

**МЕТОД ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПРОФИЛЯ
ПРОВОДНИКОВ НА СИСТЕМЫ «СОСУД - АРМИРОВКА» ШАХТНЫХ
СТВОЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ**

Досліджено процес взаємодії підйомної посудини з просторово викривленими провідниками жорсткого армування шахтного стовбуру. Обґрунтовано метод енергетичної оцінки впливу параметрів профілів локальних ділянок провідників на контактні навантаження в системі при проведенні динамічної діагностики армування.

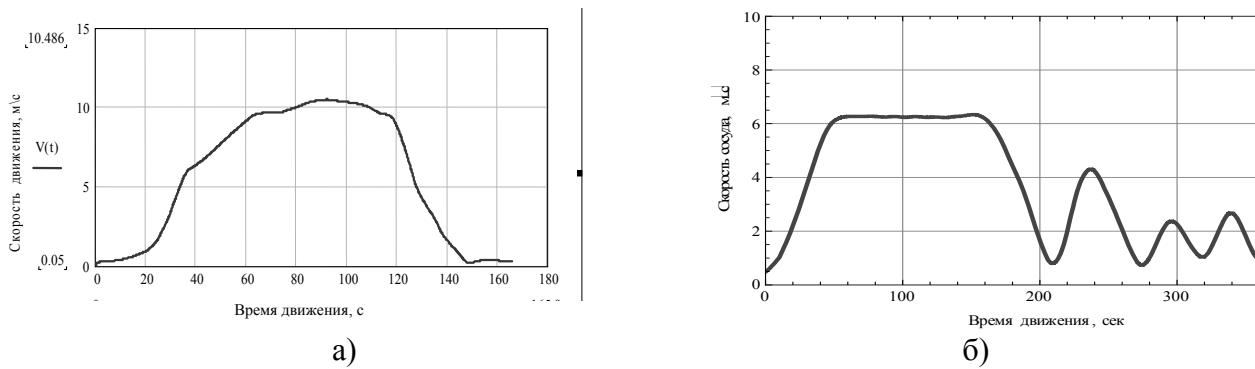
**METHOD OF EVALUATION OF THE ENERGY PROFILE OF
CONDUCTORS IN THE "VESSEL - REINFORCEMENT" MINE SHAFTS
FOR DYNAMIC DIAGNOSIS**

The process of interaction between the lift shaft of the vessel with a spatially curved conductors rigid reinforcement of the trunk. Justified method of energy assessment of the impact parameter profiles of local areas of the conductors to the contact load on the system during dynamic diagnostics reinforcement.

Подъемный сосуд представляет собой твердое тело, которое движется вдоль ствола по пространственной кривой, образованной системой проводников, с которыми оно взаимодействует через систему упругих роликовых направляющих и предохранительных башмаков скольжения. Проводники дискретно по своей длине закреплены на горизонтальных расстрелах, концы которых заделаны в крепи ствола. Изменения угла наклона проводника к вертикали происходят только в точках крепления к расстрелам на каждом ярусе армировки. В пролетах между ярусами проводники сохраняют прямолинейную форму с постоянными геометрическими параметрами.

На практике проводники всегда имеют на ярусах некоторые смещения от проектной вертикали, которые являются известными, так как фиксируются маркшейдерской аппаратурой СИ при плановых обследованиях. В такой конструкции наименьшее значение периода изломов профиля проводника по глубинной координате равно двойному шагу армировки.

При скольжении направляющей по искривленному проводнику последний вынуждает сосуд повторять траекторию проводника. В вертикальном направлении сосуд движется с переменной во времени скоростью в соответствии с заданной диаграммой. В зависимости от условий в стволе диаграммы могут быть близкими к трапециевидному типу или содержать большое количество участков разгона и замедления при проходе рабочих горизонтов рис. 1.



а)- скипа ствола ГС-1 ЗЖРК б) противовеса клетки шахты им. Ленина КЖРК
 Рис. 1. Диаграмма скорости подъема.

Скорость вертикального движения определяет время прохождения сосудом двойного интервала между ярусами, то есть определяет период возмущений в секундах в зависимости от положения сосуда в стволе. Шаг армировки может быть постоянным или переменным по глубине ствола. Его зависимость от времени движения сосуда в цикле определяется мгновенной скоростью подъема и текущим значением шага по глубинной координате. Если его перевести в зависимость от времени с учетом диаграммы скорости, то мы получим мгновенную максимально возможную частоту возмущений в каждый момент времени подъема. Эта частота определяется по формуле

$$\Omega_{jar}(t) = \frac{Vc(t)}{2 \cdot Hjar(t)} \quad (1)$$

где $Vc(t)$ - вертикальная скорость сосуда, $Hjar(t)$ - функция зависимости текущего номера яруса, мимо которого проходит сосуд в момент t , от времени.

Выбрав в качестве примера породный скиповой подъем ствола ГС-1 ЗАО ЗЖРК (диаграмма скорости на рис. 1а), получим следующие графики:

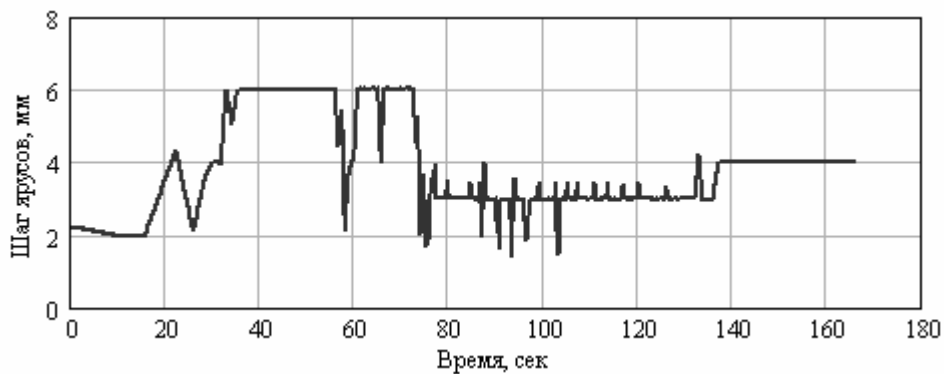


Рис. 2. График функции зависимости шага ярусов от времени в цикле подъема скипа.

