

К вопросу исследования внутренней гидроциклонной шламовой трубы

Филимоненко Н. Т., Настаченко А. А.

Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина

Поступила в редакцию 27.02.11, принята к печати 18.03.11.

Аннотация

Приводится принцип работы внутренней гидроциклонной шламовой трубы. Оценивается возможность создания разрежения в ее полости, для подсосывания загрязненной шламом жидкости. Прогнозируется скорость движения частиц шлама в канале гидроциклона шламовой трубы. Определяется влияние снижения скорости потока шлама в канале гидроциклона на эффективность шламоотбора. Статья может быть интересна для специалистов, занимающихся вопросами шламового опробования при бурении скважин с обратной промывкой.

Ключевые слова: шламовая труба, гидроциклон, обратная промывка, жидкость, поток.

Для сбора шлама при бурении скважин с обратной промывкой используются внутренние шламовые трубы. В них улавливание твердой фазы происходит путем резкого снижения скорости жидкости за счет увеличения площади сечения канала, в котором она циркулирует [1, 4]. В результате шлам под действием гравитационных сил отделяется от потока и осаждается на дно трубы.

Практика показала [1], что при наличии в скважине технической воды (ньютоновской жидкости) сбор шлама происходит эффективно. Однако при переходе технической воды в неньютоновскую жидкость, например при длительном контакте с породами глинистого комплекса, процесс оседания шлама резко ухудшается. Это вызвано тем, что в такой жидкости оседает не вся твердая фаза, а только та ее часть, размеры частиц которой будут больше величины d_0 , определяемой по формуле (1) [3].

$$d_0 = \frac{6m\tau_0}{\rho_c - \rho}, \quad (1)$$

где m – коэффициент формы, зависящий от d_0 ; τ_0 – динамическое напряжение сдвига неньютоновской жидкости; ρ_c – плотность частицы шлама; ρ – плотность жидкости.

Расчеты d_0 показывают, что при динамическом напряжении сдвига неньютоновской жидкости $\tau_0 = 2,0$ Па практически все фракции шлама, которые могут образоваться при твердосплавном или алмазном колонковом бурении будут меньше d_0 и не смогут оседать под действием силы гравитации. Поэтому для улучшения эффекта отделения шлама от неньютоновской жидкости используются шламоуловители гидроциклонного принципа действия [2]. В таких устройствах происходит завихрение потока и интенсивное разрушение структуры жидкости, что способствует лучшему отделению твердых частиц и отбрасыванию их к стенкам шламовой трубы под действием центробежных сил. В результате частицы шлама прижимаются к ее стенкам и под действием силы тяжести оседают.

Опыт применения шламоуловителей гидроциклонного действия дает основание считать, что для разрушения структуры жидкости скорость потока должна быть довольно высокой (10–15 м/с) [2]. До настоящего времени гидроциклонный принцип разрушения структуры неньютоновской жидкости с целью улучшения шламоотбора применялся только в эжекторных буровых снарядах, в которых местная обратная промывка создается с помощью струйного насоса.

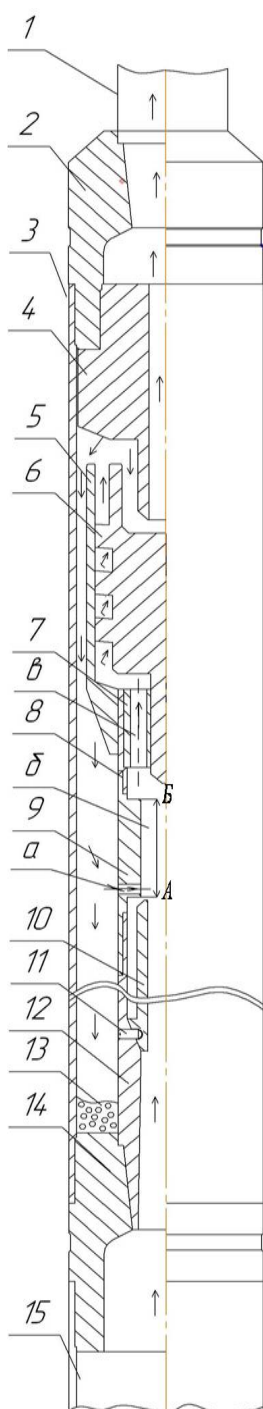


Рис. 1 Внутренняя гидроциклонная шламовая труба

Конструкция предлагаемой внутренней шламовой трубы (рис. 1) позволяет улучшить сбор шлама при бурении с обратной промывкой, создаваемой с помощью насоса, установленного на дневной поверхности.

