оборот δ, мм	Среднее относительное давление вдавливания p_{go}	Среднее относительное давление резания p_{to}	Отношение средних давлений p_t/p_g
85	0,28	0,36	0,39	1,06
50	0,28	0,35	0,44	1,25
25	0,28	0,28	0,35	1,25
85	0,4	0,37	0,32	0,85
50	0,4	0,4	0,37	0,91
25	0,4	0,32	0,32	1,01
85	0,56	0,42	0,29	0,67
50	0,56	0,45	0,34	0,75
25	0,56	0,3	0,27	0,91
85	0,8	0,52	0,26	0,5
50	0,8	0,53	0,29	0,55
25	0,8	0,47	0,28	0,6
85	1,12	0,44	0,21	0,47
50	1,12	0,45	0,22	0,49
25	1,12	0,45	0,21	0,5
85	1,6	0,46	0,18	0,38
50	1,6	0,46	0,19	0,4
25	1,6	0,45	0,19	0,41

По приведенным исходным данным для установления существенности влияния отдельных факторов, а именно проходки за оборот δ и радиуса расположения резца R на изменчивость средних относительных давлений вдавливания p_{go} и резания p_{to}, был проведен двухфакторный дисперсионный анализ без повторений при уровне значимости $a = 0,05$ в программе MS Excel.

Результаты дисперсионного анализа среднего относительного давления вдавливания p_{go} резца с фаской:

Источник вариации	Сумма квадратов отклонений *SS*	Степень свободы *df*	Средний квадрат *MS*	Расчетное значение отношения Фишера *f-критерий*	Уровень значимости для вычисленного *f* *p-значение*	Табличное значение отношения Фишера *f-критическое*
Проходка	0,030237	2	0,015119	44,07	0,00001	4,10
Радиус	0,057048	5	0,01141	33,26	0,00001	3,33
Погрешность	0,003431	10	0,000343			
Итого:	0,090716	17				

На рис.4 была показана прямо пропорциональная зависимость между проходкой за оборот δ и проекциями площадей контакта S_g и S_t резца. На основании этого можно утверждать, что влияние проекций площадей контакта на средние давления статистически значимо с вероятностью 0,95. Аналогичные результаты были получены и для резца с острой кромкой.

Результаты дисперсионного анализа среднего относительного давления резания p_{to} резца с фаской:

Источник вариации	Сумма квадратов отклонений *SS*	Степень свободы *df*	Средний квадрат *MS*	Расчетное значение отношения Фишера *f-критерий*	Уровень значимости для вычисленного *f* *p-значение*	Табличное значение отношения Фишера *f-критическое*
Проходка	0,005578	2	0,002789	8,95	0,006	4,10
Радиус	0,092803	5	0,018561	59,56	0,0000004	3,33
Погрешность	0,003116	10	0,000312			
Итого	0,101497	17				

Из результатов анализа следует, что влияние проходки за оборот δ и радиуса расположения резца R на p_{go} и p_{to} существенно. Данное утверждение основывается на том, что *p-значение* – уровень значимости для вычисленного *f-критерия* Фишера меньше заданного уровня значимости $a = 0,05$ во всех случаях. Это означает, что вычисленные значения *f-критерия* Фишера значимы, а так как они больше *f-критического*, то утверждение о существенном влиянии проходки за оборот и радиуса расположения резца справедливо.

DOI: 10.31897/PMI.2020.4.7

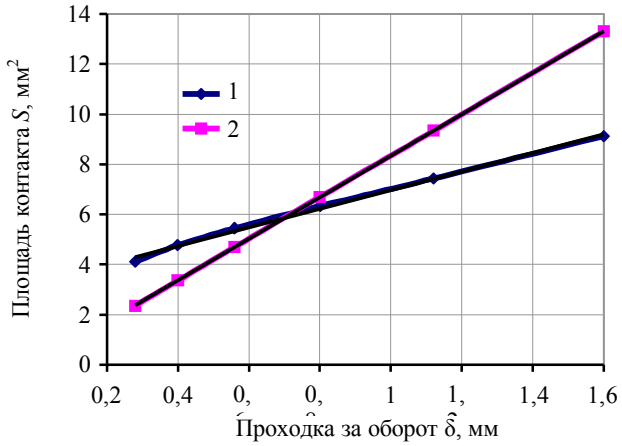
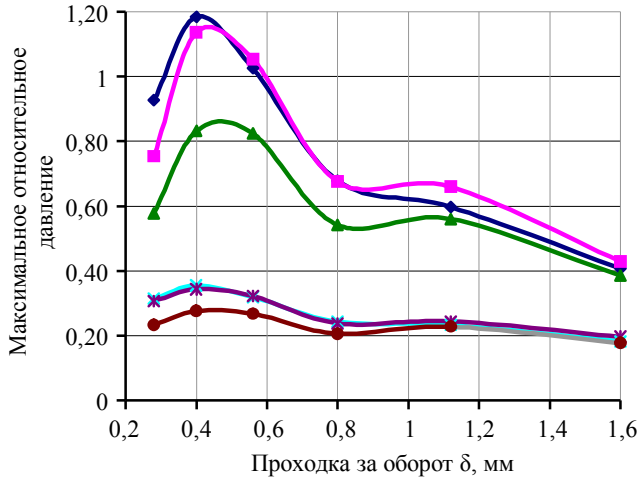


