Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
1987, т.110

УДК 622.789.5

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

В.Н.ПОКРОВСКАЯ

Достижение экономического эффекта при обеспечении надежности работы транспортных установок без дополнительных затрат является основой интенсификации работы гидротранспорта.

Интенсификация работы гидротранспортных установок обуславливается обеспечением устойчивости и стабильности течения потоков гидросмеси. Обычно такие режимы имеют место при постоянстве параметров транспортирования: скорости течения потока, расхода пульпы, концентрации твердой фазы в потоке. Однако эти параметры в реальных условиях часто претерпевают изменения, особенно в тех случаях, когда параметры гидросмеси обусловлены технологическим процессом, который способствует периодическим и весьма ощутимым колебаниям. Поэтому главным для поддержания стационарного режима является правильный выбор этих параметров, поддержание в процессе транспортирования их значений, определяющих устойчивость всего процесса гидравлического транспортирования. Опытом установлено, что значительное влияние оказывает концентрация твердой фазы в потоке, увеличение числа частиц и контактирование их между собой, что вызывает нарушение структуры потока. С ростом консистенции гидросмеси активность взаимодействия частиц и число их соударений возрастают, но до определенной степени насыщения потока, после чего его структура становится практически постоянной.

Введение в поток жидкости частиц твердого, вызывая изменение турбулентных характеристик потока, изменяет и гидравлические его характеристики, причем абсолютная величина приращения сопротивлений в функции концентрации гидросмеси для мелкофракционных ($d < 1$ мм) и крупнофракционных материалов имеет различное значение. При этом функция $\Delta i_{\text{п}} / c_v = f(v)$ всегда убывает, а функция $i_{\text{п}} / c_v = f(v)$ возрастает для всех видов материалов. Это обуславливается тем, что с повышением концентрации твердых частиц в потоке увеличивается вероятность их столкновения. Тонкие и мелкофракционные частицы, двигаясь в потоке жидкости, имеют скорость, равную или близкую скорости потока, и траекторию движения, совпадающую с траекторией движения частиц жидкости. Движение разнофракционной и неоднородной гидросмеси характеризуется повышением внутреннего трения частиц различной крупности. Эти частицы, двигаясь на разной высоте по сечению потока, по различным траекториям движения, сталкиваются между собой. Отсюда чем больше число частиц, тем больше взаимных соударений и тем больше эффект

внутреннего трения в потоке; чем выше фракционная разнородность, тем больше трение и диссипация энергии.

Следовательно, увеличение консистенции вызывает снижение интенсивности пульсаций для тонкодисперсных материалов, а для разнофракционных материалов интенсивность турбулентности возрастает, при достижении определенной степени насыщения потока эффект снижается, кроме того, при увеличении консистенции тонкодисперсных гидросмесей плотность несущего потока растет и достигает $\rho_{н.ж} = 1{,}05\text{-}1{,}1$. При этом устойчивость потока гидросмеси не нарушается до предельных значений насыщений, соответствующих значениям $c_v = 0{,}5$ для мелкофракционных материалов ($d_{ср} < 1\text{-}2$ мм); $c_v = 0{,}77$ для тонкодисперсных ($d_{ср} < 0{,}2\text{-}0{,}4$ мм); $c_v = 0{,}33$ для разнофракционных гидросмесей ($d_{ср} > 3$ мм). В соответствии с этим возникает задача изучения кинематики высоконасыщенных потоков гидросмеси. Учитывая, что по трубопроводам транспортируются тонкодисперсные гидросмеси, исследования выполнялись на этих типах гидросмесей с применением радиоизотопных плотномеров с вращающимися γ-контейнером (ПНР) и измерительной трубки Юфина - Орлова (СССР).

Выполненные исследования показали, что высокая транспортирующая способность и эффективность транспортирования насыщенных потоков гидросмесей достигаются при режиме полной взвеси частиц твердого в потоке и обуславливается особенностью механизма движения этого типа гидросмесей. Характерным при этом является снижение интенсивности турбулентного перемешивания потока, рост механического воздействия потока гидросмеси на твердую его фазу, повышение плотности несущего потока за счет насыщения его тонкодисперсными частицами.