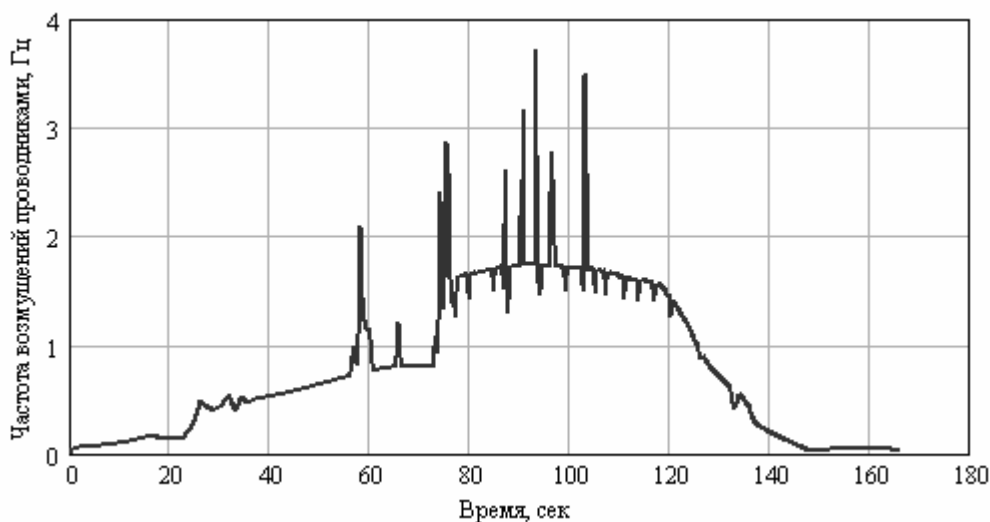


Рис. 3. График зависимости максимально возможной частоты возмущений сосуда профилем проводников от времени в цикле подъема.

Представленные графики показывают, что частота возмущений от проводников в условиях реального ствола не является постоянной или монотонной функцией по времени движения сосуда. Эта функция имеет множество локальных выбросов и ступеней в течение одного цикла, так как шаг ярусов не является постоянной величиной по глубине ствола. Значения шага меняются ступенчато по известному на момент динамических испытаний закону, определенному путем маркшейдерской съемки.

В данном стволе шаг изменяется от 3-х до 6-ти метров. Для него характерно наличие 2-х протяженных участков в верхней и нижней частях с номинальными шагами ярусов, близкими, соответственно, к 3-м и 6-ти м, и короткого участка внутри зоны компенсаторов с различными значениями от 3-х до 6-ти м. Эти разбросы, как правило, вызваны укорочением шага ярусов, которое происходит из-за установки промежуточных расстрелов и вспомогательных конструкций (компенсаторов вертикального смещения), на коротких участках.

Вид этой функции близок по форме к диаграмме окружной скорости барабана с выбросами в обе стороны. При этом наибольшие по модулю амплитуды выбросов происходят в сторону увеличения частоты возмущений. Практически это означает, что на сосуд действует неупорядоченная последовательность *кратковременных* импульсов возмущений с амплитудой, равной мгновенной амплитуде отклонения оси колеи от вертикали (вызывает *рост* частоты) и серия *удлиненных* импульсов такой же амплитуды (вызывает *уменьшение* частоты).

При анализе всех подъемов ствола следует принимать во внимание, что каждый ярус распространяется по сечению на все его отделения, поэтому функция раскладки шагов армировки по номерам ярусов в стволе для всех сосудов будет одинаковой, но так как разные сосуды будут двигаться с различными диаграммами скорости, то функции зависимости частоты возмущений от времени в цикле у них будут отличаться.

Для двухконцевых установок с противовесом часто диаграмма скорости на подъеме грузеного основного сосуда отличается от диаграммы спуска порожнего, поэтому его функция зависимости частоты возмущений от времени может сильно отличаться от такой же функции для противовеса.

Это говорит о том, что сосуды одной подъемной установки могут испытывать возмущения со стороны жесткой армировки с разными частотными характеристиками.

В динамике пространственное движение сосуда с пятью горизонтальными степенями можно представить как суперпозицию поступательного вертикального движения, 2-х плоско-параллельных движений во взаимно перпендикулярных плоскостях (лобовой и боковой плоскостей проводников) и вращательного движения в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси сосуда, рис.1. В боковой плоскости картина будет аналогичной.

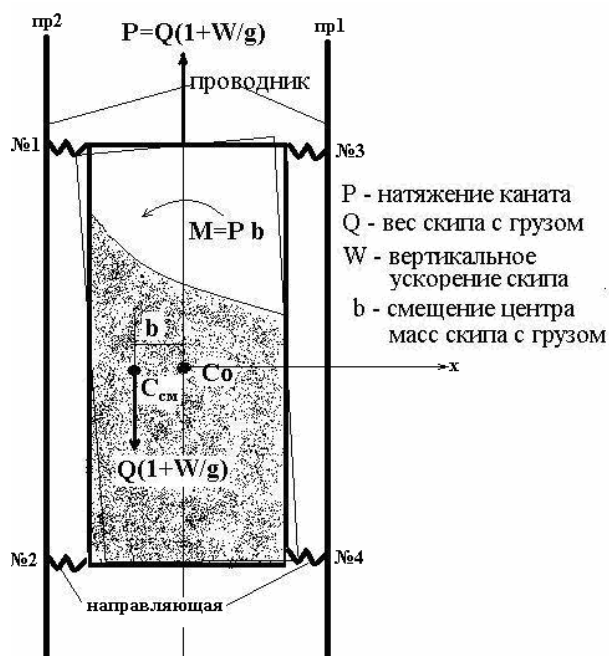


Рис. 4. Схема взаимодействия скипа с армировкой в лобовой плоскости проводников.

За счет наклона проводников к вертикали в точках крепления направляющих (как правило, их по 4 на одном сосуде, кроме составных конструкций, у которых их может быть 6 или 8) сосуд подвергается горизонтальным возмущениям кинематического типа. В силу малости углов наклона проводников скорость горизонтального возмущающего перемещения, передающегося на направляющий узел сосуда, прямо пропорциональна углу наклона проводника и скорости вертикального движения.

$$V_{np}(t) = \alpha(t) \cdot V_c(t) = \frac{dUnp(s(t))}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = \frac{dUnp(t)}{dt}, \quad (2)$$

где $V_{np}(t)$ - скорость горизонтального смещения рабочей поверхности проводника относительно проектной вертикали; $\alpha(t)$ - угол наклона проводника к вертикали напротив направляющей сосуда; $U_{np}(t)$ - функция, описывающая зависимость горизонтальной координаты рабочей поверхности профиля проводника от времени движения сосуда в цикле; s – текущая координата сосуда по глубине ствола.