Рис.4. Зависимость S_g (1) и S_t (2) от δ для резца с фаской ($S_g = 3{,}71\delta + 3{,}26$, $R^2 = 0{,}9962$; $S_t = 8{,}29\delta + 0{,}05$, $R^2 = 1$)

а



б

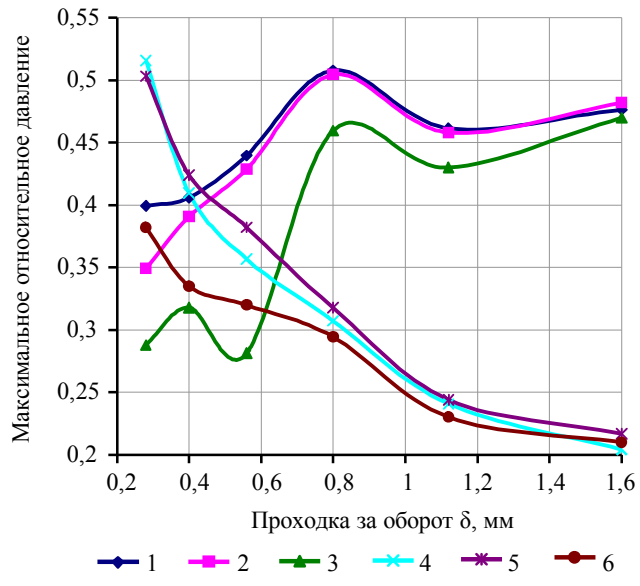


Рис.5. Зависимости максимальных относительных давлений резцов PDC при разрушении пластично-хрупкой породы:
а – резец с острой кромкой, *б* – резец с фаской
1 – $p_{g\text{omax}}$ при R = 85 мм; 2 – 50 мм; 3 – 25 мм;
4 – $p_{t\text{omax}}$ при R = 85 мм; 5 – 50 мм; 6 – 25 мм

Определенный интерес представляет сопоставление показателей разрушения пластично-хрупкой горной породы резцами PDC и показателей ее механических свойств, полученных стандартным методом вдавливания штампа (методом Л.А.Шрейнера). Сопоставлять следует твердость по штампу $p_{\text{ш}}$ с величинами максимальных давлений вдавливания $p_{g\text{max}}$ и резания $p_{t\text{max}}$, так как при этих давлениях происходит хрупкий выкол пластично-хрупких горных пород при резании и вдавливании. Для такого сопоставления были рассчитаны максимальные относительные давления вдавливания $p_{g\text{omax}}$ и резания $p_{t\text{omax}}$ по следующим формулам:

$$p_{g\text{omax}} = p_{g\text{max}}/p_{\text{ш}};$$

$$p_{t\text{omax}} = p_{t\text{max}}/p_{\text{ш}}.$$

На рис.5 приведены графики зависимостей $p_{g\text{omax}} = f(\delta)$ и $p_{t\text{omax}} = f(\delta)$ для резцов с острой кромкой (*а*) и с фаской (*б*).

Диапазон изменения $p_{g\text{omax}}$ для резца с острой кромкой весьма широк – 1,2-0,4 (рис.5, *а*). При проходке за оборот 0,28-0,4 мм максимальное относительное давление вдавливания существенно растет, достигая своего максимума с последующим почти плавным снижением. Относительное давление резания для резца с острой кромкой изменяется в весьма узком диапазоне – 0,38-0,2.

Диапазон изменения относительного давления вдавливания для резца с фаской (рис.5, *б*) значительно уже и лежит в пределах 0,28-0,5, при этом в диапазоне проходок за оборот 0,28-0,8 мм растет, а затем незначительно уменьшается. Относительное давление резания для резца с фаской изменяется в широком диапазоне – 0,5-0,2 при плавном снижении с увеличением проходки за оборот.

Заключение. Рассмотрены результаты экспериментов по изучению загруженности отдельных резцов долота PDC при разрушении образца пластично-хрупкой горной породы путем воспроизводстве участка профиля долота.

Разработана методика расчета поверхностей вдавливания и резания резца при различных профилях лопастей и величин соответствующих контактных давлений. Предложено оценивать загрузку резцов PDC величинами средних относительных (относительно предела текучести горной породы по штампу) давлений вдавливания и резания и максимальных давлений (относительно твердости по штампу).

