Анализ закономерностей распределения скоростных потоков и давлений по высоте шарошечного бурового долота

А. В. ВАСИЛЬЕВ *– к.т.н., доцент РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина*
Д. Ю. СЕРИКОВ *– к.т.н., доцент, кафедра «Стандартизация, сертификация и управление качеством производства нефтегазового оборудования» РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина*
С. В. СПИРИДОНОВ *– Лаборатория № 19 «Многосвязных систем управления», Институт проблем управления РАН*

В статье представлены результаты работы направленной на изучение влияния схемы размещения промывочных каналов в шарошечном долоте на качество очистки забоя скважины. Рассмотрены основные конструктивные схемы промывки, используемые в шарошечных буровых долотах. Установлены направления движения потоков промывочной жидкости в призабойной зоне, характер распределения давлений скоростного напора и давлений поперечного потока по поверхности забоя скважины для шарошечных долот с различными схемами промывки.

Среди множества факторов, влияющих на эффективность разрушения горных пород, необходимо отметить процесс промывки скважин, а главное, его важнейшую составляющую очистку призабойной зоны, в процессе которой происходит разрушение и отрыв частиц породы, уже отделенной от массива в результате механического воздействия зубьев шарошек долота, с последующим выносом их в над долотное пространство [2,3,4,5].

По мнению большинства исследователей на эффективность очистки призабойной зоны влияют: объем промывочной жидкости, подаваемой на забой, скорость ее истечения, схемы и конструкции промывочных устройств (их гидравлическое совершенство, количество, высота, место расположения и угол наклона относительно плоскости забоя) [3,4].

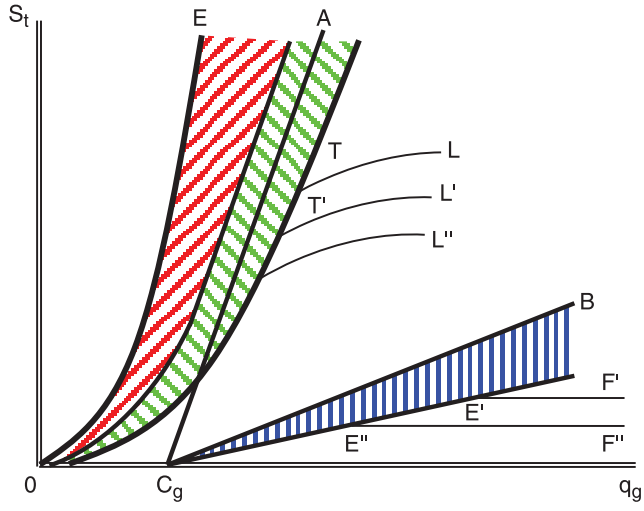

Рис. 1. Зависимость проходки при данной нагрузке от степени очистки забоя

Для оптимизации этих параметров авторами [3,4,5] в стендовых условиях определялись: направление и скорость потоков на забое и вдоль стенок скважины при различных схемах промывочных устройств; величина давления в этих зонах и ее взаимосвязь со скоростью и направлением потоков; вторичная измельчаемость шлама в зоне действия долота; взаимодействие потоков между собой и выбуренным шламом и так далее.

Многие работы в области промывки забоя скважины показывают, что на процесс бурения оказывает отрицательное влияние повышенная зашламленность забоя [5,6].

Так, лабораторные и промысловые исследования позволили Бингхэму М.Г. сделать вывод, что при идеальной чистоте забоя скорость бурения будет зависеть только от способности долота разрушать породу [2]. Этот вывод он проиллюстрировал зависимостью углубления забоя за один оборот долота от удельной осевой нагрузки на долото q_g (рис. 1).

Где: *OE* – линия идеального условия бурения; *AO* – «рабочая кривая», определяющая максимум возможной проходки на долото при данной нагрузке в промысловых условиях, т.е. проходка, которую можно получить при очистке забоя газообразными агентами или при минимальном статическом давлении промывочной жидкости; *CB* – соответствует минимальному углублению и характеризует условие значительного зашламления забоя. Позже, эти выводы были подтверждены и развиты другими авторами.

Так же, известно, что с ростом глубины скважины механическая скорость проходки падает [5,6]. Такое падение механической скорости проходки с увеличением глубины скважины обусловлено в первую очередь ростом дифференциального давления, т.е. разности между гидростатическим и пластовым давлением. Это подтверждают и лабораторные исследования [3,4].

