

УДК 622.35

**О ВЫБОРЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
И РЕЖИМОВ РАБОТЫ КЛАПАННОГО СИНХРОНИЗАТОРА
В КОНСТРУКЦИИ УРАВНОВЕШЕННОГО ГЕРМЕТИЗАТОРА**

Ю. М. Леконцев¹, П. В. Сажин¹, О. А. Темиряева¹, С. Ю. Ушаков²

¹Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия,

²Шахта “Романовская” ООО “Горняк”,
ул. Нижний Барзас АБК, 652421, г. Берёзовский, Россия

По результатам шахтных исследований направленного гидроразрыва с целью разупрочнения породного прослойка в угольном пласте с использованием уравновешенного герметизатора проведена доработка клапанного синхронизатора, в работе которого обнаружены вибрационные эффекты. Приведены результаты лабораторных исследований клапанного синхронизатора КС-1 и обоснованы его рациональные параметры.

Направленный гидроразрыв, уравновешенный герметизатор, клапанный синхронизатор КС-1

Работы по реализации метода поинтервального гидроразрыва (ПГР) с целью снижения прочности породного прослойка угольного пласта “Абрамовский” проводились на шахте “Романовская” в лаве № 2 [1–3]. Поинтервальный гидроразрыв осуществлялся уравновешенным герметизатором, в конструкцию которого входят два резинометаллических уплотнителя типа “таурис”, соединенных клапаном-синхронизатором КС-1. Конструкция и принцип работы уравновешенного герметизатора с клапаном КС-1 описаны в работе [4].

Выполненные на шахте поинтервальные гидроразрывы породного прослойка с последующим его водонасыщением способствовали снижению прочности прослойка в 1.5–2 раза. Последнее позволяет говорить об эффективности предложенного метода. Однако в процессе проведения поинтервальных гидроразрывов массива в гидросистеме насоса возникала пульсация, приводящая к вибрации жестких трубопроводов, сопровождаемая звуковым эффектом, напоминающим работу низкочастотного виброисточника.

Характерная запись изменения давления рабочей жидкости (рис. 1) отображает процесс роста давления в межпакерной зоне (участок 0–б), начало трещинообразования (б–в) и процесс водонасыщения (в–г). Шумовой эффект возникает в период водонасыщения скважины (на записи от точки д) и далее на протяжении всего процесса водонасыщения. С отключением насоса пульсация и вибрация прекращаются. При повторных включениях насоса давление в системе колеблется от ~2 до ~6 МПа и процесс пульсации с шумовым эффектом повторяется.

Частота колебаний, которая составляет от 18 до 30 Гц, при длительном процессе работы насоса может привести к серьезным нарушениям отдельных гидроузлов. В связи с этим после окончания запланированных на первом этапе шахтных экспериментов [4] возникла задача ус-

тановления источника виброшумового эффекта. С этой целью от насосной установки поочередно отключались все узлы, входящие в комплект гидрооборудования для проведения гидроразрыва (трубы, соединительная арматура, измерительная аппаратура и т. д.). Вибрация прекратилась сразу после отключения уравновешенного герметизатора.

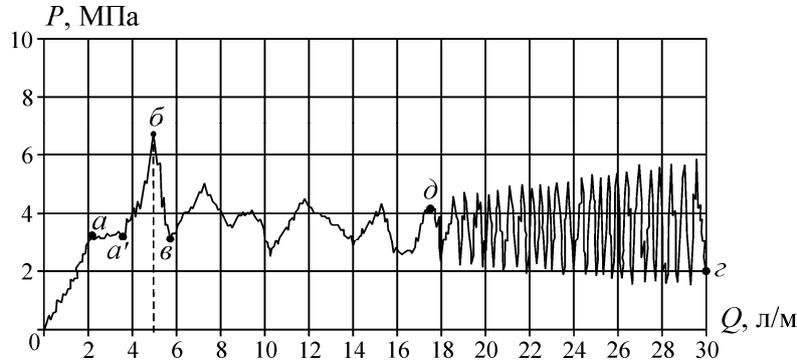


Рис. 1. Запись изменения давления рабочей жидкости при проведении гидроразрыва

Таким образом, методом исключения комплектующих узлов, входящих в состав оборудования для проведения поинтервальных гидроразрывов, был определен источник пульсации, а именно уравновешенный герметизатор.

