

УДК 622.24

А. Н. Давиденко, д-р техн. наук; **А. А. Игнатов**

*Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»,
г. Днепр, Украина*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ УСТРОЙСТВА ПОИНТЕРВАЛЬНОЙ ОЧИСТКИ СКВАЖИНЫ

Рассмотрены вопросы движения промывочной жидкости сквозь систему лопастей устройства для очистки каверн. Изучено влияние геометрии рабочего органа устройства для очистки каверн на скоростные характеристики активного потока очистного агента. Полученные результаты теоретических и лабораторных исследований могут быть положены в основу создания эффективной технологии крепления и тампонирувания ствола скважины с высокими технико-экономическими показателями.

Ключевые слова: скважина, каверна, лопасть, устройство для обработки, скоростная характеристика, очистной агент.

Введение

Как и любая из аэрогидродинамических машин, к классу которых, несомненно, принадлежит устройство по очистке каверн, она требует достаточно точного и вполне определенного проектного расчета, имеющего целью задачу получения приемлемых выходных характеристик, обеспечивающих разрушение и удаление шламовых скоплений, находящихся в осложненных интервалах [1]. Конструкция всего устройства в целом и его исполнительного органа в частности должна быть рационально подобрана исходя из данных теоретического расчета, а ее работоспособность подтверждена стендовыми испытаниями. Однако возможность формулирования адекватной математической модели функционирования такой машины существенно осложняется наличием широкого спектра воздействующих обстоятельств. Эффективность использования устройства в процессе подготовки скважин к креплению проявится в полной мере только тогда, когда его работа будет основана на максимально возможном учете всего комплекса скважинных условий.

Учитывая невозможность непосредственного доступа к наблюдению и контролю за процессами, происходящими в стволе скважины, уже на этапе проектирования устройства необходимо заложить в его конструкцию такие технические решения, мониторинг и управление которыми будет надежно обеспечено с поверхности. Именно в этой связи рабочий орган механизма осуществлен в виде системы лопастей. Такое исполнение позволяет достаточно полно совершать регулирование гидродинамических характеристик активных струй, создаваемых устройством, в широком диапазоне функциональных признаков.

Целью настоящей работы является экспериментально-теоретическое изучение работы лопаточного органа устройства по очистке кавернозных зон скважин в области рациональных скоростных характеристик активных потоков, им формируемых и обеспечивающих эффективное разрушения и удаление глинисто-шламовых скоплений.

Методика исследования

Несмотря на значительное число работ, посвященных вопросам изучения взаимодействия тех или иных форм тел (выступающих в качестве исполнительного узла машины) с потоком жидкости (газа), особенно широко представленных в авиационной отрасли, в этом направлении еще существует множество нерешенных задач. Их наличие обусловлено огромным разнообразием условий воздействия лопаточного органа на поток в каждом конкретном случае [2]. Практика исследования и применения лопаточных устройств показала следующее: характер происходящих в них процессов крайне индивидуален, что сильно затрудняет теоретическое и опытное аргументирование их конструктивных и технологических

особенностей. Исходя из сказанного, была поставлена и проведена серия экспериментов, предназначенных для выяснения особенностей функционирования лопастного механизма в условиях максимально приближенных к реальным скважинным и формулирование на их основе положений проектного расчета устройства для обработки кавернозных зон.

Прежде всего, необходимо остановиться на отличительных признаках конструктивного оформления лопастного органа, задающих его пространственное положение. В результате тщательных исследований, направленных на изыскание рационального вида лопасти, была доказана целесообразность придания ей формы винтовой поверхности, что с одной стороны позволяет достигнуть требуемых высоких гидродинамических параметров устройства, а с другой получить довольно строгую теорию работы исполнительного органа с возможностью регулирования и прогнозирования его технологических характеристик. Для получения контура такого вида лопасти была взята винтовая поверхность, являющаяся результатом следа поступательного движения точки по образующей и вращательного движения этой же образующей. Итогом такого сложного перемещения является цилиндр, на боковой поверхности которого имеется след движения винтовой линии. Если этот цилиндр разрезать по его образующей, то получится прямоугольник с высотой, составляющей шаг винтовой линии (H) и основанием, равным длине развернутой окружности ($2\pi r$), при этом отношение этих параметров даст значение уклона винтовой линии или шагового угла, сама же винтовая линия развернется в прямую, совпадающую с диагональю прямоугольника (рис. 1, а).