>>>

А. Х. Гарньер и Н. Х. Ван-Линген определили, что величина дифференциального давления обуславливает как прочность породы, так и силу, прижимающую частицы шлама к поверхности забоя [6]. Эти прижимающие силы могут иметь как статическую, так и динамическую природу и являются сложной функцией почти всех известных показателей, характеризующих процесс бурения.

Промысловые исследования влияния дифференциального давления на механическую скорость проходки [4,5] подтвердили это и позволили сделать определенные выводы:

- с увеличением дифференциального давления от 0 до 7,0 МПа падение механической скорости составило 24–73%;
- механическая скорость проходки продолжает расти по мере того, как пластовое давление становится выше гидростатического;
- чувствительность механической скорости проходки к изменениям дифференциального давления повышается с ростом нагрузки на долото.

На (рис. 2.2) представлена картина движения потоков промывочной жидкости вдоль стенок скважины при схеме промывки с тремя удлиненными насадками. Основным отличием рассматриваемой картины для схемы с обычными насадками является ограниченная по высоте эжекция от струи жидкости, истекающей из насадки. В результате этого появляются новые восходящие потоки, что приводит к уменьшению количества частиц шлама, повторно попадающих на забой.

В связи с этим рассмотрим представленные на (рис. 2.1) кривые изменения скорости потока промывочной жидкости вдоль стенки скважины в сравнении с соответствующими кривыми для схемы с обычными насадками. Характер кривых для положений измерения 0° и 30° остался прежним, но возросла максимальная величина скорости подъема, особенно для положения измерения 30°.

Резко изменился характер кривых для положений измерения 60° и 90°. Как для того, так и для другого случая, уменьшился участок кривой с отрицательным значением скорости, а участок с положительным значением скорости возрос. После высоты *0,25 (h/H)*, т.е. чуть выше кромки отверстия удлиненной насадки, скорость в обоих случаях приобретает стабильное положительное значение.

На (рис. 3.2) представлена картина движения потоков промывочной жидкости вдоль стенки скважины при схеме промывки с двумя удлиненными насадками.

Как и при схеме промывки с тремя удлиненными насадками основные изменения коснулись потока в проеме с насадкой (60°), где уменьшились величина отрицательной скорости и длина участка кривой, ей соответствующей (рис. 3.1).

Кривые, соответствующие положениям измерения 0° и 180°, имеют тот же характер, что и при схеме промывки с двумя обычными насадками. Возросла лишь абсолютная величина положительной скорости в проеме без насадки (180°).

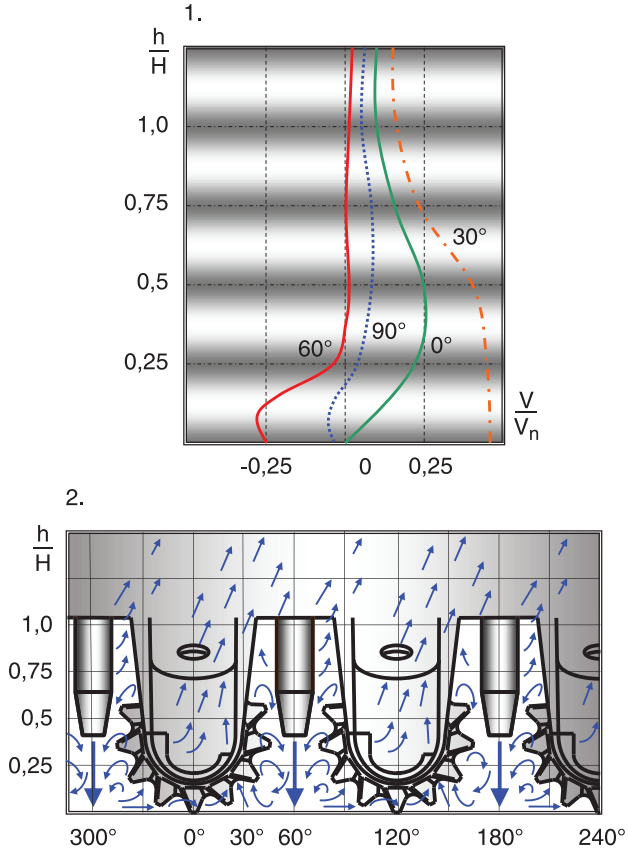

Рис. 2 (1, 2). Изменение скорости промывочной жидкости вдоль стенки скважины для долота с тремя приближенными к забою насадками
2.1. величина скорости при различных положениях измерения
2.2. схема распределения скоростных потоков вдоль стенки скважины

