Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXVII, вып. 1, 1975 г.

ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ГИДРОТРАНСПОРТНЫХ УСТАНОВОК

Доктор техн. наук *В. Н. Покровская*,
канд. техн. наук *Ю. П. Бойцов*
(Ленинградский горный ин-т)

Гидравлическое транспортирование твердого материала является одним из важных элементов технологического процесса добычи и переработки полезных ископаемых. В настоящее время суммарная длина гидротранспортных линий в СССР составляет более 3 млн. *км*, а объем транспортируемого материала — более 300 млн. *т*. Основными показателями, характеризующими эффективность работы гидротранспортных установок, являются удельные расходы воды, электроэнергии, металла, а также капиталовложения, отнесенные к 1 $м^3$ транспортируемого материала. Так, на отечественных предприятиях средний расход воды составляет 10—20 $м^3/м^3$, электроэнергии 3,2—26,5 $квт \cdot ч/м^3 \cdot км$, удельный расход труб 0,52—1,54 *кг/т*, причем эти показатели значительно ниже экономических показателей передовых зарубежных предприятий. Вот почему в Советском Союзе в последнее время большое внимание уделяется изучению процесса движения гидросмесей, определению оптимальных параметров режимов работы гидротранспортных установок и их надежности.

В Ленинградском горном институте с 1961 г. ведутся работы по изучению характера движения гидросмеси в трубопроводах и открытых лотках при транспортировании песка, руды, хвостов обогащения, проведены исследования распределения скоростей, концентрации по поперечному сечению трубопровода, потерь напора при движении гидросмесей и других параметров. В результате многолетних исследований установлено, что оптимальные параметры транспортирования определяются не только его энергетическими параметрами (потерями напора), но и условиями работы установки, ее технико-экономическими показателями. Большое внимание в исследованиях уделялось также изучению вопроса создания потоков высокого насыщения, методов и средств сгущения гидросмесей, гидроабразивному, кавитационному и другим видам износа, а также надежности и долговечности гидротранспортных установок.

В результате всех проведенных исследований установлено, что эффективность работы гидротранспортных установок определяется: а) оптимальными параметрами транспортирования — скоростью и консистенцией: б) устойчивостью процесса транспортирования; в) надежностью гидротранспортной системы.

В качестве критерия оценки экономической эффективности (оптимальных параметров) работы гидротранспортной линии может быть принят показатель суммарных затрат, отнесенный к 1 $м^3$ транспортируемого материала. Этот показатель должен характеризовать не только основные параметры гидравлического транспортирования, но и текущие и капитальные затраты.

Как известно, основными параметрами, характеризующими процесс гидравлического транспортирования, являются средняя скорость движения гидросмеси v и концентрация твердого в потоке C, а также диаметр трубопровода D. Экономичными значениями скорости и консистенции являются такие величины, при которых суммарные затраты на весь транспортный комплекс и связанные с ним технологические операции, отнесенные к 1 $м^3$ твердого материала, минимальны.

При определении экономичных значений параметров транспортирования все затраты можно разделить на две основные группы. К первой группе относятся затраты, связанные непосредственно с процессом транспортирования, ко второй — затраты, определяющиеся технологическим процессом основного производства, элементом которого является гидротранспортная установка.

Затраты на транспортирование складываются из следующих элементов:

$$\Sigma A = A_э + A_{ам} + A_з,$$

где $A_э$ — энергетические затраты; $A_{ам}$ — амортизационные отчисления; $A_з$ — эксплуатационные затраты, определяющиеся заработной платой рабочих, обслуживающих гидротранспортный комплекс.

Энергетические затраты включают затраты на транспортирование гидросмеси, доставку ее к смесительному комплексу, загрузку гидросмеси в трубопровод, сброс, осветление и транспортирование оборотной воды. Энергетические затраты непосредственно на транспортирование определяются расходом электроэнергии на перемещение груза и зависят от характеристики транспортной схемы, производительности установки, удельного веса гидросмеси, твердого материала и т. д. Энергетические затраты на доставку и загрузку гидросмеси в трубопровод являются функцией производительности гидротранспортной установки. Расход электроэнергии на сброс и транспортирование осветленной воды в большинстве случаев не зависит от параметров гидротранспорта, так как осветление происходит без затрат энергии, а транспортирование осуществляется автономными установками, режим работы которых не зависит от характера движения гидросмеси.