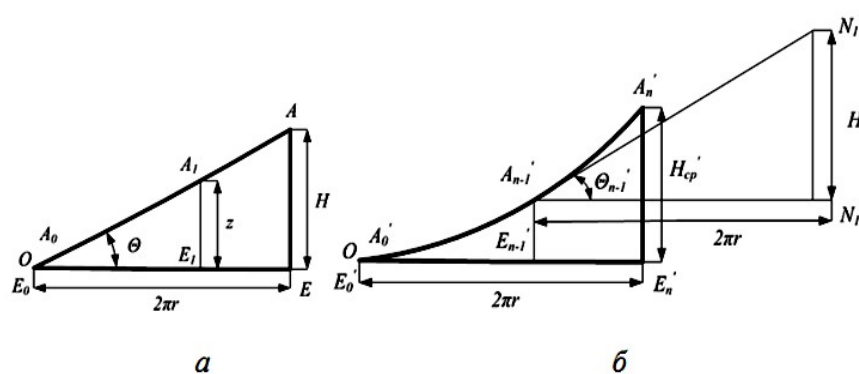


Рис. 1. Развертки: а – правильной и б – неправильной винтовых линий

Движение образующей вокруг оси и вдоль нее может быть равномерным и неравномерным, соответственно этому получают правильные (рис. 1,а) и неправильные (рис. 1, б) винтовые линии.

Винтовую линию можно задать аналитически, а именно параметрическим способом. Для этого необходимо текущие координаты (x ; y ; z) произвольной точки линии рассматривать как функцию некоторой независимой переменной p , называемой параметром:

$$x = f_1(p), y = f_2(p), z = f_3(p) \quad (1)$$

Уравнение (1) будет параметрическим уравнением кривой; причем за параметр p можно принять любую переменную, характеризующую положение точки на линии.

В качестве параметра винтовой линии примем угол E_0AE (рис. 1, а). Точка E является проекцией точки A на плоскость, лежащую в основании цилиндра в осях $Oxuz$. Абсцисса x и ордината y точки E совпадают с абсциссой и ординатой точки A – это проекции вектора \overrightarrow{OE} на оси Ox и Oy и соответственно

$$x = r \cos p, y = r \sin p. \quad (2)$$

Аппликату z точки A_1 находим из треугольника E_0AE , в котором $|E_0E_1|$ является выпрямленной дугой в основании цилиндра, откуда

$$|E_0E_1| = rp. \quad (3)$$

Далее получаем

$$\frac{|E_1A_1|}{|EA|} = \frac{|A_0E_1|}{|A_0E|}. \quad (4)$$

Тогда

$$\frac{z}{H} = \frac{rp}{2\pi r} = \frac{p}{2\pi}, \quad (5)$$

откуда

$$z = \frac{H}{2\pi} p. \quad (6)$$

Следовательно, параметрическими уравнениями винтовой линии будут

$$x = r \cos p, y = r \sin p, z = \frac{H}{2\pi} p. \quad (7)$$

Шаг винтовой линии в контрольной точке A_{n-1}' для неправильной винтовой линии (рис. 1, б) можно получить из выражения

$$H_1' = 2\pi r \operatorname{tg} \Theta_{n-1}', \quad (8)$$

где Θ_{n-1}' – угол наклона касательной в контрольной точке к основанию секущего цилиндра.

Для геометрического решения задачи нахождения шага в точке A_{n-1}' необходимо провести к ней касательную $A_{n-1}'N_1'$ и параллельную развернутому основанию цилиндра прямую линию $A_{n-1}'N_1$, длиной равной $E_0'E_n' = 2\pi r$, длина перпендикуляра N_1N_1' до пересечения его с касательной, определит величину шага H_1' в точке A_{n-1}' , при этом $H_1' \neq H_1$. Угол $N_1A_{n-1}'N_1'$ будет шаговым углом Θ_{n-1}' в контрольной точке.