По результатам экспериментов при уровне значимости a = 0,05 установлена статистическая значимость влияния проходки за оборот и радиуса расположения резца на средние относительные давления вдавливания и резания.

Полученные величины относительных давлений вдавливания и резания в зависимости от проходки за оборот долота могут быть использованы при разработке методики расчета осевых нагрузок и ожидаемых крутящих моментов на долота PDC при бурении горных пород с известными показателями механических свойств, определяемых методом вдавливания штампа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ашимов Р.Р.* От правильной расстановки – к выигрышной комбинации! / Р.Р.Ашимов, А.Н.Шестаков // Бурение и нефть. 2011. № 6. С. 28-29.

2. *Борисов К.И.* Аналитическое исследование временной прочностной характеристики горной породы при резании-скалывании резцами PDC / К.И.Борисов, В.Л.Рубцов // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 325. № 1. С. 172-178.

3. *Борисов К.И.* Динамика работы резцов в процессе разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия типа PDC // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317. № 1. С. 161-164.

4. *Борисов К.И.* Методика оценки эффективности процесса динамического разрушения горных пород инструментом режуще-скалывающего действия // Нефтяное хозяйство. 2008. № 8. С. 46-47.

5. *Борисов К.И.* Экспериментальная количественная оценка силовых характеристик резания горных пород // Известия Томского политехнического университета. 2002. Т. 305. № 8. С. 216-219.

6. Буровой породоразрушающий инструмент. Т. 2: Долота с фиксированными алмазосодержащими резцами / Под ред. В.Я.Кершенбаума. М.: ООО «Национальный институт нефти и газа», 2011. 448 с.

7. *Гусев Е.А.* Оценка силовой и энергетической загрузки резцов долота типа PDC по результатам стендового бурения / Е.А.Гусев, О.Б.Трушкин // Территория Нефтегаз. 2013. № 2. С. 34-37.

8. *Нескоромных В.В.* Аналитическое исследование процесса резания-скалывания горной породы долотом с резцами PDC / В.В.Нескоромных, К.И.Борисов // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 1. С. 191-195.

9. Новый взгляд на режущие элементы буровых долот / А.Бессон, Б.Берр, С.Диллард, Э.Дрейк и др. // Нефтегазовое обозрение. 2002. Т. 7. № 2. С. 4-31.

10. Справочник инженера-нефтяника. Том II. Инжиниринг бурения. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. 1064 с.

11. *Трушкин О.Б.* Разрушение горной породы единичным резцом PDC // Территория Нефтегаз. 2016. № 5. С. 16-20.

12. *Трушкин О.Б.* Измерение нагрузки на резец PDC при стендовом бурении // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2018. № 3. С. 5-10.

13. *Шарипов А.Н.* Долота для бурения по твердым породам / А.Н.Шарипов, Р.Р.Мингазов // Бурение и нефть. 2012. № 12. С. 46-48.

14. *Шарипов А.Н.* Оптимизация конструкций долот PDC, направленная на снижение времени бурения секции под эксплуатационную колонну / А.Н.Шарипов, Д.Г.Храмов, Е.А.Ковалевский // Бурение и нефть. 2013. № 6. С. 42-44.

15. Experimental Study of MSE of a Single PDC Cutter Interacting With Rock Under Simulated Pressurized Conditions / N.Rafatian, S.Z.Miska, L.W.Ledgerwood, R.Ahmed, M.Yu, N.Takach // Society of Petroleum Engineers, 2010. Vol. 25. Iss. 1. P. 10-18. DOI: 10.2118/119302-PA

16. *Glowka D.A.* Development of a Method for Predicting the Performance and Wear of PDC Drill Bits. Sandia Report. SAND86-1745. June 1987.

17. *Izbinski K.* Innovative Dual-Chamfer Edge Technology Leads to Performance Gains in PDC Bits / K.Izbinski, S.G.Patel, A.VanDeven // SPE/IADC Drilling conference and Exhibition, 17-19 March, London, England, UK. 2015. DOI: 10.2118/173157-MS

18. The Effects of Back Rake and Side Rake Angles on Mechanical Specific Energy of Single PDC Cutters with Selected Rocks at Varying Depth of Cuts and Confining Pressures / V.Rajabov, M.Yu, S.Miska, N.Takach, L.Mortimer // IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, 6-8 March 2012, San Diego, California, USA. DOI: 10.2118/151406-MS

***Авторы*: О.Б.Трушкин,** *канд. техн. наук, доцент, azimtrushkin@yandex.ru* (*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия*), **Х.И.Акчурин,** *канд. тех. наук, профессор, ugntu_burenie@mail.ru* (*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия*).

Статья поступила в редакцию 04.11.2019.
Статья принята к публикации 05.12.2019.