Если проводник является строго прямолинейным, то в результате параметрического резонанса, вызванного периодическим характером функции жесткости проводников из-за дискретности их закрепления на опорных расстрелах армировки, возможна накачка энергии вертикального движения в горизонтальные степени свободы. Эта задача в полной мере решена в работах ученых института им. М.М.Федорова под руководством профессоров Н.Г. Гаркуши и В.И. Дворникова. Их рекомендации внедрены в практику проектирования и строительства шахтных стволов нормативным документом [1]. В эксплуатирующихся в настоящее время системах «сосуд-армировка» данное явление отсутствует.

В работе [2] показано, что в искривленных проводниках даже вне зон параметрического резонанса в зависимости от фазы соударения башмака и проводника скорость отражения башмака может быть больше скорости соударения, если абсолютная скорость горизонтального перемещения рабочей поверхности проводника напротив башмака поднимающегося сосуда в момент контакта направлена к положению равновесия (проектной вертикали) башмака (башмак набегает на переднюю фронтальную поверхность выпуклости профиля проводника) и может быть меньше либо равна скорости соударения в противном случае (башмак сбегает с тыльной стороны выпуклости, проводник уходит с некоторой скоростью от приближающегося к нему башмака или проводник неподвижен относительно оси отделения напротив сосуда в силу своей прямолинейности).

В первом случае за счет роста скорости происходит дополнительная подкачка энергии в горизонтальные степени свободы сосуда. Параметром, позволяющим оценить энергетическое влияние профилей проводников на динамику сосуда по участкам ствола, может служить его полная кинетическая энергия, которая по теореме Кенига рассчитывается как сумма кинетических энергий поступательного движения сосуда с центром масс и вращательного движения вокруг центра масс.

Если качественно свести модель задачи одиночного столкновения башмака, движущегося с мгновенной скоростью $V\bar{o}^-$, с набегаящим/уходящим на/от него со скоростью V_{np} проводником, к задаче удара твердого тела о подвижную преграду, то из решений, представленных в работе [3], следует, что после отражения от проводника башмак будет иметь скорость, равную

$$V\bar{o}^+ = -k \cdot V\bar{o}^- \pm (1+k) \cdot V_{np}, \quad (3)$$

где k - коэффициент восстановления при ударе (при соударении двух стальных тел его максимальное значение равно $5/9=0,555$), верхний знак относится к случаю набегания проводника на башмак $V_{np} < 0$, нижний - к случаю ухода башмака от проводника $V_{np} > 0$.

Из этого следует, что при *абсолютно упругом* ударе ($k=1$) на участке армировки с противофазным набеганием проводника на башмак после отражения к его собственной скорости (по модулю) добавляется удвоенная скорость набегания проводника, в противном случае скорость набегания башмака уменьшается после удара на величину удвоенной скорости ухода проводника.

$$V\bar{b}^+ = -V\bar{b}^- \pm 2 \cdot V_{np}. \quad (4)$$

Если скорости башмака и проводника равны по модулю и противоположны по направлению, то

$$V\bar{b}^+ = -3V\bar{b}^-. \quad (5)$$

Это значит, что при одном встречном ударе с равными скоростями башмак отражается от проводника с утроенной скоростью набегания. При этом соответственно увеличивается его кинетическая энергия и контактные нагрузки в системе.

Такая модель в достаточной степени эквивалента реальной системе, так как жесткость проводника, опирающегося на дискретно закрепленные по глубине ствола расстрелы, приблизительно в 100 раз больше жесткости роликовых направляющих скипа и процесс их взаимодействия можно считать ударным с применением гипотезы Ньютона.

Если в этой модели положить жесткость ролика равной или большей жесткости проводника (такая ситуация встречается на практике при затирании сосуда в искривленных проводниках с зауженной колеей), то в этой системе не будет явления удара, а будет следящее перемещение сосуда по паре проводников, в котором $V\bar{b}^+ = V\bar{b}^- = V_{np}$. Из этого следует, что наличие кинематических зазоров в парах «башмак-проводник» способствует большему накоплению энергии проводников в горизонтальное движение сосуда, чем в «следающей» системе. Однако «следающая» система является неработоспособной по другим критериям.

Рассматривая одиночный i -й удар одного j -го башмака (рабочей грани) по рабочей грани проводника будем считать, что за время удара значение приведенной к этому башмаку массы сосуда M_{np_i} не меняется. Понятно, что эта гипотеза является приближенной для расчетов длительных пространственных ударно-колебательных процессов объемного твердого тела (в этом случае применяется общая модель динамики системы «сосуд-армировка» [4]), но она позволяет наглядно провести качественный анализ явления и получить некоторые локальные предельные оценки.

Из приведенных формул следует, что если до i -го удара кинетическая энергия сосуда была

$$E_i^- = \frac{Mnp_i \cdot (V\bar{\sigma}_i^-)^2}{2}, \quad (6)$$

то после удара она станет равной

$$\begin{aligned} E_i^+ &= \frac{Mnp_i \cdot (V\bar{\sigma}^+)^2}{2} = \frac{Mnp_i \cdot (-k \cdot V\bar{\sigma}^- \pm (1+k) \cdot Vnp)^2}{2} = \\ &= \frac{Mnp_i \cdot (k \cdot V\bar{\sigma}_i^-)^2}{2} \mp \frac{2 \cdot Mnp_i \cdot k \cdot (1+k) \cdot V\bar{\sigma}_i^- \cdot Vnp}{2} + \\ &+ \frac{Mnp_i \cdot (1+k)^2 \cdot Vnp^2}{2} = E_i^- + E_i^{\text{дон}} \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} E_i^{\text{дон}} &= \frac{(1+k)^2 \cdot Mnp_i \cdot Vnp^2}{2} \mp \frac{2 \cdot (1+k) \cdot k \cdot Mnp_i \cdot V\bar{\sigma}_i^- \cdot Vnp}{2} = \\ &= E_i^{\text{дон, np}} \pm E_i^{\text{дон, np-башм}} \end{aligned} \quad (8)$$

где $E_i^{\text{дон, np}} = 0.5 \cdot (1+k)^2 \cdot Mnp_i \cdot Vnp^2$ - часть дополнительной кинетической энергии, передаваемая башмаку только за счет параметров профиля проводников при заданной мгновенной скорости подъема во время i -го удара; $E_i^{\text{дон, np-башм}} = (1+k) \cdot k \cdot Mnp_i \cdot V\bar{\sigma}_i^- \cdot Vnp$ - часть дополнительной энергии, передаваемой башмаку во время удара, которая определяется произведением скоростей башмака и проводника, ее вклад в общую энергию сосуда тем больше, чем больше скорость башмака перед ударом.