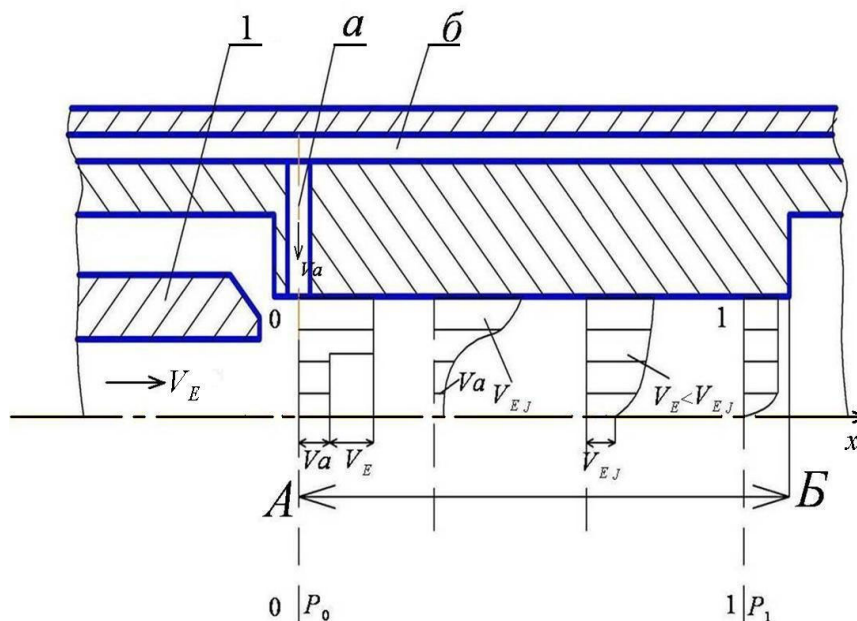


Рис. 2 Процесс смешивания потоков в камере эжектора.

Работает устройство следующим образом. Взвесенесущий поток из колонковой трубы 15 через переходник 14, внутренний канал детали 12, сопло 10, смесительную камеру (участке АБ канала б детали 9), отверстия в соединительной втулки 7, поступает в гидроциклон, канал которого выполнен в виде прямоугольной канавки, прорезанной по наружной поверхности детали 6 по винтовой линии. Канавка снаружи закрыта внутренней поверхностью детали 5. Далее взвесенесущий поток ударяется в коническую поверхность детали 4, угол наклона которой позволяет фокусировать отраженный от нее шлам в полость внутренней шламовой трубы, образованную внутренней поверхностью корпусной детали 3 и наружной поверхностью соединенных между собой деталей 9, 12 и 5. Для улучшения сбора шлама в полости внутренней шламовой трубы с помощью струйного аппарата создается разрежение для подсосывания в нее насыщенной шламом жидкости.

Струйный аппарат состоит из сопла 10, направляющего взвесенесущий поток в смесительную камеру (участок АБ), соединенную каналом а с полостью шламовой трубы, из которой происходит подсос жидкости. Очищенная жидкость через центральный канал детали 4, переходник 2 поступает в колонну бурильных труб 1, по которой выходит на дневную поверхность.

Физика процесса создания разрежения с помощью струйного аппарата подробно описана в [5, 7].

Процесс смешивания потоков в камере эжектора схематически иллюстрирован на рис. 2.

Разрежение создается за счет того, что поток с более высоким давлением, движущийся на участке АБ с большой скоростью V_E , после выхода из канала сопла (на рис. 1 сопло – позиция 10, а на рис. 2 – позиция 1) и проходящий возле канала а, соединяющего полость внутренней шламовой трубы б со скоростным потоком, увлекает за собой со скоростью V_A среду, находящуюся в полости б внутренней шламовой трубы. Увлеченный поток называется эжектируемым. В процессе смешивания двух сред происходит выравнивание скоростей, сопровождающееся, как правило,

повышением давления. При этом смешивание потоков происходит при больших скоростях V_E эжектирующего (активного) потока.