Несмотря на практическую работоспособность, герметизатор был демонтирован и доставлен в лабораторию для установления причин возникновения пульсации в гидросистеме шахтной установки. Учитывая проверенную практикой надежную работу герметизаторов типа “таурис”, объектом исследований с расширенным диапазоном режимов работы стал клапанный синхронизатор КС-1. На рис. 2 представлено схематичное изображение конструкции клапана в начальный момент (до его открытия под действием давления рабочей жидкости) и после открытия.

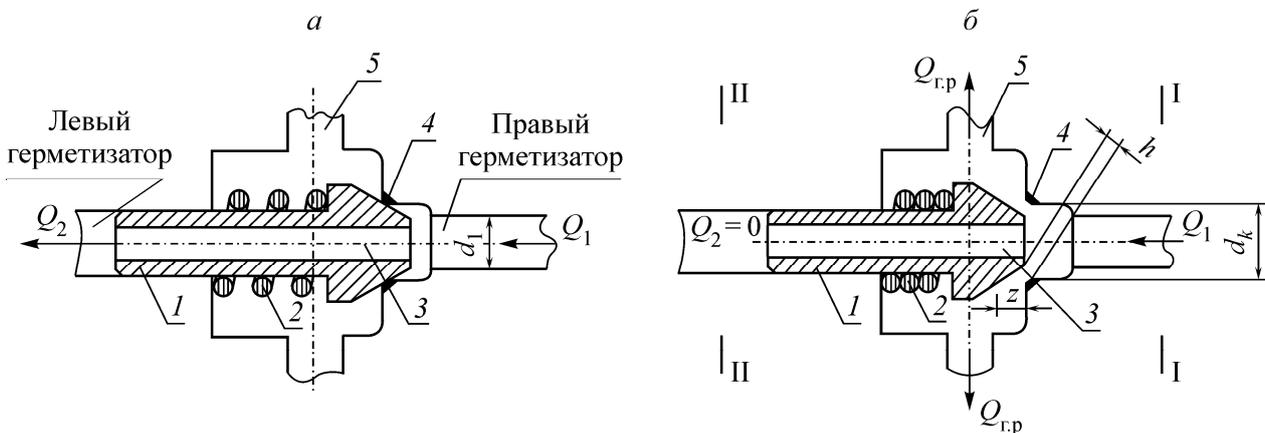


Рис. 2. Принципиальная схема клапана-синхронизатора КС-1: 1 — запирающий элемент; 2 — пружина; 3 — центральное отверстие; 4 — седло; 5 — каналы подачи рабочей жидкости в зону гидроразрыва

В начальный период включения насоса клапан закрыт (рис. 2а) и запирающий элемент 1 прижат к седлу 4 пружиной 2. Поток рабочей жидкости Q_1 от насоса заполняет правый пакер (условно пакеры на схеме не показаны), проходит через центральное отверстие 3 и заполняет левый тупиковый пакер. Так как жидкость несжимаема, то синхронно возрастает давление в

обоих пакерах и они, расширяясь, прижимаются к стенкам скважины. Когда давление начинает превышать 3 МПа (на это настроена пружина 2), клапан открывается, т. е. запирающий элемент 1 отходит от седла 4 (рис. 2б), образуя кольцевую щель шириной h :

$$h = z \sin \alpha ,$$

где z — максимальный ход запирающего элемента; α — угол конуса запирающего элемента.

Тогда площадь щели

$$S = \pi d_k z \sin \alpha ,$$

где d_k — диаметр канала, по которому к запирающему элементу 1 подходит поток рабочей жидкости Q_1 , при этом $Q_1 = Q_2$.