Амортизационные отчисления, т. е. затраты, связанные с износом гидротранспортного оборудования, включают затраты на приобретение и монтаж оборудования. Первые находятся в прямой зависимости от скорости, консистенции гидросмеси и диаметра трубопровода. Капитальные же затраты на монтаж гидротранспортной установки зависят от условий прокладки трассы и диаметра трубопровода.

Затраты, отнесенные ко второй группе (технологические), складываются из затрат, определяющих эксплуатацию смежного технологического оборудования,

$$\Sigma B = B_1 + B_2 + B_3 + \ldots + B_n,$$

где B_1 B_2, . . . B_n — затраты по вентиляции шахтного поля, поддержанию выработок, обслуживанию закладочных работ и другие.

Эти затраты определяются как заработной платой основных рабочих предприятий, так и амортизационными отчислениями, затратами электроэнергии, материалов, основного технологического оборудования предприятия.

Относительные суммарные затраты, т. е. затраты, отнесенные к производительности гидротранспортной установки по твердому материалу $Q_т$ и характеризующие экономическую эффективность транспортирования полезного ископаемого, могут быть выражены как

$$\frac{\Sigma A + \Sigma B}{Q_т} = \frac{1}{C}(Э_{к w_1} h\gamma + Э_{к w_3}) + \frac{v^2}{CD} Э_{к w_2} L\gamma + \mu'_\Sigma + \\ + \frac{1-C}{C}(Э_{к w_4} + q_в) + \frac{4}{\pi D^2 Cv}(\Sigma q_a + \Sigma q_т) + \mu''_\Sigma \frac{D^m}{Cv}, \qquad (1)$$

где $Э_{к w_1}$, $Э_{к w_2}$, $Э_{к w_3}$, $Э_{к w_4}$ — относительные затраты электроэнергии при подъеме гидросмеси на высоту h и ее транспортировании на длину L, а также при загрузке твердого и подаче воды, сбросе и транспортировании оборотной воды; $Э_{к w_1} = c_{эл} \frac{1}{367\eta}$; $Э_{к w_2} = c_{эл} \frac{\lambda}{2g\,367\eta}$; $c_{эл}$ — стоимость электроэнергии; η — коэффициент полезного действия установки; $q_в$ — стоимость воды; Σq_a, $\Sigma q_т$ — суммарные эксплуатационные и технологические затраты; μ'_Σ — коэффициент, связывающий суммарные амортизационные затраты, вызываемые износом оборудования, с параметрами установки и режимом транспортирования; μ''_Σ — суммарные относительные затраты на монтаж гидротранспортной установки, отнесенные к диаметру трубопровода; m — показатель степени, характеризующий трудоемкость монтажных работ; γ — удельный вес гидросмеси; D — диаметр трубопровода.

Анализ последней зависимости показывает, что суммарные относительные затраты с ростом консистенции гидросмеси снижаются, т. е. экономичным значением консистенции является наибольшая по условиям транспортабельности величина. Экспериментально установлено, что оптимальной (максимально возможной) консистенцией гидросмеси для напорного и самотечного транспорта при транспортировании крупнофракционного материала является величина $C = 0{,}25 \div 0{,}30$ и мелкофракционного — $C = 0{,}45 \div 0{,}50$, причем во многих случаях эти величины определяются соотношением длин горизонтального и вертикального участков трубопровода.

Экономичные значения скоростей движения гидросмеси могут быть определены из выражения (1) при условии минимума суммарных относительных затрат

$$\frac{d(\Sigma\Delta A + \Sigma\Delta B)}{dv} = 0,$$

где

$$\Sigma\Delta A = \frac{\Sigma A}{Q_т}; \quad \Sigma\Delta B = \frac{\Sigma B}{Q_т},$$

то есть

$$v_{эк} = \sqrt[3]{\frac{\frac{2(\Sigma q_a + \Sigma q_т)}{\pi D} + \frac{1}{2}\mu''_\Sigma D^{m-1}}{Э_{к w_2} h\gamma + \mu'_\Sigma}}. \qquad (2)$$

Расчеты, проведенные по вышеуказанной методике, показывают (рис. 1), что значения экономических скоростей $v_{эк}$ значительно отличаются от критических $v_{кр}$ и составляют $v_{эк} = (2{,}5 \div 3) v_{кр}$ для самотечного транспорта и $v_{эк} = (1{,}6 \div 1{,}8) v_{кр}$ — для напорного.