Так как струи распространяются не в атмосфере с постоянным давлением, а ограничены стенками канала, в котором они движутся, среднее осевое количество движения, осредненное по массовому расходу, не сохраняется постоянным, и статическое давление может изменяться вдоль оси x . Пока скорость эжектирующего потока V_E больше скорости эжектируемого потока в камере смешения постоянного радиуса, будет иметь место увеличение давления в направлении x . Ядро потока – это та часть прямого потока, которая входит в канал.

В сечении 0–0, совпадающим с началом камеры смешивания, средние скорости рабочего (эжектирующего) потока V_E и всасываемого (эжектируемого) потока V_{EJ} являются исходными. За этим сечением расположен начальный участок смешивания потоков, где по центру сохраняется ядро скорости рабочего потока, не охваченное процессом смешивания. В пределах ядра скорости потока постоянны и равны средней скорости истечения из сопла V_E .

Аналогичное ядро постоянных скоростей можно наблюдать в пределах кольцевой области, охватываемой всасываемым потоком. Между этими областями постоянных скоростей расположена зона турбулентного обмена, где скорости потоков постоянно меняются от V_E в ядре рабочего потока до V_{EJ} в зоне всасываемого потока. Начальный участок заканчивается в створе, где выклинивается ядро рабочего потока.

Когда точки выклинивания ядра скорости рабочего потока и ядра скорости всасываемого потока не совпадают, между начальным и основным участком появляется переходный участок, в пределах которого имеется только одна из зон постоянных скоростей.

Смешение потоков в камере эжектора сопровождается изменениями осредненного давления вдоль проточной части. По мере выравнивания профиля поперечного распределения скоростей потоков и уменьшения от сечения к сечению средней скорости суммарного потока происходит повышение давления.

Гидравлический контур жидкости, по которому она циркулирует в описываемом устройстве можно разделить на следующие участки:

- участок до смесительной камеры, на котором циркулирует жидкость с эжектирующим (рабочим) расходом, создаваемым насосом, установленном на поверхности;
- участок смесительной камеры АБ, участок до гидроциклона и непосредственно канал гидроциклона, где циркулирует жидкость с суммарным расходом, состоящим из эжектирующего и всасываемого через канал a из полости шламовой трубы эжектируемого потока;
- участок, в полости внутренней шламовой трубы, расположенный от выхода жидкости из гидроциклона до канала a , и непосредственно канал a , по которому циркулирует только эжектируемая жидкость;
- участок, в полости внутренней шламовой трубы, расположенный после выхода из гидроциклона до входа в колонну бурильных труб, по которым жидкость выходит на дневную поверхность (здесь циркулирует жидкость с эжектирующим расходом, создаваемым насосом, установленным на поверхности).

Повышение давления в зоне смешивания канала постоянного радиуса (p_1-p_0) без учета поверхностного трения о стенку может быть определено по формуле (2) [7]:

$$\frac{p_1 - p_0}{0,5V_E^2 \rho} = \frac{2}{A_E} \left(1 - \frac{1}{A_E} \left(\frac{V_A}{V_E} - 1 \right) \right)^2, \quad (2)$$

где p_0 и p_1 – соответственно давления в сечениях 0–0 и 1–1 (рис. 2); V_E – скорость рабочего потока; V_A – скорость всасываемого потока; A_E – отношение площадей сечения камеры смешения и сопла (относительное расширение потока).

Точный прогноз величины разности давлений p_1-p_0 , а так же скорости всасываемого потока V_A весьма затруднен, поскольку эти параметры зависят друг от друга, т. к. связаны аналитическим выражением (2). Без знания конкретного значения одного параметра невозможно рассчитать другой. Если ожидаемую при конкретных условиях величину параметра p_0 можно рассчитать, используя принятую в бурении методику гидравлического расчета скважины, то

величина p_1 согласно (2) зависит от скорость всасываемого потока V_A эжектируемой жидкости, которая не известна.

Расчеты по формуле (2) показывают, что при расходе эжектирующей неньютоновской жидкости 60 л/мин плотностью 1100 кг/м³ с давлением $p_0 = 3$ МПа, а также ожидаемым эжектируемым расходом 18 л/мин при диаметре канала сопла 10 и диаметрах камеры смешения соответственно 25 мм и 28 мм давление p_1 в сечении 1–1 будет равно 570 Па. Поэтому при небольшой величине эжектируемого расхода не следует ожидать значительного повышения давления в сечении 1–1. Следовательно, не будет существенного возрастания потерь давления при работе гидроциклонной шламовой трубы, вызванного включением в ее конструкцию струйного аппарата.