После открытия клапана (рис. 2б) происходит движение жидкости, поступающей от насоса, через правый герметизатор и кольцевую щель h клапана, далее сквозь отверстия 5 в зону гидроразрыва. С этого момента $Q_2 = 0$. Из записи, сделанной во время шахтного эксперимента (см. рис. 1), видно, что после открытия клапана наблюдается резкий скачок давления и его падение (участок записи $a-b-e$), что соответствует процессу, происходящему в момент гидроразрыва. В образовавшуюся в горной породе трещину устремляется поток рабочей жидкости с расходом

$$Q_{г.р} = Q_1 k_a ,$$

где $Q_{г.р}$ — расход жидкости в созданную в результате гидроразрыва трещину; Q_1 — расход жидкости, поступающей от шахтного насоса, равный 40 л/мин; k_a — коэффициент, учитывающий потери расхода жидкости на всех участках линий от насоса до клапанного синхронизатора КС-1. Практическое значение k_a установлено в ходе шахтного эксперимента, он зависит от длины магистральных линий, их усредненного проходного сечения и особенностей местных сопротивлений. В конструкции клапана для экспериментального оборудования $k_a = 0.9$ и соответственно $Q_{г.р} = 36$ л/мин. Таким образом, после гидроразрыва через клапан синхронизатора должен проходить поток рабочей жидкости с расходом 36 л/мин.

Рассмотрим два сечения I–I и II–II, которые проходят по правому и левому (тупиковому) герметизаторам при открытом клапане (рис. 2б). Режим течения рабочей жидкости в начальный момент запишем как уравнение Бернулли в общем виде (без учета коэффициента α Кориолиса) для этих сечений:

$$gz_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{g_1^2}{2} = gz_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{g_2^2}{2} , \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения; z_i — расстояние между центром тяжести i -го сечения и горизонтальной плоскостью; ρ — плотность жидкости; P_i — давление в i -м сечении; g_i — скорость потока в i -м сечении.

С учетом близости расположения центров тяжести рассматриваемых сечений ($z_1 = z_2$) формула (1) примет вид

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{g_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{g_2^2}{2} . \quad (2)$$

Умножив обе части уравнения (2) на ρ , получим

$$P_1 + \frac{\rho g_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho g_2^2}{2} . \quad (3)$$

Однако после открытия запирающего элемента I скорость потока в левом пакере $\mathcal{G}_2 = 0$, следовательно уравнение (3) запишется так:

$$P_2 = P_1 + \frac{\rho \mathcal{G}_1^2}{2} = \text{const}. \quad (4)$$

Таким образом, $P_2 \geq P_1$ на величину $\rho \mathcal{G}_1^2 / 2$ и чем выше скорость движения рабочей жидкости в правом (подводящем) пакере, тем меньше P_1 . При понижении P_1 до предельно низкого значения, когда P_2 начинает превышать P_1 на критическую величину, клапан закрывается. После этого цикл открытия и закрытия повторяется, что объясняет возникающий эффект пульсации в гидросистеме во время проведения шахтных экспериментов.

Лабораторные исследования уравновешенного герметизатора с клапанным синхронизатором КС-1 проводились на стенде (рис. 3) с насосом, имеющим максимальную производительность $Q = 10$ л/мин, причем шумовой эффект и вибрация во всех диапазонах регулируемого расхода дросселями 7 и 12 от нуля до максимального значения отсутствовали. Для воспроизведения в лабораторных условиях характеристик шахтного насоса ($Q = 40$ л/мин) применен мультипликатор 1, который устанавливался между насосом 13 и линией трубопровода 2, подводящего рабочую жидкость к герметизатору 3.