Лопасть исполнительного органа устройства образовывалась ограничением винтовой поверхности двумя концентричными с ее осью цилиндрами. При этом внутренний цилиндр будет нести винтовую поверхность и выступать корпусом устройства. Сама же лопасть выделяется из винтовой ленты перпендикулярными ее оси плоскостями. К примеру, для получения двухлопастной конструкции необходимо иметь две винтовые поверхности, начинающиеся в одном и том же нормальном сечении на расстоянии полуокружности, описываемой направляющей винтовой поверхности, одна относительно другой.

Проходя через систему лопастей жидкость совершает сложное движение, которым определяется гидромеханические свойства устройства для очистки каверн. Материальными границами потока промывочной жидкости в интервале корпуса устройства являются наружные стенки последнего и ствол скважины. Стенки корпуса неподвижны и скорости потока относительно них, а при статическом положении устройства и стенок скважины, являются скоростями абсолютного движения. Система лопастей вращается, т.е. они подвижны и, проходя их жидкость, будет совершать относительное движение. Траектория движения жидкости, протекающей сквозь исполнительный орган устройства будет описываться контуром профильного сечения лопасти.

На рис. 2 показано движение некоторой точки L , перемещающейся вместе с потоком вдоль кривой AB , соответствующей произвольному профилю лопасти. Указанная точка

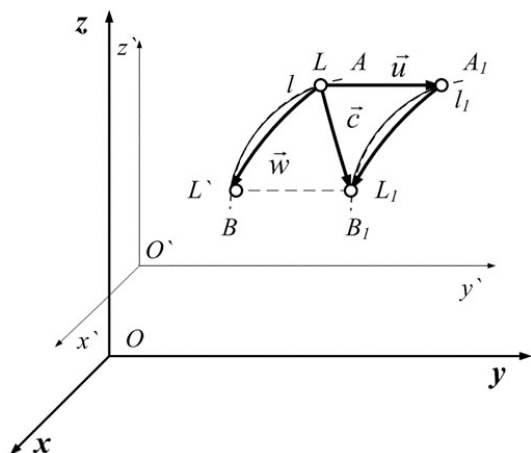


Рис. 2. Схема сложного движения активного потока жидкости сквозь лопастную систему

совершит за промежуток времени Δt перемещение, равное пути движения от входной до выходной кромки лопасти по траектории AB , которое будет

относительным, определяемым вектором $\overrightarrow{LL'}$. Также кривая AB , перемещаясь вместе с подвижными осями $O'x'y'z'$, перейдет за этот интервал времени в положение A_1B_1 . Одновременно та точка l кривой AB , с которой в начальный момент времени совпадает точка L , совершит переносное перемещение $\overrightarrow{l_1l_1} = \overrightarrow{LL'}$. Таким образом точка L перейдет в положение L_1 и совершит за время Δt

абсолютное перемещение $\overrightarrow{LL_1}$.

Векторный треугольник Ll_1L_1 дает следующее выражение

$$\overrightarrow{LL_1} = \overrightarrow{LL_1} + \overrightarrow{l_1L_1}. \quad (9)$$

Разделив обе части (а) на Δt и переходя к пределу, получим

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overrightarrow{LL_1}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overrightarrow{LL_1}}{\Delta t} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overrightarrow{l_1L_1}}{\Delta t}. \quad (10)$$

Исходя из сказанного отметим следующее: движение, совершаемое точкой L по отношению к подвижной системе отсчета (оси $O'x'y'z'$), будет относительным, а AB относительной траекторией. Скорость точки L по отношению к осям $O'x'y'z'$ будет относительной скоростью (\vec{w}). Движение, совершаемое подвижной системой отсчета (а следовательно и всеми связанными с ней точками пространства) по отношению к неподвижной системе $Oxyz$, является для точки L переносным движением. Скорость той неизменно связанной с подвижными осями точки l , с которой в данный момент времени совпадает движущаяся точка L , является переносной скоростью (\vec{u}). Движение, совершаемое точкой L по отношению к неподвижной системе отсчета $Oxyz$ будет абсолютным движением (\vec{c}).