При движении жидкости по винтовой линии канала гидроциклона, имеющей угол наклона α к горизонтальной плоскости, абсолютная скорость V_a потока жидкости, перемещающего частицу шлама, будет раскладываться на две составляющие: горизонтальную и вертикальную. При этом следует помнить, что имеется ввиду абсолютная скорость эжектирующего и всасываемого эжектируемого потока.

На рис. 3 показан вектор абсолютной скорости частицы шлама \vec{V}_a , которая так же имеет вертикальную $\vec{V}_{верт}$ и горизонтальную $\vec{V}_{гор}$ составляющие. Последняя определяет скорость закручивания частицы шлама, что приводит к возникновению центробежной силы, прижимающей частицу к вертикальной стенке канала гидроциклона. Дальнейшее движение частицы шлама происходит с трением о вертикальную стенку канала гидроциклона, которое будет снижать скорость ее движения.

Вертикальные составляющие сил, приложенных к частице шлама при ее перемещении в канале гидроциклона, показаны на рис. 4.

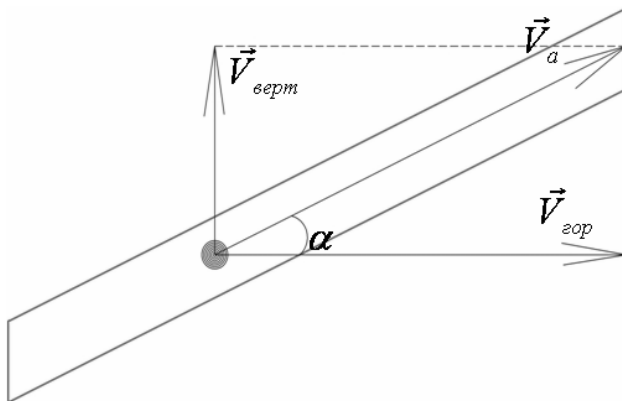


Рис. 3. Векторы абсолютной, вертикальной и горизонтальной составляющей скорости частицы шлама, движущейся в канале гидроциклона.

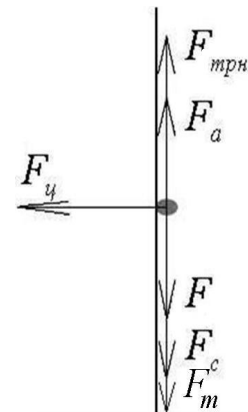


Рис. 4. Силы, приложенные к частице шлама при ее перемещении в канале гидроциклона

После того, как частица под действием горизонтальной составляющей абсолютной скорости потока будет прижата к вертикальной стенке канала гидроциклона, на нее будут воздействовать две группы сил, действующих в вертикальной плоскости (рис. 4).

Первую группу сил будут составлять вертикальная составляющая транспортирующей силы $F_{трн}$ и выталкивающая сила F_a (сила Архимеда). Эти силы будут способствовать движению частицы.

Вторая группа включает силу лобового сопротивления F_c движению частицы, силу ее веса F и силу трения F_m о вертикальную стенку канала гидроциклона, возникающую вследствие прижатия частицы к стенке гидроциклона центробежной силой F_y . Каждая из сил, входящая в эту группу, будет препятствовать движению частицы.

Дифференциальное уравнение вертикальной составляющей перемещения частицы шлама в канале гидроциклона шламовой трубы, при ее выносе потоком жидкости имеет вид:

$$m \frac{dV}{dt} = mV \frac{dV}{dS} = F_{\text{трн}} + F_a - F - F_c - F_m, \quad (3)$$

где m – масса частицы; V и S – скорость и перемещение частицы соответственно.

Массу частицы m можно рассчитать по формуле:

$$m = \rho_v V_v, \quad (4)$$

где V_v – объем частицы (определяется как объем шара, поскольку будут рассматриваться частицы округлой формы, к которым применимо понятие «частица эквивалентного диаметра»).