При $k=0.555$ получим значения дополнительной кинетической энергии, передаваемой сосуда от проводников

$$E_i^{\text{дон, np}} = 1,2 \cdot Mnp_i \cdot Vnp^2; \quad (9)$$

$$E_i^{\text{дон, np-башм}} = 0,86 \cdot Mnp_i \cdot V\bar{\sigma}_i^- \cdot Vnp. \quad (10)$$

При $k=1$ получим

$$E^{\text{доп,пр}}_i = 2 \cdot Mnp_i \cdot Vnp^2 \quad (11)$$

$$E^{\text{доп,пр-башм}}_i = 2 \cdot Mnp_i \cdot V\bar{b}_i^- \cdot Vnp \quad (12)$$

Таким образом, размер приращение дополнительной энергии, которую получает сосуд при ударе башмака по искривленному проводнику определяется не только параметрами скорости проводников и мгновенной вертикальной скоростью подъема, но и динамическим состоянием сосуда (системы «башмак-проводник»), которое непосредственно предшествовало наступлению i -го удара (величиной скорости отражения башмака от проводника на предыдущем цикле удара).

Формула (4), в частности, показывает, что если проводник вертикальный и горизонтальная скорость его рабочей грани в момент удара равна нулю, то изменения энергии сосуда не происходит.

Из формулы (5) вытекает тот факт, что если башмак совершает серию абсолютно упругих соударений с проводником на встречных движениях с равными скоростями, то при первом соударении его скорость возрастает в 3 раза (к собственной скорости добавляется удвоенная скорость проводника), а кинетическая энергия в 9 раз, после второго соударения в тех же условиях скорость возрастает в 5 раз по сравнению с первоначальной, до первого удара, а энергия в 25 раз, после третьего удара скорость возрастает в 7 раз по сравнению с первоначальной, до первого удара, а энергия в 49 раз. То есть начинается лавинообразное нарастание энергии колебаний и нагрузок в системе. Фактически сосуд оказывается в ситуации ультрагармонического резонанса от внешнего воздействия со стороны профилей проводников.

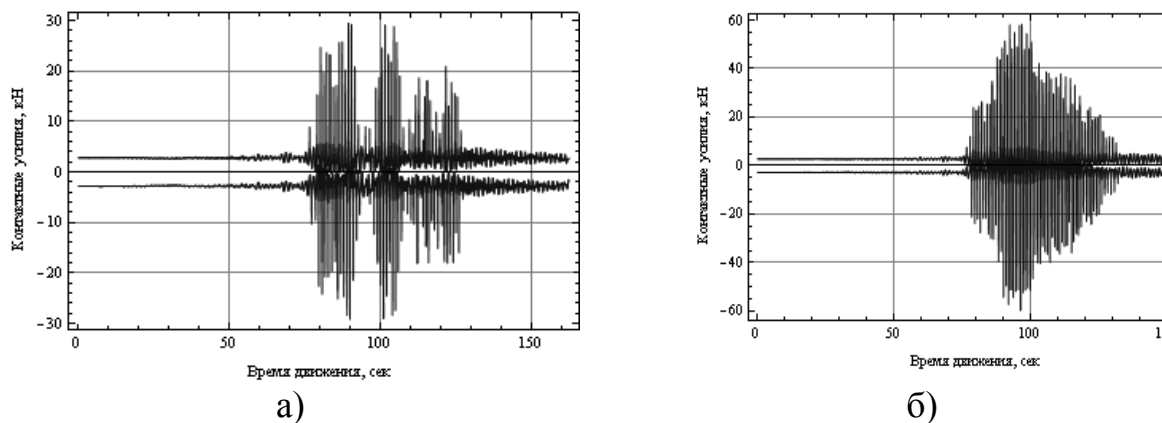
В момент удара дополнительная энергия, которая передается сосуду, состоит из 2-х слагаемых: $E^{\text{доп,пр}}$ и $E^{\text{доп,пр-башм}}$. Первое зависит только от профиля проводника, а второе зависит от профиля и скорости подхода башмака к проводнику. В свою очередь скорость подхода башмака к проводнику определяется поведением сосуда в зазоре между проводниками. То есть определяется предысторией его поведения на интервале времени, предшествующем удару. Если зазора нет, то скорость соударения равна нулю. А при наличии удара, приращение скорости на удвоенную величину скорости набегания проводника происходит не зависимо от размера зазора. Единственным фактором является наличие разности скоростей башмака и проводника.

Следует отметить, что частота и горизонтальная скорость возмущений от проводников не зависят от направления движения сосуда и являются характеристикой только их геометрии при заданной диаграмме скорости работы подъемной машины. Но полная энергия $E^{\text{доп,пр}}$ определяется его массой (при неизменной высоте сосуда), поэтому, снижая ее можно так же снизить уровень негативного энергетического воздействия искривлений проводников на подъемный сосуд.

Отсюда следует, что изменение кинетической энергии сосуда при серии соударений башмаков с проводниками происходит по квадратичному закону от горизонтальной скорости проводников относительно вертикальной оси каната в моменты контакта с башмаками.

Конечно, такая оценка действительна только при коэффициенте восстановления равном единице, в реальной системе этот процесс гораздо медленнее, но, тем не менее, он существует, и его можно наблюдать на практике и при моделировании, например, на графике работы [2], приведенном на рис. 5 при подъемах скипа с различным распределением массы груза в кузове.

При движении в зазоре на башмак действуют стабилизирующие силы упругости ролика и диссипации энергии в поглощающем блоке амортизатора. Они, главным образом, определяют результат снижения скорости соударения от максимально возможно значения. При большом зазоре и малой подкачке энергии башмак вообще может не приближаться к проводнику, и сосуд будет подниматься по стволу в безударном режиме (интервал во времени подъема от 0 сек до 70 сек).