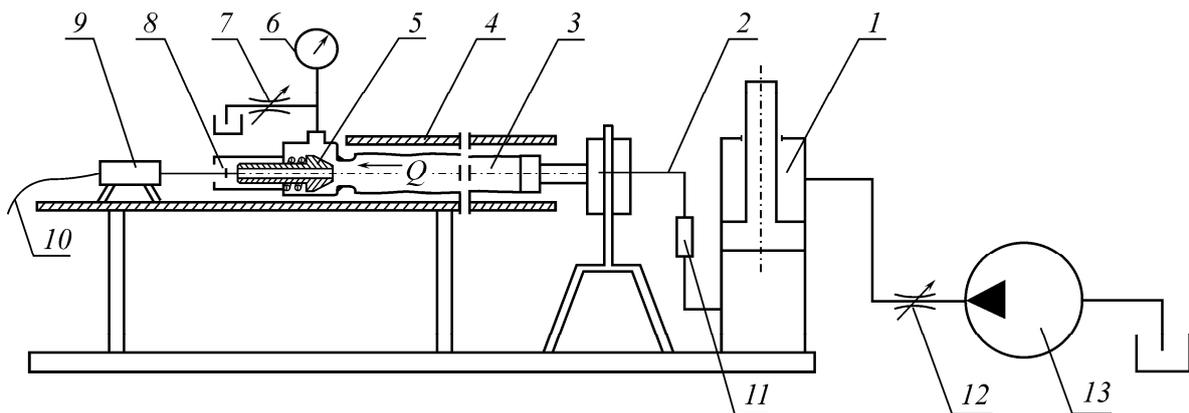


Рис. 3. Лабораторный стенд для испытания клапанного синхронизатора: 1 — мультипликатор; 2 — трубопровод; 3 — герметизатор; 4 — труба-имитатор; 5 — запирающий элемент; 6 — манометр; 7, 12 — дроссели; 8 — корпус клапана КС-1; 9 — индукционный датчик давления и расхода; 10 — кабель; 11 — регистрирующая аппаратура; 13 — насос

Объем поршневой полости мультипликатора 1 и его штоковой полости имеет соотношение $1/4$, что позволяет при подаче жидкости в штоковую полость с расходом $Q = 10$ л/мин на выходе из поршневой полости получать расход $Q = 40$ л/мин.

Правый пакер 3 герметизатора размещался в трубе-имитаторе 4 и соединялся с клапаном КС-1 (поз. 8 на рис. 3). С противоположной стороны к запирающему элементу 5 подсоединялся стержень-удлинитель индукционного датчика 9 (Метран-150ГА [измеряемая среда: газ, жидкость, пар; температура среды: $-40 \dots 80^\circ\text{C}$]). Измерительная головка датчика (через стержень-удлинитель) постоянно контактирует с запирающим элементом 5 клапана 8. Электрический сигнал от датчика 9 поступает по кабелю 10 на регистрирующую аппаратуру (на рисунке не показана). Расход рабочей жидкости регулировался на входе дросселем 12, на выходе — 7. Насос 13 включался при полностью закрытом дросселе 12 и открытом дросселе 7.

Одна из характерных записей работы клапанного синхронизатора во время плавного открытия дросселя $I2$ приведена на рис. 4.

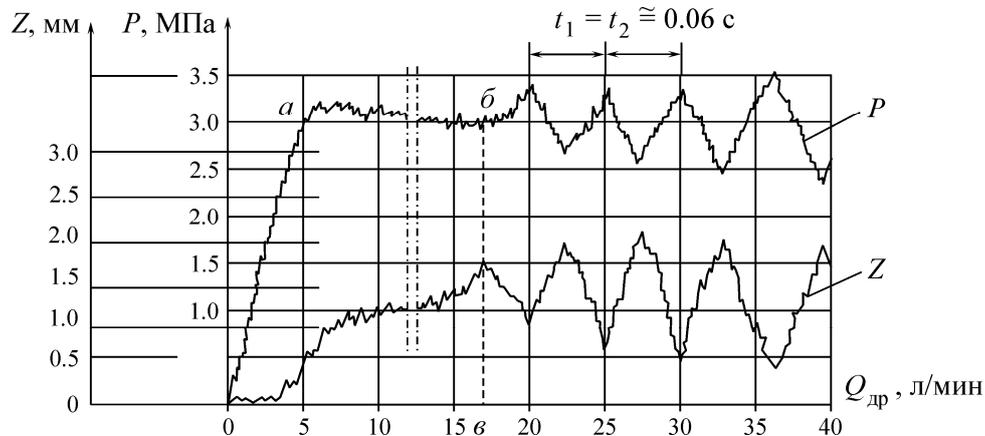


Рис. 4. Запись изменения давления рабочей жидкости P в предклапанной полости КС-1 и перемещения запирающего элемента Z при расходе от 0 до 40 л/мин