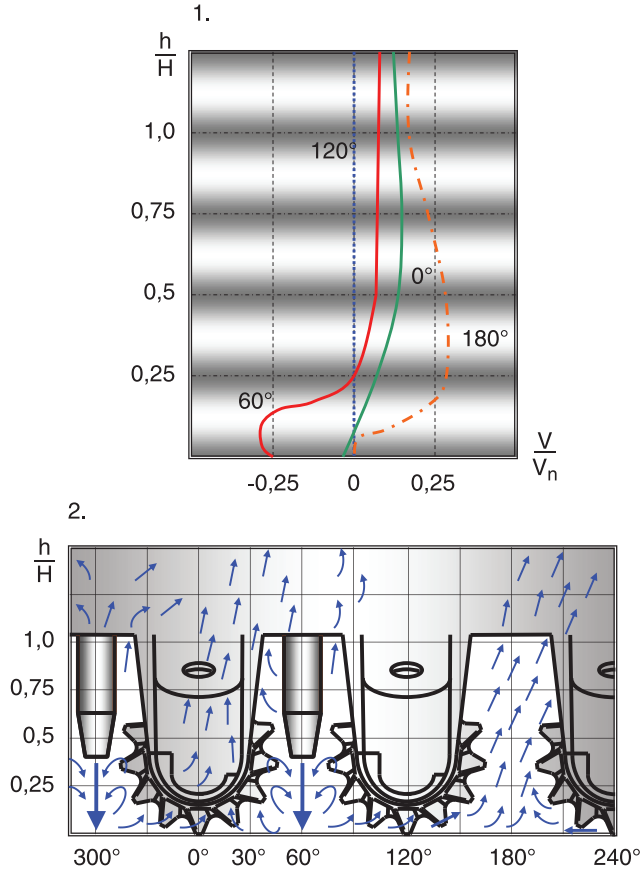

Рис. 3 (1, 2). Изменение скорости промывочной жидкости вдоль стенки скважины для долота с двумя приближенными к забою насадками
3.1. величина скорости при различных положениях измерения
3.2. схема распределения скоростных потоков вдоль стенки скважины

Для положения 120° значение скорости на всем протяжении долота и кольцевого затрубного пространства в зоне этого измерения было равно нулю. Это подтверждает и картина движения потоков промывочной жидкости (рис. 3.2).

Таким образом, можно с уверенностью сказать, что удлинение насадок способствует ускоренному выносу шлама вдоль стенок забоя скважины и возникновению новых восходящих потоков.

Наряду с замером скоростей потоков промывочной жидкости вдоль стенки скважины, проводились, как и при исследованиях зоны забоя долота, замеры давления на стенки скважины $P_{СК}$. Результаты этих измерений для схем промывки с тремя и двумя боковыми обычными и удлиненными насадками приведены на (рис. 4 и 5).

Кроме того, на этих рисунках представлены результаты измерения сечения свободного пространства в зоне долота в виде изменения площади этого сечения в зависимости от высоты долота.

Полученные кривые изменения давления $P_{СК}$ по высоте вдоль спинки лап (0°) и в проемах между лапами 60° для схемы промывки с тремя боковыми насадками (рис. 4) хорошо согласуются с кривой изменения сечения свободного пространства по высоте долота (рис. 4).

Как видно из приведенного графика изменения сечения свободного пространства, наименьшее сечение находится на высоте 0,3 от высоты долота, т.е. соответствует уровню козырька лап долота. Поток промывочной жидкости, попав в эту зону, запирается гидравлически – струями из насадок, и механически – наибольшим заполнением пространства скважины телом долота на высоте 0,3 от его общей высоты.

Поэтому в этой зоне возникает область с повышенным давлением $P_{СК}$ что видно из приведенного графика изменения этого давления для положения измерения в проеме между лапами (60°).