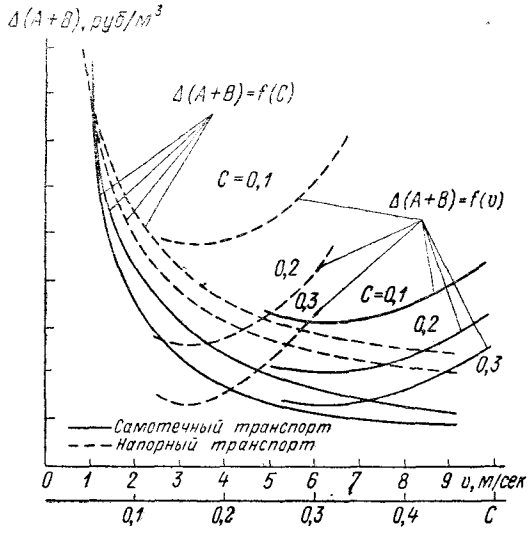


Рис. 1. Зависимость удельных суммарных затрат $\Delta(A+B)$ от скорости v и консистенции C при транспортировании мелкофракционного материала

Определив из формулы (1) первую производную по диаметру трубопровода и приравняв ее к нулю, можно получить значение экономичного диаметра при определенных параметрах движения гидросмеси.

Таким образом, эффективность работы гидротранспортной установки может быть определена на основании экономического анализа эксплуатации гидротранспортной установки и смежного с ней технологического оборудования, причем для конкретных условий (или проектных) могут быть определены оптимальные параметры транспортирования: скорость, консистенция и диаметр трубопровода (рис. 1).

Большое влияние на эффективность гидравлического транспорта оказывает гидроабразивный износ трубопроводов и другого оборудования, так как расход труб, особенно при транспортировании абразивных пород, в значительной степени определяет себестоимость продукта и область рационального применения гидравлического транспорта.

Основными параметрами, определяющими степень изнашивания, являются скорость движения гидросмеси по трубопроводу, концентрация твердого в потоке, крупность частиц транспортируемого потока, направление движения твердых частиц относительно изнашиваемой поверхности, соотношение твердости частиц и материала трубопровода и др. В общем виде гидроабразивный износ является следствием суммарного воздействия всех видов разрушения: абразивного, кавитационного, эрозийного и других, причем в обычных условиях гидравлического транспорта основное влияние оказывает гидроабразивный износ. В связи с тем, что частицы твердого материала совершают хаотичное движение под различными углами относительно изнашиваемой поверхности, природа и характер гидроабразивного износа могут быть изучены на основании теории случайных величин.

Абсолютное значение интенсивности изнашивания может быть определено из выражения

$$\Delta a = U_{\Sigma} \frac{R_a}{R_{\text{м}}} \cdot \frac{1}{\gamma}, \qquad (3)$$

где R_a, $R_{\text{м}}$ — твердость труб и транспортируемого материала; γ — коэффициент, характеризующий прочностные свойства изнашиваемой детали и абразивные свойства транспортируемого материала; $U_{\Sigma} = U' \sin\alpha (1-K) + U'' K$ — общая энергия износа; U' — сила ударного воздействия частицы твердого при движении частиц во взвешенном состоянии; U'' — сила воздействия твердого материала при условии движения всего слоя твердого волочением; α — угол контактного удара; K — коэффициент, учитывающий содержание в потоке крупных фракций.

Относительный (удельный) износ трубопровода

$$\Delta_y = \frac{2}{3}\left(\frac{\rho_{см}}{g} \cdot \frac{v_{ср}}{\rho_{тв}}\right) \sin\alpha \frac{R_a}{R_м} \cdot \frac{1}{\gamma}, \qquad (4)$$

где $\rho_{тв}$, $\rho_{см}$ — плотность твердого и гидросмеси; $v_{ср}$ — средняя скорость движения потока, *м/сек*; g — ускорение силы тяжести.