Тогда, по определению

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overrightarrow{LL_1}}{\Delta t} = \vec{c}, \quad (11)$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overrightarrow{l_1L_1}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overrightarrow{LL'}}{\Delta t} = \vec{w}, \quad (12)$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overrightarrow{LL_1}}{\Delta t} = \vec{u}. \quad (13)$$

В цилиндрической системе координат [3] вектор абсолютной скорости может рассматриваться как геометрическая сумма трех взаимно ортогональных компонентов скорости

$$\vec{c} = \vec{c}_R + \vec{c}_u + \vec{c}_z, \quad (14)$$

где R – расстояние от рассматриваемой точки до оси вращения устройства; Z – координата, связанная с осью вращения.

Для получения требуемых расчетных характеристик с целью сравнения их с экспериментально полученными, необходимо установить форму потока сквозь рассматриваемое устройство и она будет, в данном случае, осесимметричной

$$\frac{\partial c_R}{\partial \varphi} = \frac{\partial c_u}{\partial \varphi} = \frac{\partial c_Z}{\partial \varphi}, \quad (15)$$

где φ – потенциальная функция скорости.

Следующей важной стадией было установление рационального количества лопастей в устройстве и его влияние на механизм формирования активных потоков с одновременным обеспечением полного выполнения технологических задач этапа крепления ствола. Ранее было найдено, что достижение приемлемых рабочих характеристик в лопастном органе может быть осуществлено при таких геометрических соотношениях: угол входа потока на лопасть $25 \leq \theta_1 \leq 35^\circ$, а выхода с лопасти – $\theta_2 = 50-65^\circ$. Отсюда явно видна прямая подчиненность выходных гидродинамических параметров устройства конструктивному исполнению формы лопасти, требующему наличия у нее переменного шага в осевом (аксиальном) направлении, а, следовательно, образование ее поверхности должно совершаться неправильной винтовой линией (рис. 1, б).

На рис. 3 показаны результаты испытания моделей рабочего органа устройства, имевших в своем составе число лопастей η от 2 до 6. В ходе такого эксперимента контролировалось значение вызванной абсолютной скорости потока c и как его производная – расход протекающей жидкости Q . Необходимо отметить, что представленный график отражает осредненные значения скоростей c для всей серии моделей лопастных органов с рациональными значениями углов θ , а в качестве контрольной точки съема показаний выбрана окрестность в средней части плоскости вращения.

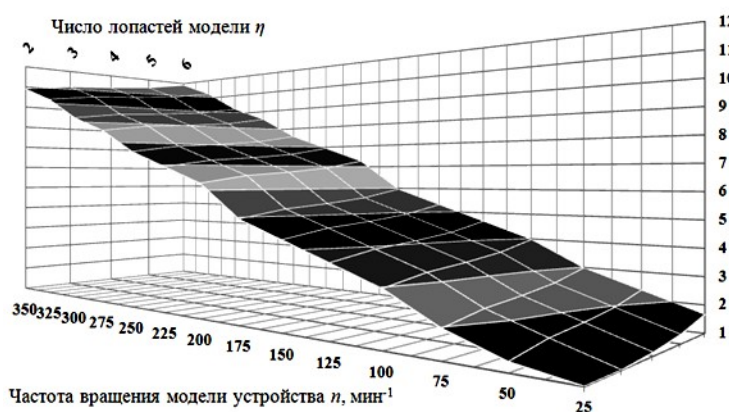


Рис. 3. Скоростная характеристика модели устройства с числом лопастей η от 2 до 6

аналитическим способом установить можно лишь косвенно, что подтверждает обоснованность экспериментально-теоретического подхода к изучению работы устройства.