Такой же характер имеет в этой зоне и кривая изменения давления на стенки вдоль спинки лапы долота (0°),

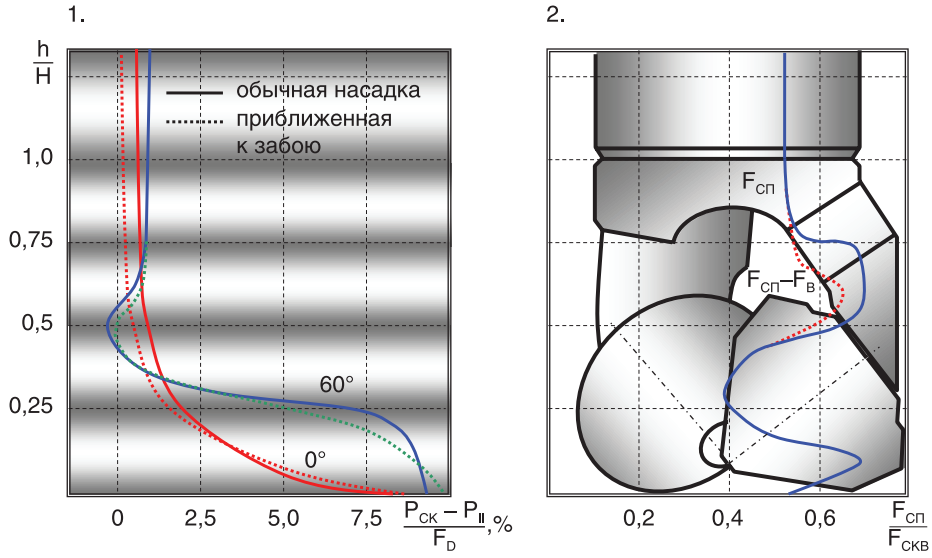

Рис. 4 (1, 2). Изменение величины давления на стенки скважины для долота с тремя боковыми насадками
4.1. величина давления на стенки при различных положениях измерения
4.2. изменение площади сечения свободного пространства призабойной зоны по высоте долота

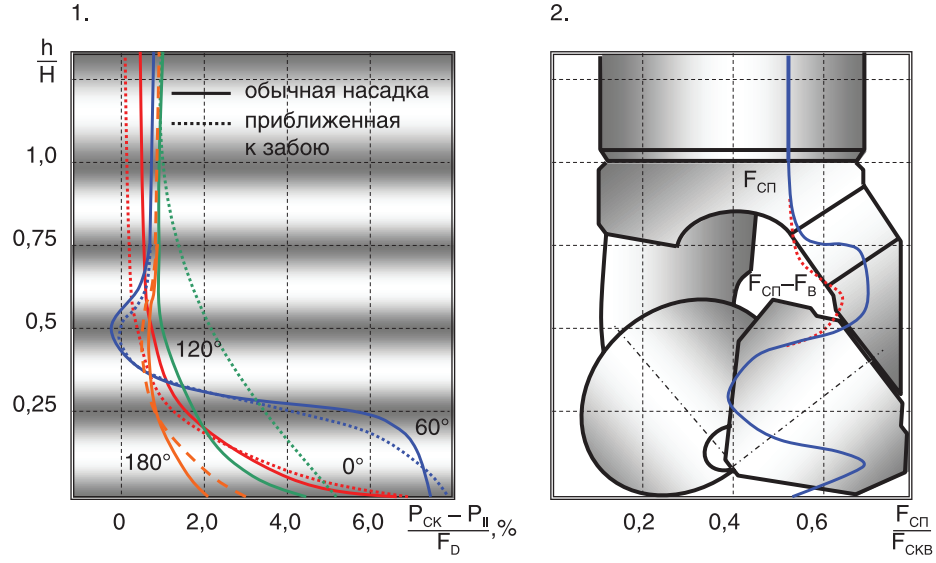

Рис. 5 (1, 2). Изменение величины давления на стенки скважины для долота с двумя боковыми насадками
5.1. величина давления на стенки при различных положениях измерения
5.2. изменение площади сечения свободного пространства призабойной зоны по высоте долота

>>>

Таблица 1. Объем промывочной жидкости, проходящей через отверстия в лапах долота при различных схемах промывки