Как видно из записи (участок $a-b$), клапан открыт и работает в стабильном режиме, а начиная от точки b и далее режим его работы резко меняется. Появляется увеличивающаяся с ростом расхода рабочей жидкости пульсация давления, возникает шумовой эффект.

Характерный режим работы клапана-синхронизатора КС-1 при $Q > 18$ л/мин полностью совпадает с результатами шахтных экспериментальных исследований и подтверждает теоретическое обоснование причин возникновения вибропроцесса.

Исходя из проделанных теоретических исследований, исключить вибрацию запирающего элемента возможно двумя способами: первый — не превышать подаваемый расход рабочей жидкости $Q_{\max} = 18$ л/мин; второй — уравнивать скоростные напоры в сечениях I-I и II-II (см. рис. 2б).

Первый вариант ограничивает практическую пропитку породного прослойка во времени ввиду ограниченности расходной характеристики герметизатора. Поэтому искалось решение по второму варианту.

Решение нашлось в изменении монтажной схемы установки клапана синхронизатора, а именно путем установки клапана с ориентацией запирающего узла в сторону тупикового герметизатора (рис. 5). Представленная схема расположения запирающего элемента в клапане-синхронизаторе КС-1 позволяет уравнивать скоростные напоры в сечениях I-I и II-II (см. рис. 2б), а следовательно, устранить процесс вибрации.

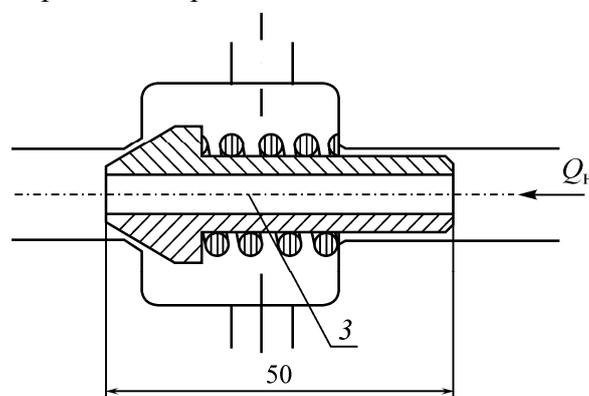


Рис. 5. Измененная схема установки клапана КС-1

Проведем расчет основных параметров клапана-синхронизатора КС-1 с целью определения его работоспособности. Для этого рассмотрим конструкцию КС-1 как условно-эквивалентное неподвижное местное сопротивление с геометрическими размерами $d = 4$ мм и $L = 50$ мм (рис. 6). На основе теории истечения жидкости через цилиндрическое отверстие в жидкую среду определим потери давления на участке L .

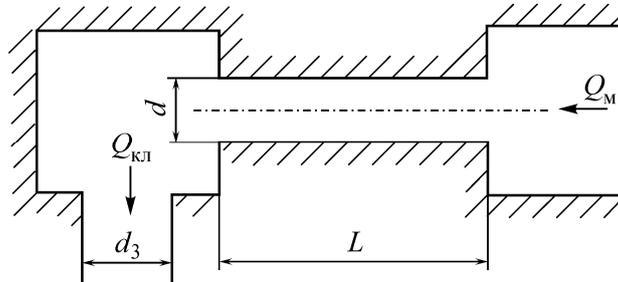


Рис. 6. Эквивалентная схема клапанного синхронизатора: d — диаметр проходного отверстия в запирающем устройстве; L — длина запирающего устройства; Q_M — расход рабочей жидкости от мультипликатора (40 л/мин); $Q_{квл}$ — расход жидкости на выходе из клапана; d_3 — усредненный диаметр межпакерных отверстий ($d_3 > d$)

Скорость движения жидкости V через отверстие в КС-1 диаметром 4 мм находится по формуле [5, 6]

$$V = \frac{Q_H}{S_{отв}}, \quad (5)$$

где $S_{отв}$ — площадь сечения отверстия; Q_H — производительность насоса.