а) смещение груза на +160 мм (к проводнику №2); б) смещение груза на -160 мм (к проводнику №1) при диаграмме скорости цикла №1.

Рис. 5. Графики контактных усилий в системе «сосуд-армировка».

В обоих циклах на 77-й секунде сосуд попадает на участок с наибольшими частотами искривлений проводников (а значит и максимальными горизонтальными скоростями относительного смещения проводников, рис. 3), в результате чего в системе развивается интенсивный ударный процесс с повышенными контактными нагрузками.

Такие явления характерны для участков ствола, на которых шаг армировки является заниженным, скорость подъема максимальна, а отклонения на смежных ярусах близкие или превышают предельно допустимые 10 мм (рис. 3, интервал движения 60-105 сек). На этих участках горизонтальные скорости проводников и башмаков могут быть близкими по уровню.

В таких случаях величина E^{don}_i может быть одного порядка с E^-_i . Это значит, что попадание башмака на уходящий от него участок проводника с та-

кими геометрическими приведет к снижению энергии сосуда на величину, определяемой по формуле (5). Это объясняет тот факт, что в отдельных циклах спуска/подъема при динамических испытаниях и моделировании на участке общего роста нагрузок и перемещений сосуда появляется короткий интервал времени (трассы), в течение которого нагрузки и перемещения значительно снижаются. Такой эффект возможен, когда башмаки сосуда в течение серии последовательных ударов встречались не с набегающими, а с уходящими гранями проводников, передавая им (крепи ствола, горному массиву) часть кинетической энергии. Например, интервал 90-100 сек на рис. 5а.

В то же время, когда на этом участке в другом цикле сосуд будет попадать башмаками на набегающие грани проводников, значительное возрастание энергии колебаний сосуда и рост нагрузок неизбежны, рис. 5б.

Выявить такие участки ствола и разработать рекомендации по снижению потенциально опасных контактных нагрузок в системе возможно при математической обработке данных профилировки проводников и диаграммы скорости движения сосуда в цикле с использованием полученных соотношений. Ими являются участки с наибольшими значениями горизонтальных скоростей проводников.

Сосуд является объемным телом, которое в четырех точках постоянно контактирует с проводниками в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. На него одновременно воздействуют 2 проводника и вынуждают его совершать пространственное движение. Это движение зададим движением отрезка вертикальной оси сосуда, концы которого отслеживают при вертикальном перемещении по стволу горизонтальные перемещения центров оси колеи проводников напротив верхнего и нижнего поясов направляющих сосуда (на верхнем поясе эта точка совпадает с точкой крепления каната, на нижнем - с серединой расстояния между направляющими). Считаем, что сосуд движется в проводниках без зазоров.

На стадии предварительного анализа расчет кинематики «следящей» системы и расчет базовых значений энергетических параметров будем проводить с учетом его массы и моментов инерции сосуда (в такой модели мы получаем сепарированное от других причин значение передаваемой проводниками энергии) отдельно в лобовой, боковой и горизонтальной плоскостях.

Такое разделение по плоскостям целесообразно из-за того, что при маркшейдерской съемке станциями СИ профили проводников задаются в проекциях на эти плоскости. При этом вторым параметром, участвующим в расчете, является фактическая диаграмма скорости вращения барабана подъемной машины, которая определяет горизонтальную скорость смещения сосуда проводниками.

Фактически мы получим $E^{доп,пр}$ для всего сосуда.

Схема взаимодействия сосуда с проводниками в лобовой плоскости показана на рис 1. В боковой плоскости схема аналогичная.

В лобовой плоскости кинетическая энергия плоскопараллельного движения равна

$$E_{\text{лоб}}(t) = \frac{M \cdot V_{\text{гор}}^{\text{Л}}(t)^2}{2} + \frac{I_{\text{л}} \cdot \dot{\varphi}_{\text{л}}(t)^2}{2}; \quad (11)$$

в боковой

$$E_{\text{бок}}(t) = \frac{M \cdot V_{\text{гор}}^{\text{Б}}(t)^2}{2} + \frac{I_{\text{б}} \cdot \dot{\varphi}_{\text{б}}(t)^2}{2}; \quad (12)$$

энергия вращательного движения в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси

$$E_{\text{гор}}(t) = \frac{I_{\text{в}} \cdot \dot{\varphi}_{\text{в}}(t)^2}{2}, \quad (13)$$

где M - масса сосуда, $I_{\text{л}}$, $I_{\text{б}}$, $I_{\text{в}}$ - моменты инерции сосуда относительно центральных осей, перпендикулярных соответственно лобовой, боковой и горизонтальной плоскостям; $\dot{\varphi}_{\text{л}}$, $\dot{\varphi}_{\text{б}}$, $\dot{\varphi}_{\text{в}}$ - мгновенные угловые скорости поворотов сосуда вокруг центральных осей, перпендикулярных соответственно лобовой, боковой и горизонтальной плоскостям, $V_{\text{гор}}^{\text{Л}}$, $V_{\text{гор}}^{\text{Б}}$ - мгновенные горизонтальные скорости центра масс сосуда соответственно в лобовой и боковой плоскостях.

Для проведения такой оценки необходимо иметь данные аппаратурных измерений следующих параметров ШПУ:

- абсолютных координат рабочих поверхностей каждого из проводников в лобовой плоскости в раскладке по номерам ярусов армировки по всей высоте подъема (берутся из данных маркшейдерской профильной съемки станцией СИ),

- абсолютных координат рабочих поверхностей каждого из проводников в боковой плоскости в раскладке по номерам ярусов армировки по всей высоте подъема (берутся из данных маркшейдерской профильной съемки станцией СИ),

- раскладку номеров ярусов по глубинным отметкам в стволе и копре или раскладку расстояний между ярусами (берется из маркшейдерской документации или паспорта ствола),

- раскладку диаграммы скорости подъема по времени в цикле (берутся из данных регистратора скорости подъемной машины).