Зависимость, характеризующая гидроабразивный износ деталей землесосов, имеет вид

$$\Delta_a = \frac{v^3}{2g} \Delta\gamma C \rho_{тв} T \alpha e^{-4C}, \qquad (5)$$

где T — время, в течение которого определялся износ.

В зависимости от условий транспортирования, физико-механических свойств материала и гидросмеси, необходимо учитывать и другие виды износов. Исследования кавитационных явлений при гидравлическом транспортировании показывают, что основными факторами, определяющими интенсификацию износа, являются скорость движения абразивного потока и его аэрация, причем показатель степени при скорости меняется от двух ($v=6$—10 *м/сек*) до трех ($v>10$ *м/сек*), т. е. влияние кавитационного износа на общий износ может быть учтено путем изменения показателя степени при скорости. Так, например, для определения износа элементов землесоса показатель степени должен быть равен трем, а для износа трубопровода — двум. Влияние аэрации на процесс износа может быть учтено введением в расчетную формулу дополнительного коэффициента аэрации, определенного опытным путем и равного 1,0—1,4 (в зависимости от содержания воздуха в трубопроводе). Гидроэрозия и коррозия могут быть учтены при определении износа коэффициентом эрозии, равным $k_э = 1{,}6 \div 2{,}0$.

Однако сами по себе оптимальные параметры гидросмеси являются лишь необходимым условием эффективной работы гидротранспортной установки. Полная эффективность может быть обеспечена лишь при условии надежности системы. Разными авторами дается различная трактовка понятия надежности. В данном случае под надежностью понимается способность системы выполнять свои функции в определенных режимах работы. Для оценки надежности оборудования существует несколько количественных характеристик, из них наиболее удовлетворяющими данным условиям следует считать время безотказной работы или вероятность безотказной работы, отнесенные к определенному периоду времени.

Надежность всей транспортной линии определяется надежностью ее отдельных элементов, т. е. загрузочно-смесительного комплекса, насоса, трубопровода и в некоторых случаях сгустителя гидросмеси. Анализ работы гидротранспортных линий показывает, что аварийность (отказ того или иного элемента) может быть охарактеризована следующим образом: отказ насосов 51%, закупорка пульповодов 30,5%, ремонт пульповодов и частичная смена труб 14%, нарушение технологического режима 4,5%, т. е. отказы определяются главным образом закупорками пульповодов, отказами землесосов и износом трубопровода. Первые зависят от устойчивости режима транспортирования, вторые и третьи определяются долговечностью (износостойкостью) пульповодов и землесосов.

Основными параметрами, определяющими устойчивость режима транспортирования, являются режим питания, скорость движения и консистенция потока.

Режим питания установки определяется степенью аэрации потока, и в качестве критерия, определяющего режим питания, может быть принят коэффициент использования пульповода

$$k_{\text{п}} = \frac{Q}{Q_{\text{т}}}.$$

На практике величина коэффициента использования может быть определена как отношение среднерасходной производительности к теоретической расчетной ($Q/Q_{\text{т}}$). Предельным значением этого коэффициента является $k_{\text{п}} = 1$: чем ближе значение $k_{\text{п}}$ к единице, тем эффективнее и надежнее режим транспортирования.

Большое влияние на устойчивость гидравлического транспорта оказывает скорость движения гидросмеси, а сама устойчивость определяется отношением действительной скорости движения к критической

$$k_v = \frac{v_{\text{д}}}{v_{\text{кр}}}.$$

Нижним предельным значением k_v является единица, верхним $v_{\text{эк}}/v_{\text{кр}}$, т. е. скорость движения гидросмеси ограничивается экономичным значением, определенным для конкретных условий. Для самотечного транспорта $k_v = 2{,}5 \div 3$, для напорного $k_v = 1{,}6 \div 1{,}8$. Однако далеко не всегда возможна эксплуатация гидротранспортной линии при оптимальных значениях k_v. Так, практическое применение экономичных скоростей при самотечном трубопроводном транспорте ограничивается характером трассы и главным образом отношением суммарной высоты пульподачи к полной длине транспортирования по горизонтали H/L, действительная скорость может быть ниже оптимальной.