Подставив в (5) численные значения, получим $V = 53$ м/с. Рекомендуемая скорость течения жидкости для местных сопротивлений [5, 6] $V' = 40$ м/с, что несколько ниже расчетной. С учетом рекомендуемой скорости движения рабочей жидкости вычислим расчетный диаметр сечения проходного отверстия d_p (мм):

$$\frac{d_p}{2} = r_p = \sqrt{\frac{Q_H}{\pi g'}} = 2.4.$$

Предварительно принимаем $d_p = 5$ мм, тогда скорость течения рабочей жидкости $V_1 = 34$ м/с. Определим потери давления на рассматриваемом участке [7]:

$$\Delta P_M = \xi \frac{\rho g^2}{2},$$

здесь ξ — коэффициент местного сопротивления; ρ — плотность жидкости.

С другой стороны,

$$\xi = \lambda \frac{L}{d}, \quad \lambda = \frac{0.316}{\sqrt[4]{Re}}, \quad Re = \frac{Qd}{Sv},$$

где λ — коэффициент сопротивления, зависящий от режима течения рабочей жидкости; L — длина участка местного сопротивления; v — коэффициент кинематической вязкости рабочей жидкости (0.02 см²/с).

Вычислим значения этих коэффициентов, а затем, подставив их в выражение (5), найдем потери давления на рассматриваемом участке:

$$Re = 84\,390, \quad \lambda = 0.02, \quad \xi = 0.2, \quad \Delta P_M = 0.59 \text{ МПа}.$$

Полученные значения потери давления на преодоление местного сопротивления вполне допустимы с точки зрения эффективной работы клапанного синхронизатора КС-1.

Для уточнения теоретических расчетов проведены лабораторные исследования синхронизатора КС-1 с запирающими элементами, имеющими проходные отверстия различного диаметра (4, 4.5 и 4.8 мм), так как теоретические расчеты не могут объективно отразить потери давления на выходе из клапана-синхронизатора вследствие невозможности учета всех конструктивных особенностей клапана, оказывающих влияние на сопротивление движению жидкости (наибольший диаметр отверстия ограничен конструктивными размерами клапанного синхронизатора).

Рассматриваемые синхронизаторы поочередно устанавливались на испытательном стенде (см. рис. 3), а имитация гидроразрыва осуществлялась дросселем (поз. 7 на рис. 3). Рабочая жидкость к испытываемой конструкции подводилась от насоса через мультипликатор (поз. 1 на рис. 3) с максимальным расходом 40 л/мин. Предохранительный клапан насоса был настроен на постоянное давление $P_n = 45$ МПа.

Изменения потери давления ΔP от расхода рабочей жидкости на выходе из клапана-синхронизатора КС-1 представлены на рис. 7. Графики получены с учетом коэффициента открытия дросселя:

$$K_{др} = \frac{S_{др.т}}{S_{др.макс}},$$

где $S_{др.т}$, $S_{др.макс}$ — текущее и максимальное проходное сечение дросселя соответственно. Причем диаметр полностью открытого дроссельного отверстия 10 мм, что значительно больше максимального диаметра отверстия в запирающем элементе клапанного синхронизатора.