Поток тонкодисперсной гидросмеси, движущейся в пульповоде, имеет тенденцию к винтообразному характеру движения и послевому распределению плотности гидросмеси, в зависимости от режима транспортирования слои имеют различную степень насыщения. При сверхкритическом (по скорости) режиме слои твердой взвеси обладают наименьшей концентрацией твердой фазы в пристеночной зоне и максимальной - в центральной части потока. При докритическом и прикритическом режимах движения потока концентрация твердой фазы имеет обратный характер - наибольшая плотность гидросмеси соответствует нижней части сечения.

Распределение концентрации зависит от условий течения потока гидросмеси. Наибольшее влияние на характер внутритрубного распределения твердой фазы оказывает соотношение значений скоростей движения и концентрации потока. При этом увеличение как скорости, так и концентраций приводит к одному и тому же явлению - возникновению винтового характера движения потока, формированию твердой фазы в зоне геометрической оси потока.

На рис.1 приведены результаты экспериментальных исследований. Анализ этих зависимостей подтверждает наличие винтового движения в потоке тонкодисперсных гидросмесей.

График функции $\eta = h/D = f(c_v)$ характеризует распределение твердой фазы по вертикальному диаметру трубопровода. В зависимости от грануло-

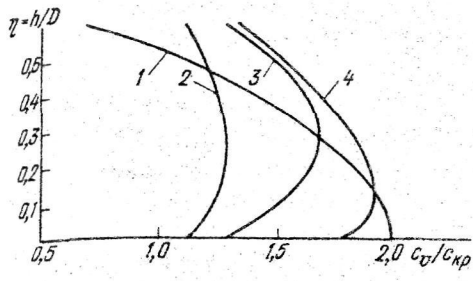

Рис.1. Распределение локальных значений объемных концентратов тонкодисперсных гидросмесей по высоте трубопровода D при высоте h точки измерения локального значения концентрации c_v ; 1 - песок крупностью 1-2 мм; 2 - хвосты обогащения легких руд 0,06 мм; 3 - хвосты обогащения руд 0,2 мм; 4 - хвосты обогащения полиметаллических руд крупностью 0,08-0,1 мм

метрической характеристики гидросмеси распределение подчиняется параболическому или экспоненциальному закону. При определенных значениях концентрации твердой фазы ядро потока обладает максимальной концентрацией (по графику на рис.I оно соответствует критическому значению отношения $c_v / c_{кр}$ = I,2-I,3). При наличии глинистых примесей и микронных частиц твердого, ядро максимальной концентрации совпадает с горизонтальной осью пульповода. Абсолютные значения критических концентраций в этих случаях c_v = 0,4-0,5. На рис.2, 3 приведены графические зависимости $v_{кр} = f(c_v)$, $J_{кр} = f(c_v)$ для гидросмесей с различными гранулометрическими характеристиками, сравнение их показывает, что все они подчиняются одному закону. Спад величины критической скорости и стабилизации ее значения для разных гидросмесей соответствует одной и той же зоне c_v = 0,I2-0,2. Дальнейшее увеличение насыщения потока твердыми частицами не дает существенного изменения характера зависимости. Все это является основанием для предположения о наличии в этих зонах винтового движения потока, полной стабилизации распределения концентрации гидросмеси по сечению потока, исключения - явления седиментации. Сравнение перечисленных зависимостей с графиком функции $J_{кр} = f(c_v)$ для тонкодисперсных гидросмесей показывает совпадение критических значений кон-

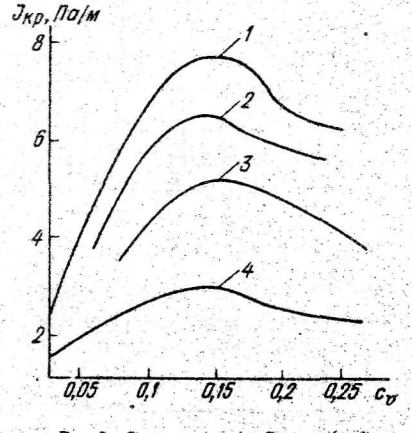

Рис.2. Зависимость $J_{кр} = f(c_v)$; 1, 2,3 - при транспортировании рудных хвостов обогащения (0,06-0,08 мм), 4 - концентраты легких руд (0,04-0,05)