Исследования потоков высокого насыщения показали, что для каждого типа гидросмесей имеет место свое предельное насыщение, определяющееся физико-механическими свойствами транспортируемого материала, гранулометрическим составом твердой фазы потока, скоростью движения потока, распределением частиц твердого в поперечном сечении трубопровода. Превышение этих предельных значений недопустимо, так как в этом случае поток не будет обладать необходимой транспортирующей способностью. В связи с этим критерием надежности, определяющим способность транспортирования гидросмесей, является отношение средней рабочей концентрации потока к предельному его значению $k_{\text{с}} = \frac{C_{\text{р}}}{C_{\text{пр}}}$. Оптимальная величина $k_{\text{с}}$ зависит от условий транспортирования, и предельным значением, обусловливающим получение 10% резерва, является величина 0,9.

Надежность гидротранспортного комплекса определяется, как указывалось, надежностью отдельных его элементов, а отказ одного элемента при их последовательном соединении, что имеет место в гидротранспортных схемах (простейший случай), вызывает отказ всей системы. Удобной для практических целей характеристикой надежности является интенсивность отказов, т. е. вероятность отказов в единицу времени, отнесенная к числу исправных изделий в данный момент времени.

Среднее время между отказами

$$\frac{1}{T_{\text{ср}}} = \frac{n_1}{T_1} + \frac{n_2}{T_2} + \ldots + \frac{n_i}{T_i},$$

где $T_{\text{ср}}$, T_i — среднее время безотказной работы всей установки и элемента; n_i — число элементов каждого типа, входящих в установку.

Время безотказной работы системы может быть вычислено и иначе: $T_{ср}=\int p(t)dt$, где $p(t)$ — вероятность безотказной работы.

Связь между средней частотой отказов $\omega(t)$ и вероятностью исправной работы $p(t)$ определяется как $\omega(t) = -p'(t)$, где $\omega(t)=\frac{(nt)}{N_0\,\Delta t}$; $n(t)$ — число отказов элементов системы в интервале времени Δt; N_0 — общее число элементов; $p'(t)$ — дифференциальный закон распределения случайной величины.

Таким образом, интенсивность отказов равна

$$\lambda(t)=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{n(t)}{N(t)\,\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{n(t)}{N_0\,\Delta t}\cdot\frac{\frac{1}{Nt}}{\frac{N_0}{}}=\frac{\omega(t)}{p(t)}\cdot \qquad (6)$$

Опыт эксплуатации гидротранспортных установок и анализ статистических данных показывают, что интенсивность отказов характеризуется тремя временными периодами (рис. 2): первый, так называемый период приработки, характеризуется высокой интенсивностью отказов, второй — относительным постоянством их (период нормальной эксплуатации) и третий — период аварийных отказов с резким ростом интенсивности. Для различных типов изделий в зависимости от условий их эксплуатации отдельные временные периоды могут быть выражены по-разному или даже отсутствовать. Например, для землесоса в целом кривая интенсивности отказов характеризуется лишь двумя участками: первым, по времени совпадающим со средней наработкой на отказ рабочего колеса землесоса, и вторым — с резким возрастанием интенсивности.

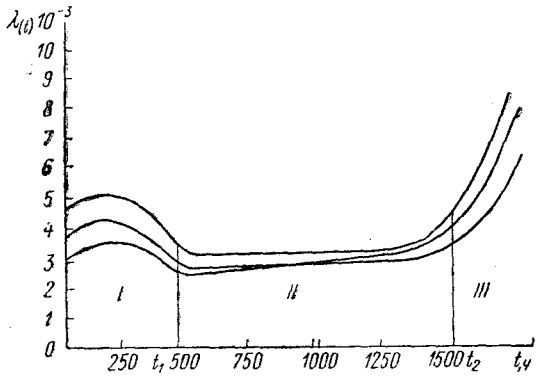


Рис. 2. Интенсивность износа гидротранспортной установки