Тип насадок	Диаметр отверстия в лапе долота, d_3, м 10^{-3}	Схема промывки								
		Три боковых насадки			Две боковых насадки					
					отверстие в лапе между проемами с насадками			отверстие в лапе между проемами с насадками и без		
		м 10^{-3}	м/с	$м^3/с\ 10^{-4}$	м 10^{-3}	м/с	$м^3/с\ 10^{-4}$	м 10^{-3}	м/с	$м^3/с\ 10^{-4}$
Обычная	15	118,0	1,52	2,69	109,0	1,46	2,58	12,5	0,49	0,88
	20	39,0	0,87	2,79	35,0	0,83	2,61	4,5	0,30	0,93
	25	16,5	0,57	2,83	14,5	0,53	2,62	2,0	0,19	0,95
	30	8,0	0,40	2,83	7,5	0,38	2,68	1,0	0,14	0,99
Удлиненная	15	134	1,62	2,86	127,0	1,58	2,79	0	0	0
	20	43,0	0,92	2,89	41,0	0,90	2,83	0	0	0
	25	18,5	0,60	2,94	17,0	0,58	2,85	0	0	0
	30	9,0	0,42	2,97	8,0	0,40	2,83	0	0	0

с той лишь разницей, что уменьшение давления P_{CK} по высоте этой зоны происходит интенсивнее, т.к. оказывают влияние высокая скорость потока, поднимающегося вдоль спинки лапы, и другой характер изменения сечения свободного пространства в этой зоне долота. Этим, вероятно, объясняется, что в этой зоне величина давления на стенки далее практически остается неизменной по всей высоте долота (участок кривой 0,3–1,25 Н). После высоты равной *0,3 (h/H)*, происходит увеличение сечения свободного пространства вплоть до высоты равной *0,68 (h/H)*. Соответственно реагирует и величина давления P_{CK} в этой зоне. Она продолжает уменьшаться и становится наименьшей на высоте примерно равной *0,5 (h/H)*, после чего несколько возрастает. Здесь нужно отметить, что минимум значения давления на стенки скважины не совпадает с максимумом сечения свободного пространства, который находится на высоте *0,68 (h/H)*. Величина давления P_{CK} в проеме на этой высоте перестает увеличиваться и далее на изменение сечения свободного пространства не реагирует. Это, по нашему мнению, может происходить только тогда, когда в этой области существует зона с повышенным давлением, которое часто соответствует появлению зоны с неподвижной промывочной жидкостью (застойной зоны). Так; как область вдоль стенок скважины предварительно нами была изучена, то вероятнее всего было предположить, что такая застойная зона существует во внутренней надшарошечной области долота. Действительно, если из площадей сечений свободного пространства скважин вычесть соответствующие по высоте площади сечений свободного пространства внутренней надшарошечной зоны долота, то такая скорректированная кривая изменения сечения по высоте с большой достоверностью соответствует изменению давления P_{CK} в этой области (пунктирная линиям графике изменения площади сечения по высоте).

На (рис. 5) приведены результаты аналогичных измерений для схемы промывки с двумя боковыми насадками. Можно отметить идентичность результатов для положений измерения 0° и 60° с результатами измерения для предыдущей схемы.

Как отмечалось ранее, измерения скоростей вдоль спинок лап долота, расположенных между проемами с насадкой и без, показали, что в этой области долота скорости практически равны нулю.

Поэтому, по нашему мнению, величина давления P_{CK} в этой области (120°) почти по всей высоте долота больше, чем вдоль спинки лапы, расположенной между проемами с работающими насадками (0°).

Выявлено и различие в величине давления P_{CK} и для проема между лапами без насадки (180°). Наличие высокоскоростного, поднимающегося вверх по проему потока и отсутствие запирающего воздействия струи промывочной жидкости из насадки обусловило меньшую, чем для проема с насадкой, величину давления P_{CK} от уровня забоя до высоты *0,65 (h/H)*. Далее величина давления P_{CK} для этого проема несколько выше, чем для проема с насадкой. Видимо это объясняется тем, что мощный поток поднимающейся жидкости на высоте *0,75 (h/H)* претерпевает резкое стеснение (на что указывает и снижение скорости потока, рис. 3), в результате чего, аналогично зоне забоя, несмотря на довольно высокую остаточную скорость потока, величина давления P_{CK} в этой области несколько повышается.

Аналогичны кривые изменения давления P_{CK} при двух удлиненных насадках. Отличие заключается в несколько меньшей величине давления P_{CK} до высоты *0,68 (h/H)*, что объясняется большей скоростью потока в этом проеме при удлиненных насадках.