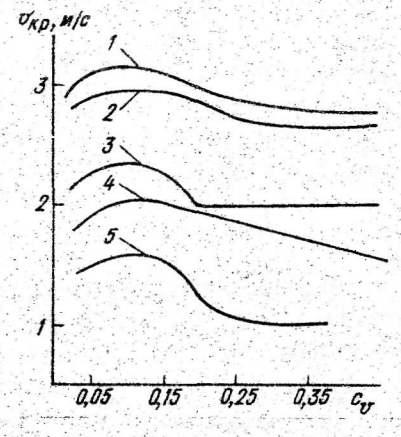

Рис.3. Зависимость $v_{кр} = f(c_v)$ при транспортировании тонкодисперсных (1-2 мм) песков (1,2) и рудных хвостов обогащения крупностью 0,06-0,08 мм (3,4,5)

центраций c_v = 0,12-0,2. Прослеживается и тенденция стабилизации величины гидравлических сопротивлений при дальнейшем увеличении концентрации твердой фазы и плотности потока.

Наличие столь различных видов распределения концентрации по сечению потока показывает, что в результате гидродинамического взаимодействия твердых частиц и несущей среды в потоке при определенных условиях происходит перераспределение скоростей и концентраций с преобразованием самого характера движения взвесенесущего потока.

Наличие параболического закона распределения концентрации свидетельствует о существовании второго вида движения гидросмеси, проявляющегося не столь наглядно, как поступательное, но играющего весьма важную роль в формировании структуры движения взвесенесущего потока. Это относится к перемещениям гидросмеси в плоскостях поперечных сечений потока, которые, вследствие его неразрывности, происходят лишь по замкнутым контурам. Суммарное взаимодействие их с поступательным движением потока придает его движению винтовой характер.

Экспериментальные исследования кинематических характеристик потока с помощью радиоизотопной техники позволили на основе имеющихся экспериментальных и теоретических исследований в области гидродинамики дать теоретическое описание данного явления. Теоретические исследования, выполненные в лаборатории гидротранспорта руды ЛПИ, показывают, что эти явления хорошо описываются следующими уравнениями (введение $\lambda_в$ и λ_{c_v} дают возможность оценить влияние концентрации гидросмеси):

$$v_{кр} = \sqrt{2gD\frac{\lambda_в + \lambda_{c_v}}{\lambda_в}\cdot\frac{\rho_т - \rho_в}{\rho_в}};$$

$$\lambda_в = \frac{1}{(1{,}8\lg Re - 1{,}64)^2};$$

$$\lambda_{c_v} = \frac{64\,c_v}{4\sqrt{Re\,(1-c_v)}};$$

$$J_г = \lambda_в\frac{\rho_в v^2 L}{2D} + 0{,}0509\,\lambda_{c_v}\frac{\rho_в v_{кр}^4 L}{D^2}.$$

При изменении вязкостных свойств среды потока гидросмеси, например, при введении в поток полимерных добавок, может быть использована следующая зависимость:

$$\lambda_{кр} = \sqrt{2gD\frac{\lambda_{вп} + \lambda_{c_v п}}{\lambda_{вп}}\cdot\frac{\rho_т - \rho_в}{\rho_в}};$$

$$\lambda_{вп} = \frac{1}{(1{,}8\lg Re_п - 1{,}64)^2};$$

$$\lambda_{c_v \text{п}} = \left(4\sqrt{Re_{\text{п}}(1-c_v)}\right)^{-1} \cdot 64;$$

$$Re_{\text{п}} = 10\,\frac{0{,}835 \cdot \psi^{xx}}{1 - 2I_1\psi^{xx}},$$

где I_1 – функция Бесселя первого ряда, первого порядка; ψ^{xx} – напряжение вихревого вращения.

Наличие винтового характера движения подтверждается эффектом образования ядра в центре потока, слоевым характером расположения одинаковых значений концентрации твердой фазы по сечению потока совпадающих с линиями изотах, стабилизацией изменений значений критических скоростей, снижением частоты контактирования частиц твердого с внутренней поверхностью трубопроводов. Вышесказанное подтверждает то, что применение высоконасыщенных гидросмесей является одним из основных путей интенсификации процесса гидравлического транспортирования мелкофракционных сыпучих материалов.