Вертикальная составляющая транспортирующей силы $F_{\text{трн}}$ определяется по формуле:

$$F_{\text{трн}} = \frac{\rho V_{\text{верт}}^2}{2} S_v, \quad (5)$$

где $V_{\text{верт}}$ – вертикальная составляющая абсолютной скорости частицы в канале гидроциклона; S_v – площадь миделева сечения частицы.

Вертикальную составляющую абсолютной скорости частицы можно определить по формуле:

$$V_{\text{верт}} = \left(\frac{Q}{S_k} \right) \sin \alpha - U, \quad (6)$$

где Q – суммарный расход рабочего и всасываемого потока жидкости в канале гидроциклона; S_k – площадь поперечного сечения канала гидроциклона; U – скорость оседания (витания) частицы в спокойной жидкости.

Поскольку в неньютоновской жидкости, при $\tau_0 = 2,0$ Па все частицы, образующиеся при твердосплавном и алмазном колонковом бурении, будут во взвешенном состоянии и не смогут осесть в спокойной жидкости, то при расчете $V_{\text{верт}}$ параметром U можно пренебречь.

Площадь миделева сечения частицы S_v (проекция тела на плоскость, нормальную к направлению движения тела (или жидкости) рассчитывается по формуле:

$$S_v = \frac{\pi d_v^2}{4}, \quad (7)$$

где d_v – эквивалентный диаметр частицы.

Выталкивающая сила F_a , приложенная к частице определяется по формуле:

$$F_a = mg \frac{\rho}{\rho_v}, \quad (8)$$

Сила веса частицы $F = mg$.

В том случае, если жидкость неньютоновская и проявляет вязкопластичные свойства (модель жидкости – тело Шведова), то силу лобового сопротивления F_c , приложенную к частице шарообразной формы диаметром d_v , можно определить по формуле (9) [3].

$$F_{\text{дав}} = \pi d_v^2 \tau_0 + 3\pi \eta d_v V_{\text{верт}}, \quad (9)$$

где η – структурная вязкость неньютоновской жидкости.

Если неньютоновская жидкость слабоструктурирована и не подчиняется закону трения Шведова, т.е. характеризуется только пластическими свойствами (модель жидкости – тело Бингама), то при определении $F_{\text{дав}}$, согласно рекомендациям Шищенко Р. И. [6], в формуле (9) вместо динамического напряжения сдвига τ_0 подставляется статическое напряжение сдвига θ .

Сила трения F_c о вертикальную стенку канала гидроциклона рассчитывается по формуле.

$$F_m = \frac{m V_{\text{гор}}^2}{r} k, \quad (10)$$

где $V_{\text{гор}}$ – горизонтальная составляющая абсолютной скорости частицы в канале гидроциклона; r – наружный радиус цилиндрической поверхности детали b (рис. 1), на образующей которой нарезан канал гидроциклона; k – коэффициент трения частицы шлама о вертикальную наружную стенку канала гидроциклона.

В результате решения дифференциального уравнения (3) с помощью программы Mathcad была определена вертикальная составляющая абсолютной скорости движения частиц шлама в

канале гидроциклона шламовой трубы. Расчет выполнялся при следующих исходных данных: суммарный расход эжектирующей и эжектируемой неньютоновской жидкости $Q = 78$ л/мин; плотность жидкости $\rho = 1100$ кг/м³; динамическое напряжение сдвига жидкости $\tau_0 = 1,5$ Па; η – структурная вязкость жидкости $\eta = 0,002$ Па·с; плотность частицы шлама $\rho_{\text{ш}} = 2500$ кг/м³; эквивалентный диаметр частиц шлама $d_{\text{ш}}$ принимался дискретно (0,0025 м, 0,001 м, 0,0001 м, 0,00001 м); площадь сечения канала гидроциклона обеспечивало абсолютную скорость жидкости в нем 10 м/с.

Поскольку точное значение коэффициента трения k частицы шлама о вертикальную стенку канала гидроциклона определить очень сложно, то значение k при расчете принималось 0,5 и 0,99.

На рис. 5 приведена зависимость $V_{\text{в}} = f(d_{\text{ш}})$ вертикальной составляющей $V_{\text{в}}$ абсолютной скорости движения частиц шлама в канале гидроциклона от эквивалентного диаметра частиц $d_{\text{ш}}$ при разных значениях угла наклона канала гидроциклона α к горизонтальной плоскости. На рис. 5,а показана зависимость $V_{\text{в}} = f(d_{\text{ш}})$ при $k=0,5$. На рис. 5,б – зависимость $V_{\text{в}} = f(d_{\text{ш}})$ при $k=0,99$.