Кроме упомянутых выше схем промывки долота, исследованию, как и при исследовании процессов в зоне забоя, были подвергнуты и схемы промывки с тремя и двумя боковыми обычными и удлиненными насадками при наличии отверстий в лапах долота. При этом влияние отверстий в лапах долота на величину скорости и давления вдоль стенки скважины не наблюдалось. Замеры скорости непосредственно у выхода из отверстия в лапе долота показали, что величина этой скорости мала. Это подтверждали и визуальные наблюдения. Для определения механизма истечения промывочной жидкости через отверстия в лапах долота те же замеры скорости были повторены при различных диаметрах отверстий в лапах долота. Результаты этих измерений представлены в табл. 1.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что при всех схемах промывки и положениях лап с отверстиями относительно работающих насадок изменение расхода промывочной жидкости через отверстия в лапах (при различных диаметрах этих отверстий) незначительно.

Если предположить, что существует постоянная разница в давлении между внутренней надшарошечной областью долота (внутренней стороной лапы) и областью вдоль спинки лапы, то истечение промывочной жидкости через отверстие в лапе долота должно происходить аналогично истечению ее через насадки, т.е. с постоянной скоростью и расходом, увеличивающимся пропорционально увеличению площади сечения отверстия в лапе долота.

Такая же картина должна была бы наблюдаться, если какой-либо поток промывочной жидкости направлялся во внутреннюю надшарошечную зону долота и оттуда выходил через отверстие в лапе долота, как предполагают авторы исследований [4].

Здесь же, при увеличении диаметра отверстия, наблюдается уменьшение скорости истечения промывочной жидкости обратно-пропорционально площади сечения отверстия при практически одинаковом ее расходе. Такая картина характерна для эжекционного воздействия. Это предположение подтверждается и результатами, представленными в табл. 1. Наибольший расход наблюдается через отвергая в лапах, вдоль спинок которых подымается высокоскоростной поток промывочной жидкости (рис. 3.1), а при нулевой скорости потока вдоль спинки лапы (рис. 3.1, 120°) движения промывочной жидкости через соответствующие отверстие не наблюдается (табл. 1, результаты для схемы промывки с двумя удлиненными насадками, отверстия в лапах между проемами с насадкой и без насадки). Это подтверждается и результатами работы [4],

Если отнести максимальный расход промывочной жидкости через отверстия в лапах долота к общему расходу через насадки, величина которого получена замером объемным способом, то выяснится, что через отверстия в лапах поднимается лишь около 10% всей промывочной жидкости.

$$\frac{Q_O}{Q_D} * 100 = \frac{2,97 * 10^{-4} * 3 * 100}{8,96 * 10^{-3}} = 9,94\%$$

Близкий результат дали и измерения, проведенные М. Р. Мавлютовым и П. Н. Матюшиным. По их расчетам и измерениям количество жидкости, проходящее через отверстия в лапах, не превышает 11% от общего расхода [5]. Вместе с тем, нельзя согласиться с их мнением, что система промывки с отверстиями в лапах долота не имеет самостоятельного значения. Как видно из результатов, приведенных в табл. 1, скорости промывочной жидкости (> 0,7м/с), даже при скорости истечения из насадок равной лишь 18,05 м/с, при диаметрах отверстий 15 и 20 мм достаточны для подъема отбуренного шлама вверх. При реальных же скоростях (70 м/с и более) пропорционально возрастают и скорости потоков вдоль спинок лап, что приводит и к увеличению скоростей в отверстиях лап.

Таким образом, значения этих скоростей в большинстве случаев будут более 0,7 м/с, что, по общему мнению, достаточно для выноса шлама по стволу скважины.

Литература:

1. Гусман А. М. Исследование процесса выноса шлама из призабойной зоны при различных схемах промывочных устройств шарошечных долот. Автореферат кандидатской диссертации. М., 1973.
2. Васильев А. В., Сериков Д. Ю. Совершенствование схем промывки шарош. бур. долот. – М.: Нефть и газ, 2015.
3. Мавлютов М. Р. Разрушение горных пород при бурении скважин – М.: Недра – 1979.
4. Матюшин П. И. Влияние шлама на разрушение породы и механизм очистки забоя скважины при бурении шарошечными долотами. Автореферат кандидатской диссертации. Уфа, 1972.
5. Сериков Д. Ю. Повышение эффективности шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением. – М.: Нефть и газ, 2015. ●