Большое значение для интенсификации процесса транспортирования имеет также плотность несущей жидкости. Известно, что в этом случае играют большую роль микронные частицы, формирующие структуру потока, повышающие его транспортирующую способность. Кроме естественного возникновения этого явления, может быть применен искусственный метод введения в несущий поток различных химических и полимерных добавок.

Вторым направлением в обеспечении искусственной стабилизации процесса транспортирования является создание специальных устройств, стабилизирующих и интенсифицирующих транспортирующую способность несущего потока гидротранспортных систем. Одним из интересных направлений в этой области является разработка, в основу которой положено увеличение динамической энергии нижней части потока жидкости в напорном трубопроводе, что дает возможность увеличить дальность транспортирования, снизить критические скорости и соответственно энергетические затраты, а также обеспечить стабильность параметров за счет управления режимов движения потока. При этом скорость движения гидросмеси распределяется по сечению пульповода практически равномерно. Поэтому скорость транспортирования гидросмеси в пульсирующем потоке находится в зоне больших скоростей, чем обычно и может быть ниже среднего значения $v_{кр}$ по сечению потока. Средняя скорость при этом может иметь значения в 1,3–2 раза меньше. Снижаются также потери давления на трение, что создает возможность увеличивать дальность подачи гидросмеси при одинаковых, с обычными системами, насосах.

Превращение обычного потока гидросмеси в винтообразный может быть достигнуто применением механических направляемых устройств, монтируемых внутри трубы с расположением их друг от друга попеременно с разных сторон по длине трубы. Поток гидросмеси, двигаясь по пульповоду, в этом случае отражается от плоскости ребра, создает дополнительные вихри, что способствует закручиванию всего потока и придает ему винтообразный характер.

Опыт использования устройств этих типов показал, что они весьма эффективно перестраивают движение потока, превращая его в винтообразное и не мешают его движению в нижней части сечения трубы (так как междуспиральные зазоры заполняются материалом). Потери напора на спиральном участке возрастают на 15-17 %, а на участке движения потока между спиральными вставками (или лопастями), равными 50-80 мм, потери напора снижались на 20-22 %. Критическая скорость потока по сравнению с аналогичными установками без применения спирали снижалась на 35-50 %.

Большое влияние на стабилизацию режима течения потока гидросмеси в трубопроводе оказывает и поддержание постоянства живого сечения. Осуществление этого связано с исключением возможности образования тела зайления и зарастания труб, что представляет наибольшую опасность, так как не только нарушает режим движения потока гидросмеси, но в некоторых случаях может быть причиной выхода их из строя. Поэтому одной из важнейших проблем является обеспечение интенсификации процесса транспортирования гидросмеси, разработка средств профилактики и разрушения структурных образований на внутренней поверхности труб.

Выводы

Интенсификация процесса гидравлического транспортирования в значительной степени определяется стабилизацией параметров, характеризующих процесс транспортирования и достижение их устойчивости, основными из которых являются скорость движения потока и его концентрация.

При транспортировании тонкодисперсных и мелкофракционных гидросмесей с повышенным насыщением потока гидросмеси до критических значений возникает винтообразный характер движения, сопровождающийся стабилизацией значений критической скорости, параболическим характером эпюры распределения твердой фазы по вертикальному диаметру трубопровода и образованием ядра концентрации твердой фазы в центре сечения потока. Такой режим движения гидросмеси характеризуется снижением гидравлических сопротивлений, критических скоростей, достижением устойчивости потока, исключающим седиментацию твердой фазы и образование тела зайления.

Винтообразное движение потока может быть достигнуто за счет сопутствующих или искусственно вводимых химических примесей (ПАВ). При этом наибольший эффект достигается введением в поток гидросмеси линейных полимеров с большой молекулярной массой. Подобный характер движения потока гидросмеси может быть придан ему искусственно с помощью механических устройств спирального типа или лопатками, расположенными внутри трубопровода.

Большое значение для интенсификации процесса транспортирования имеет поддержание постоянства живого сечения трубопровода, исключение возможностей образования тела зайления и зарастания сечения пульповода.