Стендовые исследования также способствовали обнаружению еще одного весьма важного технического признака в конструкции рабочего органа устройства, а именно – ширины лопасти. Совершенно очевидно, что при одних и тех же угловых характеристиках ширина лопасти может варьировать в довольно большом диапазоне. Для выяснения степени влияния рассматриваемого признака был поставлен ряд опытов, в которых переменным параметром была ширина лопасти, при постоянных θ , а кроме того, значение η также изменялось от 2 до 4. Для большей наглядности и практической применимости результатов исследований за основу бралась не сама ширина лопастей, а суммарная площадь их проекции

ΣS (выраженная в процентах от площади окружности, описываемой краем лопастей), на плоскость нормальную оси устройства. Данные рис. 4, иллюстрирующего результаты проведенных опытов при $\theta_1 = 25^\circ$ и $\theta_2 = 55^\circ$, содержит сведения о величине абсолютных скоростей c для различных значений ΣS .

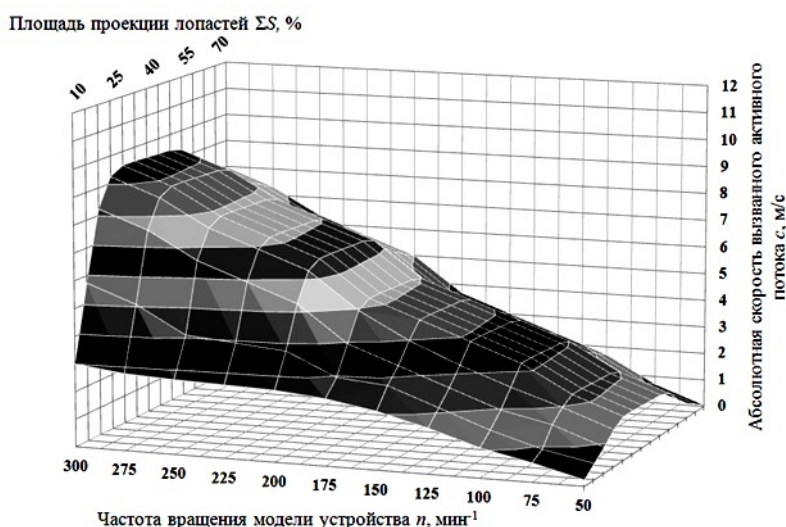


Рис. 4. Скоростная характеристика модели устройства при переменном параметре ΣS

30–35%), третья – стабилизации и некоторому снижению абсолютных скоростей ($\Sigma S = 40$ –50%) и наконец четвертая – зона падения величин скоростей c ($\Sigma S = > 50\%$). По причине наличия значительного объема опытных данных и ограниченностью возможности подробного их изложения необходимо отметить, что при $\eta = 4$ и угловых характеристиках

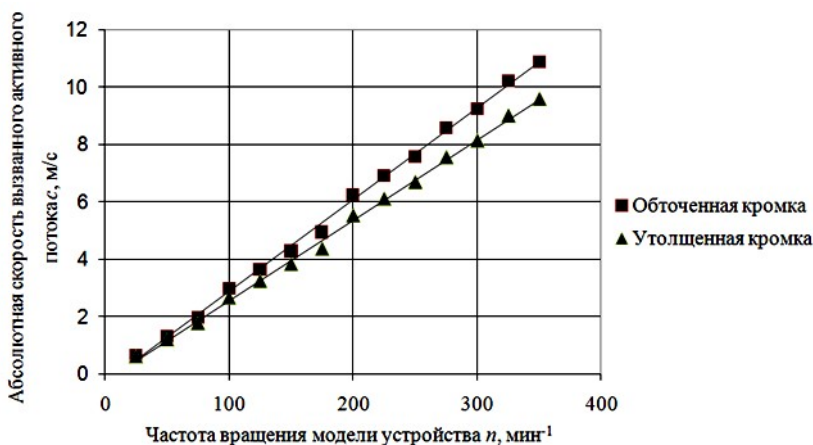


Рис. 5. Скоростная характеристика модели устройства при различном конструктивном оформлении входящей кромки

идентичных рассмотренному примеру, зона максимальных скоростей соответствует $\Sigma S = 20$ –25%, при их стабильном значении вплоть до $\Sigma S = 60\%$. Исследование лопастного органа с $\theta_1 = 35^\circ$ и $\theta_2 = 65^\circ$ показали следующее: для $\eta = 2$ максимальные скорости достигаются при $\Sigma S = 35$ –40%, а в случае $\eta = 4$ при $\Sigma S = 25$ –30%. Также необходимо указать на значительно меньший интервал зоны стабильных значений абсолютной скорости, для описанных условий он ограничен $\Sigma S = 40$ –45%.