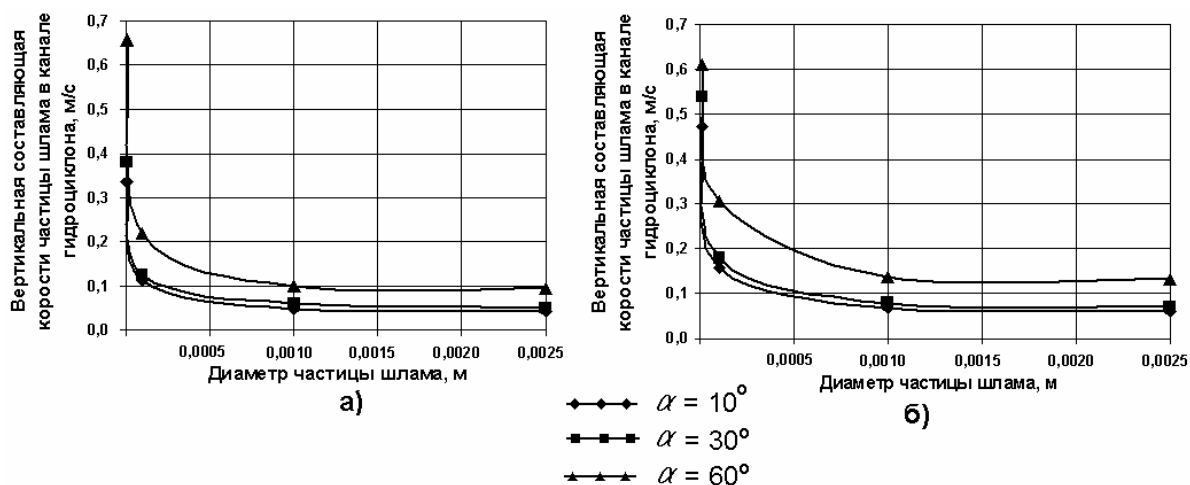


Рис. 5 Зависимость $V_{\text{в}} = f(d_{\text{ш}})$ при разных значениях угла наклона канала гидроциклона α к горизонтальной плоскости: $k=0,5$ (а); $k=0,99$ (б)

Из анализа вышеприведенных зависимостей следует:

1. Вертикальная составляющая $V_{\text{в}}$ абсолютной скорости движения частиц шлама в канале гидроциклона значительно меньше вертикальной составляющей абсолютной скорости рабочей и всасываемой жидкости в канале гидроциклона. Так спектр изменения $V_{\text{в}}$ находится в пределе от 0,059 до 0,609 м/с при $k=0,5$ (рис. 5,а). При $k=0,99$ $V_{\text{в}}$ изменяется в пределе от 0,042 до 0,657 м/с (рис. 5,б). Абсолютная скорость рабочей и всасываемой жидкости в канале гидроциклона равна 6,5 м/с, т. е. отличается почти в десять раз.
2. Снижение $V_{\text{в}}$ наблюдается при уменьшении угла наклона канала гидроциклона α к горизонтальной плоскости.
3. Для частиц шлама $d_{\text{ш}}$ от 0,0025 м, 0,002 м. и 0,001 м (крупные частицы шлама) увеличение $V_{\text{в}}$ незначительно. Так при $\alpha = 10^\circ, 30^\circ$ и 60° и $k = 0,5$ спектр изменения $V_{\text{в}}$ для таких частиц соответственно (0,059–0,069 м/с), (0,071–0,079 м/с) и (0,131–0,138 м/с). Для случая, когда $k = 0,99$ спектр изменения $V_{\text{в}}$ частиц эквивалентным диаметром $d_{\text{ш}}$ от 0,0025 м, 0,0020 м и 0,001 м будет соответственно (0,042–0,049 /с), (0,051–0,079 /с) и (0,093–0,098 м/с).