Построение функций $V_{гор}^A(t)$, $V_{гор}^B(t)$, $\dot{\varphi}_A(t)$, $\dot{\varphi}_B(t)$, $\dot{\varphi}_C(t)$ выполнялось в следующей последовательности:

1- ввод табличных файлов дискретных данных профилей проводников, номеров ярусов, скорости подъема, массы, моментов инерции, размеров сосуда;

2- линейная интерполяция дискретных данных и построение непрерывных функций зависимости горизонтальных координат профилей проводников от номера яруса: «горизонтальная координата - номер яруса»;

3- линейная интерполяция дискретных данных и построение непрерывных функций зависимости номеров ярусов и шага армировки от координат глубинных отметок: «номер яруса - вертикальная координата», «шаг армировки - вертикальная координата»;

4- интерполяция дискретных данных и построение непрерывных функций зависимости вертикальной скорости от времени: «вертикальная скорость - время»;

3 - интегрирование функции вертикальной скорости и построение функции координаты сосуда от времени: «вертикальная координата - время»;

4 - построение непрерывных функций зависимости «номер яруса - время» и «шаг армировки - время» путем создания сложной функции «ярус - метр(метр-время)» («шаг - метр(метр - время)»);

5 - построение непрерывных функций зависимости горизонтальных координат профилей проводников от времени путем создания сложной функции «горизонтальная координата - ярус (ярус - время)»;

7 - построение непрерывных функций зависимости координат центра оси колеи от времени по функциям «горизонтальная координата - время» всех проводников на переднем по ходу сосуда поясе (при подъеме - на верхнем поясе, при спуске - на нижнем);

8 - построение непрерывных функций зависимости координат центра оси колеи от времени по функциям «горизонтальная координата - время» всех проводников на заднем по ходу сосуда поясе (при подъеме - на нижнем поясе, при спуске - на верхнем) с учетом сдвига на время прохождения сосудом мимо текущего яруса армировки;

9 - построение 5-ти непрерывных функций зависимостей горизонтальных перемещений центра масс сосуда и углов поворота сосуда вокруг центральных осей от времени по формулам работы [1]: «перемещение - время», «угол поворота - время»;

10 - построение непрерывных функций зависимости горизонтальных и угловых скоростей возмущений путем дифференцирования функций «перемещение - время» и «угол поворота - время»;

11 - построение функций зависимости кинетической энергии сосуда от времени по формулам (13)-(15): «энергия-время»;

12 - построение графических изображений функций «энергия - время».

Проиллюстрируем реализацию изложенного метода на примере породного скипового подъема ствола ГС-1 ЗАО ЗЖРК.

На рис. 6 приведены графики лобовых профилей проводников №1 и №2 скипового отделения в раскладке по номерам ярусов армировки. Горизонтальными линиями отмечены участки расположения компенсаторов вертикального смещения крепи ствола.

В результате расчетов по приведенному выше алгоритму для лобовой плоскости проводников получим графики развертки полной кинетической энергии скипа и номеров ярусов по времени в цикле.

Из них видно, что наибольшие возмущения в цикле подъема скип должен испытывать в интервале движения между 75-й и 105 секундами с пиком возмущений на 90-й секунде. Сопоставление этих моментов времени с графиком диаграммы скорости на рис. 1а показывает, что пик возмущений приходится на участок диаграммы с максимальной скоростью 10,5 м/с, с которой скип проходит между 3-м и 5-м компенсаторами вертикального смещения проводников. Энергия возмущений достигает 22 Дж, что в 3-4 раза больше, чем на остальных участках трассы движения сосуда.

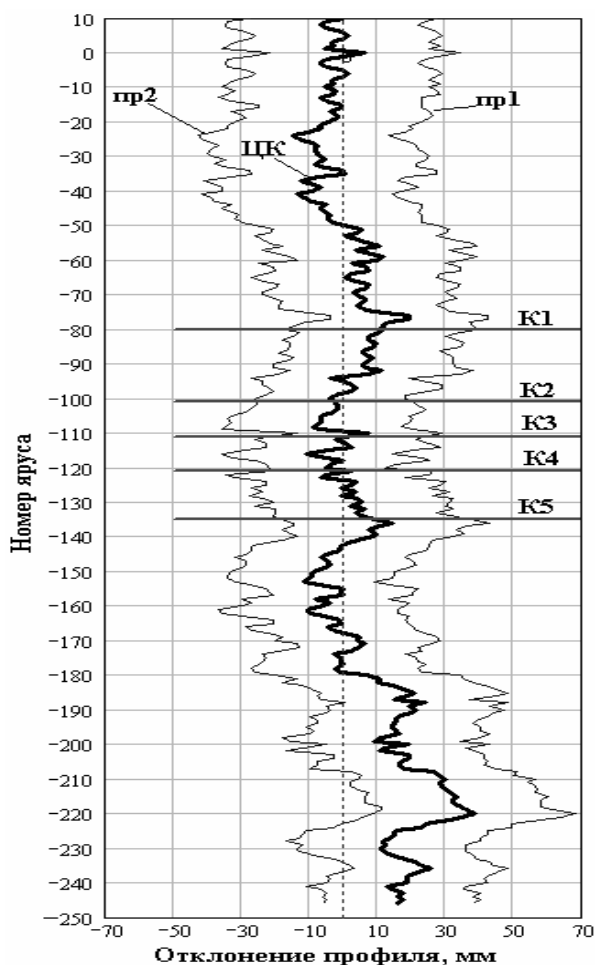


Рис. 6. Профили проводников №1, №2 и координаты центра колеи (ЦК) в развертке номерам ярусов армировки.

Снижение этой энергии возможно за счет локальной коррекции профиля проводников между указанными компенсаторами или за счет снижения скорости движения скипа по этому участку.

Сопоставление графика полной кинетической энергии возбуждения сосуда от системы проводников на рис. 7 с графиками горизонтальных нагрузок на армировку (рис.5), полученных в рамках динамической модели реальной системы с начальными статическими зазорами по 23 мм на сторону, показывает их идентичность по параметру «максимальные нагрузки - временная координата». При этом различия в амплитудных значениях реакции сосуда на возмущения проводников на одном и том же участке ствола вызваны различиями во внутренних параметрах сосуда. В данном случае это различия в положении центра масс груза в скипе, которые меняют карту распределения статических зазоров между отдельными башмаками и проводниками по глубине ствола.