Особый интерес представляет вопрос о рациональном контуре профильного сечения лопасти. В подавляющем большинстве машин, использующих лопаточный орган [5], последний оформлен в виде крылового (иными словами авиационного) профиля, характеризующегося наличием утолщенной округлой входящей кромки и заостренной выходящей. Применительно к устройству для очистки каверн обозначенное обстоятельство требует дополнительных исследований.

Анализ рис. 4 позволяет обоснованно говорить о том, что по аналогии с угловой характеристикой лопастей, существует также рациональный диапазон для их ширины. На рассматриваемом графике можно условно выделить четыре зоны, первая из которых соответствует интенсивному росту абсолютных скоростей ($\Sigma S = 10$ –25%), вторая – достижению максимально возможных значений c ($\Sigma S =$

30–35%), третья – стабилизации и некоторому снижению абсолютных скоростей ($\Sigma S = 40$ –50%) и наконец четвертая – зона падения величин скоростей c ($\Sigma S = > 50\%$). По причине наличия значительного объема опытных данных и ограниченностью возможности подробного их изложения необходимо отметить, что при $\eta = 4$ и угловых характеристиках идентичных рассмотренному примеру, зона максимальных скоростей соответствует $\Sigma S = 20$ –25%, при их стабильном значении вплоть до $\Sigma S = 60\%$. Исследование лопастного органа с $\theta_1 = 35^\circ$ и $\theta_2 = 65^\circ$ показали следующее: для $\eta = 2$ максимальные скорости достигаются при $\Sigma S = 35$ –40%, а в случае $\eta = 4$ при $\Sigma S = 25$ –30%. Также необходимо указать на значительно меньший

Данные, представленные на рис. 5 отражают результаты исследований по определению характера циркуляции жидкости при различных оформлениях обтекаемых кромок. Программой опытов предусмотрено решение поставленной задачи на примере лопастного органа с $\theta_1 = 25^\circ$ и $\theta_2 = 55^\circ$, а $\eta = 2$; 4. Как и в предыдущих исследованиях изучалось влияние особенностей конструктивного исполнения лопасти на вызванную абсолютную скорость.

Изучение зависимостей представленных на рис. 5 приводит к выводу, что как в случае с обточенной кромкой, так и крыловым профилем с закругленной кромкой, скорость активного потока имеет практически одинаковые значения; причем в случае закругленной кромки скорости даже несколько снижаются (в среднем на 8–12%). Для дополнительного обоснования полученных результатов были проведены испытания и с другими лопастными органами с варьированием параметров θ и η , однако выявить иного характера влияния, в сопоставлении с уже отмеченным, не удалось. Весомым преимуществом крылового профиля, в данных условиях, оказалось лишь большая жесткость лопастей. Следовательно, авиационный профиль лопаток выгоден только с позиций предания им определенной степени прочности, вместе с тем, утолщением лопасти по всему ее поперечному сечению можно добиться достижения требуемых механических показателей, при этом никаких существенных изменений в гидродинамическую характеристику лопастного органа, в настоящем конструктивном исполнении, такие модификации не вносят, что подтверждено серией экспериментальных исследований. Уместно будет заметить, что изготовление лопастей из листового проката несколько проще в сравнении с применением авиационного, требующего некоторого усложнения технологического процесса производства, а это, естественно, отразится на стоимости устройства в целом.

Важные практические результаты были получены при исследовании работы лопастного органа в случае изменения величины давления со стороны входящих кромок; его повышение приводит к росту скорости активного потока и стабилизации в колебании ее значений, несколько трансформируются гидродинамические характеристики и для случая $\theta = var$, $\eta = var$.

Выводы

Рассмотрены геометрические и аналитические особенности контура лопасти, полученного с помощью винтовой поверхности.

Исследованы вопросы формирования активных потоков при различном числе лопастей в рабочем органе устройства для очистки каверн.