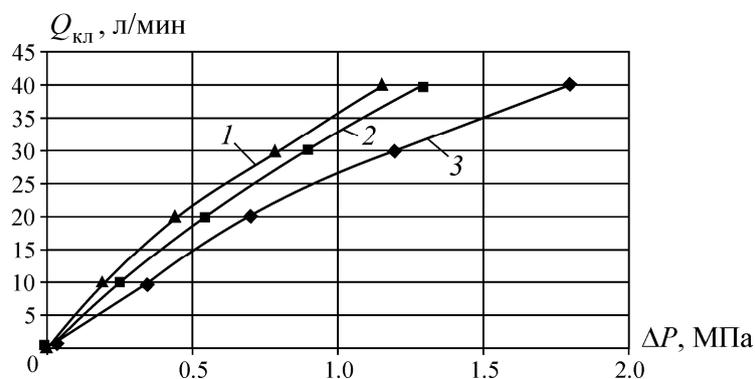


Рис. 7. Зависимость перепада давления на входе и выходе из клапана от расхода жидкости для диаметров проходных отверстий клапана, мм: 1 — 4.8; 2 — 4.5; 3 — 4.0

Расход рабочей жидкости через клапанный синхронизатор:

$$Q_{кл} = k_{др} Q_m,$$

где Q_m — расход рабочей жидкости от мультипликатора.

По результатам выполненных исследований уточнена формула для расчета потерь давления на преодоление совокупного сопротивления, создаваемого данной конструкцией клапанного синхронизатора:

$$\Delta P_y = \Delta P \cdot B,$$

где $B = \frac{Re_m}{40 Re_n}$;

$$\Delta P_y = \frac{Re_m}{Re_n} \lambda \frac{L \rho g^2}{40dg},$$

здесь Re_m — расчетное значение числа Рейнольдса при действительном расходе Q_n ; Re_n — расчетное максимальное значение числа Рейнольдса при ламинарном течении рабочей жидкости через центральное отверстие в клапанном синхронизаторе.

Согласно результатам экспериментов, центральное отверстие в запирающем элементе клапана-синхронизатора КС-1 диаметром 4.5 мм является рациональным для разработанной конструкции, а сам клапан вполне отвечает требованиям для его практического применения.

ВЫВОДЫ

Гидропульсацию в уравновешенном герметизаторе можно исключить двумя способами: первый — не превышать подаваемый расход рабочей жидкости $Q_{max} = 18$ л/мин; второй — уравнивать скоростные напоры во входном и выходном сечениях путем разворота запирающего элемента клапана в сторону тупикового уплотнительного элемента.

Для рассматриваемой конструкции уравновешенного герметизатора следует использовать клапанный синхронизатор КС-1 с центральным отверстием диаметром 4.5 мм, позволяющим работать на расходах до 40 л/мин.

Расчет проходного отверстия клапана КС-1 необходимо проводить с учетом изменения числа Рейнольдса при различных режимах течения рабочей жидкости и ее расходе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Леконцев Ю. М., Сажин П. В., Ушаков С. Ю. Применение метода поинтервального гидроразрыва для разупрочнения породного прослойка в угольном массиве // ФТПРПИ. — 2012. — № 3.
2. Леконцев Ю. М., Сажин П. В., Ушаков С. Ю. Разупрочнение породного прослойка в угольном пласте в условиях шахты “Романовская” с применением метода поинтервального гидроразрыва (ПГР) // Уголь. — 2012. — № 1.
3. Леконцев Ю. М., Сажин П. В., Антонюк А. И. Практическое применение метода поинтервального гидроразрыва (ПГР) для разупрочнения породного прослойка в угольном пласте в условиях шахты “Романовская” // Материалы XIII Междунар. конф. “Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири”. — Кемерово, 2010.
4. Леконцев Ю. М., Сажин П. В., Темиряева О. А., Хорешок А. А., Ушаков С. Ю. Исследование режимов работы уравновешенного герметизатора // ФТПРПИ. — 2013. — № 5.
5. Кондаков Л. А., Никитин Г. А., Прокофьев В. Н., Скрицкий В. Я., Сосонкин В. Л. Машиностроительный гидропривод. — М.: Машиностроение, 1978.
6. Башта Т. М., Руднев С. С., Некрасов Б. Б., Байбаков О. В., Кирилловский Ю. Л. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы. — М.: Машиностроение, 1982.
7. Синов Б. Н. Истечение жидкости через насадки в среды с противодействием. — М.: Машиностроение, 1968.

Поступила в редакцию 21/X 2013