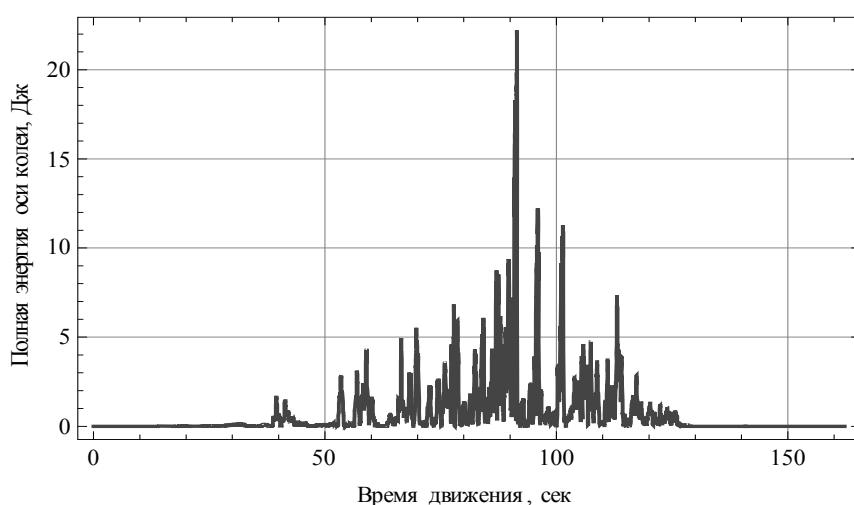


Рис. 7. График полной кинетической энергии возбуждения сосуда от системы проводников.

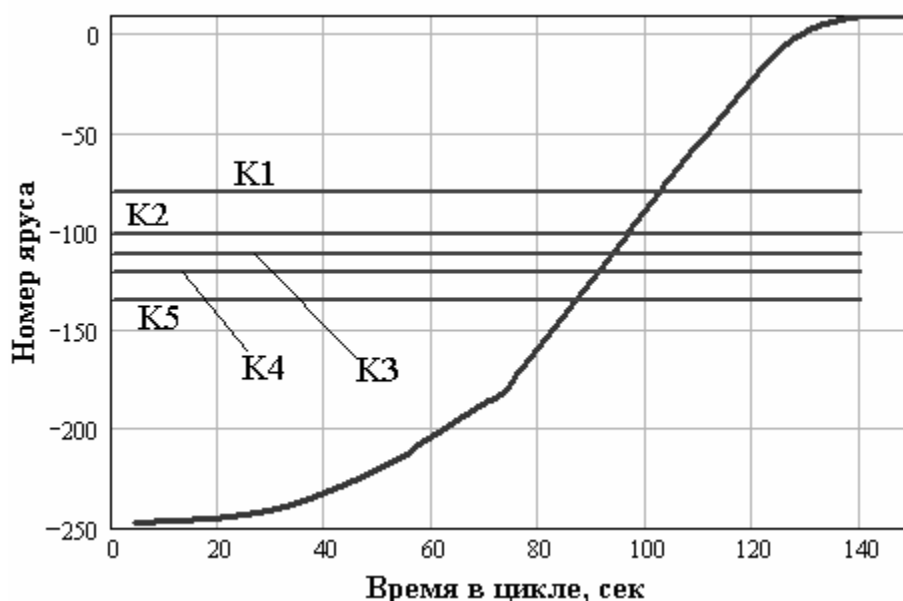
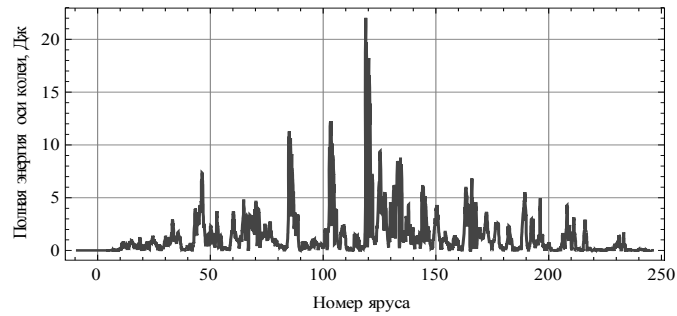
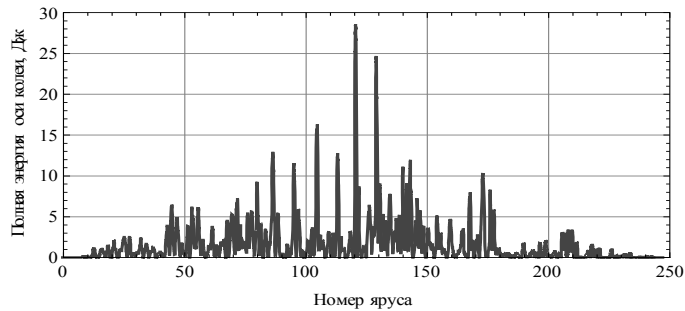


Рис. 8. График развертки номеров ярусов во времени в цикле подъема скипа.

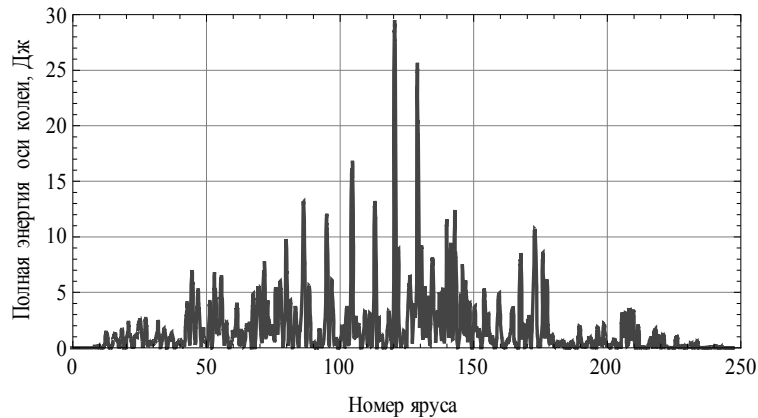
Ниже, на рис. 9, приведены графики распределения кинетической энергии возмущений сосуда проводниками по ярусам армировки для 4-х последовательных циклов подъема грузевого скипа, представленных в работе [2] (первые три – с реальными диаграммами скорости, 4-й по сглаженной диаграмме).