Установлен рациональный диапазон изменения ширины лопасти для получения приемлемых скоростных характеристик.

Изучено влияние конструктивного оформления входящей кромки лопасти на распределение поля скоростей в потоке.

Розглянуто питання руху промивальної рідини крізь систему лопатей пристрою для очищення каверн. Вивчено вплив геометрії робочого органу пристрою для очищення каверн на швидкісні характеристики активного потоку очисного агента. Отримані результати теоретичних і лабораторних досліджень можуть бути покладені в основу створення ефективної технології кріплення і тампонування стовбура свердловини з високими техніко-економічними показниками.

Ключові слова: *свердловина, каверна, лопать, пристрій для обробки, швидкісна характеристика, очисний агент.*

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY PRINCIPLE OF THE DEVICE INTERVAL STANDARDIZED CLEAN WELL

The subject of the article are questions of motion of bore mud through the system of impeller blades of device for cleaning of cavities. Influence of geometry working organ device for processing cavities on velocity parameters of active stream of drilling mud is studied. They got results of theoretical and laboratory

investigations can be applied for making of effective technology of timbering and tamponing of tube of bore hole with high technical and economic indexes.

Key words: bore hole, cavity, impeller blade, device for treatment, velocity parameter, bore mud.

Литература

1. К вопросу о необходимости обработки кавернозных зон скважин / А. Н. Давиденко, Б. Т. Ратов, А. А. Игнатов, А. Т. Тулепбергенов // Вестник КазНУ. – 2016. – № 2(114) – С. 139–147.
2. Шерстюк А. Н. Насосы, вентиляторы, компрессоры. – М.: Высшая школа, 1972. – 338 с.
3. Штеренлихт Д. В. Гидравлика. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.
4. Пат. 90541 № u200805093 Украина, МПК Е 21 В 37/02. Пристрій для обробки стовбура свердловини / О. М. Давиденко, А. О. Ігнатов, В. В. Яцик; Заявл. 21.04.08; Опубл. 26.10.09; Бюл. № 20.
5. Алферьев М. Я. Гидромеханика. – М.: Речной транспорт, 1961. – 327 с.

УДК 622.233:551.49

А. А. Кожевников, А. К. Судаков, доктора технических наук

*Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»,
г. Днепр, Украина*

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВОДНОГО РАСТВОРА ОРГАНИЧЕСКОГО ПОЛИМЕРА КРИОГЕННО-ГРАВИЙНОГО КОМПОЗИТА ФИЛЬТРА

Приведены методика и результаты исследования свойств водного раствора органического полимера криогенно-гравийного композита фильтра. Рассмотрены перспективы применения водного раствора органического полимера для омоноличивания гравийного материала блочного криогенно-гравийного фильтра.

Ключевые слова: гидрогеологическая скважина, криогенная технология, криогенно-гравийный фильтр, минераловязящий материал.

Актуальность и состояние проблемы

При скважинной добыче полезных ископаемых (воды, нефти, газа, урана и др.) и создании подземных хранилищ газа используют два основных вида гравийных фильтров: опускные, которые собраны на поверхности земли с последующей установкой их в скважинах в готовом виде, и создаваемые в скважине с помощью гравия, который засыпают или закачивают в скважину по межколонному пространству.

При бурении скважин малой и средней глубины успешно применяют гравийные фильтры с рыхлой обсыпкой, которую создают путем засыпки гравия между труб.

При бурении же более глубоких скважин с малым конечным диаметром, а также при вскрытии напорных водоносных горизонтов, самоизливающихся на поверхность земли создание таких гравийных фильтров становится затрудненным, а в некоторых случаях и невозможным. Кроме того, технологии их создания имеют ряд существенных недостатков [1].

К опускным фильтрам относят корзинчатые, кожуховые и блочные фильтры, применение которых также имеет ряд существенных недостатков. Корзинчатые и кожуховые фильтры имеют повышенное гидравлическое сопротивление. В процессе эксплуатации из-за электрохимической реакции фильтры склонны к быстрому зарастанию. При спуске они деформируются, что приводит к образованию неравномерного по толщине гравийного слоя, а иногда и к формированию открытых каналов и пустот.