Для мелких частиц шлама $d_{\text{ш}}$ (от 0,0001 м до 0,00001 м) наблюдается значительное увеличение $V_{\text{в}}$. Так при $\alpha = 10^\circ, 30^\circ$ и 60° и $k = 0,5$ спектр изменения $V_{\text{в}}$ для таких частиц соответственно (0,157 – 0,473 м/с), (0,178 – 0,537 м/с) и (0,307 – 0,609 м/с). Для случая, когда $k = 0,99$ спектр изменения $V_{\text{в}}$ частиц эквивалентным диаметром $d_{\text{ш}}$ от 0,0001 м до 0,00001 м будет соответственно (0,111 – 0,335 м/с), (0,126 – 0,381 м/с) и (0,218 – 0,657 м/с).

Движение частицы шлама с небольшой вертикальной составляющей $V_{\text{в}}$ абсолютной скорости в канале гидроциклона будет позитивно влиять на сбор шлама во внутреннюю шламовую трубу. Это объясняется тем, что после выхода ее из канала гидроциклона с небольшой скоростью происходит дальнейшее снижение скорости жидкости, а, следовательно, и скорости

частицы за счет увеличения площади сечения канала, в который она входит. В результате шлам под действием гравитационных сил лучше отделяется от потока неньютоновской жидкости с разрушенной в гидроциклоне структурой и осаждается на дно трубы. Создание разрежения в полости внутренней шламовой трубы подсасывает в нее жидкость со шламом после выхода их гидроциклона, тем самым улучшая сбор шлама.

Выводы

1. Создание разрежения в полости внутренней шламовой трубы путем включения в ее конструкцию струйного аппарата способствует улучшению шлагоотбора.
2. Внутренняя гидроциклонная шламовая труба обеспечивает вход частицы шлама в ее полость с небольшой вертикальной составляющей абсолютной скорости V_6 , что улучшает сбор шлама в нее. Снижение V_6 наблюдается при уменьшении угла наклона канала гидроциклона α к горизонтальной плоскости.
3. Существенного возрастания потерь давления при работе гидроциклонной шламовой трубы, вызванного включением в ее конструкцию струйного аппарата, наблюдаться не будет.

Библиографический список

1. Волокитенков А. А. Технология отбора шлама при бурении скважин / А. А. Волокитенков, А. С. Волков, И. И. Толокнов, М. М. Розин. – М.: Недра, 1973. – 200 с.
2. Дерусов В. П. Обратная промывка при бурении геологоразведочных скважин / В. П. Дерусов. – М.: Недра, 1984. – 184 с.
3. Леонов Е. Г. Гидроаэромеханика в бурении: Учебник для вузов / Е. Г. Леонов, В. И. Исаев. – М.: Недра, 1987.–269 с.
4. Справочник по бурению скважин на воду / Д. Н. Башкатов, С. С. Сулакшин, С. Л. Драхлис, Г. П. Квашнин. Под редакцией проф. Д. Н. Башкатова. – М.: Недра, 1979. – 560 с.
5. Справочник по гидравлическим расчетам. Под редакцией П. Г. Киселева. Изд. 4-е, переработ, и доп. М.: Энергия», 1972. – 312 с.
6. Шищенко Р. И. Практическая гидравлика в бурении / Р. И. Шищенко, Б. И. Есьман. – М.:Недра, 1996. – 285с.
7. <http://www.heuristic.su/effects/catalog/est/byId/description/1090/index.html>.

© Филимоненко Н. Т., Настаченко А. А., 2011.

Анотація

Наведено принцип роботи внутрішньої гідроциклонної шламової труби. Оцінюється можливість створення розрядження в її порожнині, для підсосу забрудненої шламом рідини. Прогнозується швидкість руху частинок шламу в каналі гідроциклона шламової труби. Визначається вплив зниження швидкості потоку шламу в каналі гідроциклона на ефективність шламівідбирання. Стаття може бути цікава для фахівців, що займаються питаннями шламівідбирання при бурінні свердловин зі зворотним промиванням.

Ключові слова: шламова труба, гідроциклон, зворотне промивання, рідина, потік.

Abstract

Given the principle of internal hydrocyclone slurry pipe. The possibility of creating low pressure in its cavity for sucking contaminated sludge liquid. Projected velocity of sludge particles in the channel of the hydrocyclone slurry pipe. Determined by the effect of reducing the flow of sludge in the channel of the hydrocyclone on the effectiveness of slurry selection. The article may be interesting for professionals who deal with slurry selection during backwash drilling.

Keywords: slurry pipe, hydrocyclone, backwashing, the liquid, flow.