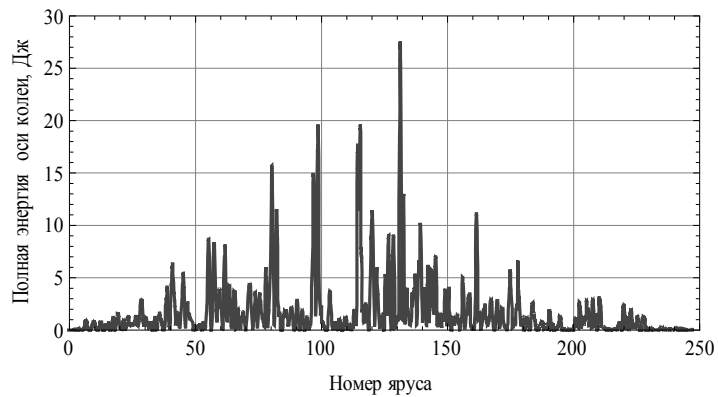
а)



б)



в)



г)

Рис. 9. Диаграммы распределения энергии возмущений от проводников по ярусам армировки для разных диаграмм скорости подъема.

Наибольшее по уровню энергетическое воздействие на сосуд оказывают яруса: №120 в цикле (а), №120-122, №130 в цикле (б), №120, №130 в цикле (в), №130 в цикле (г). Энергия возмущений изменяется в достаточно широких пределах: ярус 120 (20-30 Дж), ярус 130 (9-27 Дж). Явно видны участки с более низким (до 2-3-х раз) уровнем возмущений: яруса №№55-60, 78-82, 97-100, 115-118, 128-129, 138-139, 150-153.

Участки с наибольшим уровнем энергетического воздействия являются потенциально опасными с точки зрения провоцирования ударных нагрузок высокого уровня и снижения запасов прочности проводников и расстрелов ниже допустимых пределов.

Выявление таких участков на стадии предварительного анализа состояния армировки позволяет силами службы главного маркшейдера и главного энергетика предприятия принять меры по приведению армировки в состояние равномерной динамической нагруженности ярусов по глубине ствола.

Выводы

1. Локальные участки ствола с укороченным шагом армировки при постоянном уровне амплитудных отклонений профилей проводников от вертикали по глубине ствола являются источником интенсивного роста кинетической энергии горизонтальных колебаний подъемного сосуда и динамических нагрузок на армировку. Допустимая величина отклонений на смежных ярусах для таких участках должна быть меньше нормируемого значения 10 мм в основной части ствола. Кинетическая энергия, передаваемая проводниками сосуду на участках ударного взаимодействия при прочих равных условиях, растет с увеличением вертикальной скорости подъема.

2. При взаимодействии предохранительных башмаков подъемного сосуда в ударном режиме на локальных участках ствола изменение (нарастание, убывание) кинетической энергии горизонтального движения сосуда происходит в зависимости от мгновенных значений фаз скоростей соударений предохранительных башмаков и рабочих граней проводников (противофазный контакт, синфазный контакт) и параметров диаграммы вертикальной скорости сосуда.

3. При отсутствии параметрического возбуждения со стороны армировки, вызванного дискретным закреплением проводников на расстрелах по глубине ствола, значительное нарастание кинетической энергии горизонтального движения сосуда и контактных нагрузок на локальных участках происходит при противофазном взаимодействии башмаков с рабочими гранями проводников на протяжении короткой серии ударов на участке 3-5 пролетов армировки.

4. Снижение уровня нарастания кинетической энергии горизонтального движения сосуда и контактных нагрузок на армировку достигается путем сглаживающей коррекции профилей проводников на локальном участке ствола с повышенным уровнем энергетического возбуждения со стороны проводников и/или снижением на нем вертикальной скорости сосуда и нормализацией статических зазоров в парах «башмак-проводник» по всем рабочим граням направляющих сосуда в лобовой и боковой плоскостях проводников.

5. Максимально возможное изменение кинетической энергии сосуда между контактами при серии соударений башмаков с проводниками происходит по квадратичному закону от относительной горизонтальной скорости рабочих граней проводников в моментах контакта с башмаками.

6. Скорость горизонтального перемещения рабочей грани проводника в точке контакта с башмаком пропорциональна вертикальной скорости сосуда и углу наклона проводника к вертикали в пролете между ярусами армировки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика расчета жестких армировок вертикальных стволов шахт // Минуглепром СССР, НИИ горной механики им. М.М.Федорова. – Донецк. -1985. -145 с.
2. Ильин С.Р. Влияние параметров диаграммы скорости подъема и эксцентриситета груза на динамику системы «сосуд-армировка» шахтных стволов / С.Р.Ильин // ИГТМ НАН Украины. Геотехническая механика. Межвед. Сб-к. науч. тр. Вып. 98.-Днепропетровск. -2012.
3. Лойцянский Л.Г. Теоретическая механика / Л.Г. Лойцянский, А.И.Лурье // Ленинград-Москва. - ГТТИ.-1933.-452С.
4. Ильин С.Р. Разработка и обоснование общей диагностической модели оборудования шахтных подъемных установок / С.Р.Ильин // ИГТМ НАН Украины. /Геотехническая механика. Межвед. Сб-к. науч. тр. Вып. 76.-Днепропетровск. -2008. -С. 44-63.

УДК 622.648.01 – 9:621.643.29

Д-р техн. наук Е.В. Семененко
(ИГТМ НАН Украины),
д-р техн. наук О.В. Витушко
(ООО «Шахтостроймонтаж»),
канд. техн. наук Н.А. Никифорова
(Национальная металлургическая академия Украины)

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТА УГЛЯ

Методику А.Є. Смолдирева для розрахунку критичної швидкості та гідравлічного ухилу, узагальнену для випадків застосування труб з полівінілхлориду та поліетилену, а також використання розчинів гідродинамічно активних речовин, адаптовано під умови інженерних розрахунків з урахуванням досвіду розрахунків параметрів гідротранспорту вугілля й логарифмічного закону, який найчастіше використовується при визначенні коефіцієнта гідравлічного опору тертя.

ENGINEERING CALCULATION PROCEDURE OF COAL HYDROTRANSPORT PARAMETERS

The A.E. Smoldirev calculation procedure of critical velocity and hydraulic gradient generalized for the cases of use of polyvinylchloride and polyethylene pipes as well as application of drag reducing agents is adapted on conditions of engineering calculations taking into account experience of calculation of coal hydrotransport parameters and logarithmic law mostly used when determining drag coefficient.

Напорный гидротранспорт угля получил широкое распространение на угледобывающих и углеобогатительных предприятиях Украины. Однако, несмотря на более, чем полувековой опыт его использования для указанных технологий, достоверное определение параметров гидротранспорта угля – критической ско-