Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXV, вып. 1, 1973 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГУЩЕНИЯ ГИДРОСМЕСЕЙ

Ю. П. Бойцов

Гидравлический транспорт сыпучих материалов находит все более широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. Многочисленные исследования, проводимые различными организациями, показывают, что эффективность гидротранспорта растет с увеличением консистенции. Однако во многих случаях по техническим и технологическим условиям невозможно получить потоки высокого насыщения или использовать сгустители гидросмесей, так как одни из них не могут обеспечить высокую концентрацию, другие по своим конструктивным особенностям (большие габаритные размеры, вес) не могут быть использованы в системе непрерывного транспорта. Поэтому создание и внедрение в производство новых типов сгустителей в настоящее время приобретает большое значение.

Ленинградским горным институтом сконструирован, изготовлен и испытан на гидрозакладочных комплексах шахт Ткибули, транспортирующих мелкофракционный песчаный материал ($d=1\div2$ *мм*), новый тип малогабаритного сгустителя. Испытания показали, что режим его работы характеризуется большим расходом слива $Q_{сл}$, высоким коэффициентом сгущения $K_{сг}$ и небольшим выносом твердого материала в слив.

Сгущение гидросмеси в сгустителе (см. рисунок) происходит следующим образом: исходная гидросмесь по трубопроводу *1* со средней скоростью v и плотностью ρ поступает в камеру сгущения *2*, где под действием гравитационных сил твердый материал распределяется в зависимости от крупности и плотности по высоте потока. Верхняя часть потока, менее насыщенная твердым, отводится в слив через направляющий аппарат *4* в отводной рукав *3*. В результате резкого изменения направления движения сливного потока возникают инерционные силы, осуществляющие дополнительное разделение твердой и жидкой фаз.

Уравнение неразрывности для всего потока в целом имеет вид

$$\int_{h} U_{сг}\,d\,h = \int_{Kh} U_{исх}\,d\,h - \int_{\delta'} U_{сл}\,d\,\delta', \qquad (1)$$

где h — высота потока; δ' — расстояние по нормали между секциями направляющего аппарата; K — параметр, характеризующий изменение сечения потока по длине; $U_{исх}$, $U_{сг}$, $U_{сл}$ — локальные скорости исходного, сгущенного и сливного потоков.

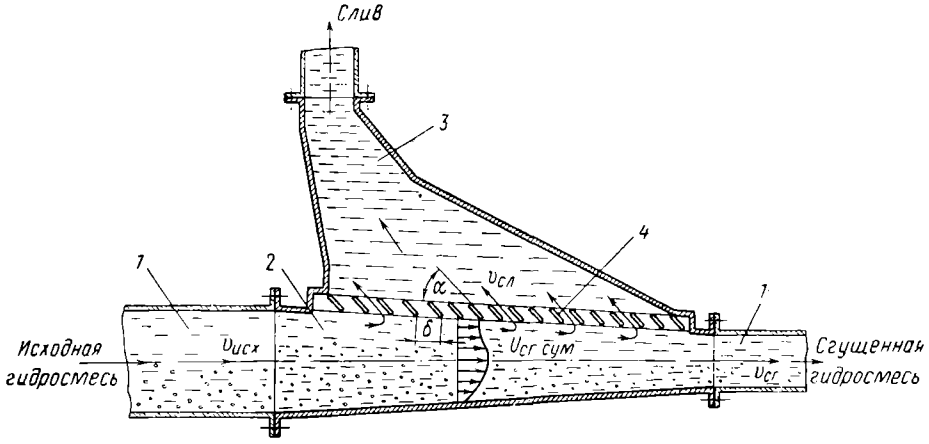


Схема инерционно-гравитационного сгустителя.

Горизонтальная составляющая скорости в камере сгущения

$$U_{сг} = \frac{1}{K} U_{исх} - \frac{n\delta}{h} U_{сл} \cos\alpha, \qquad (2)$$

где n — число секций, α — угол наклона секций.

При $n=0$ и $K=1$ $U_{сг} = U_{исх}$, что справедливо при движении гидросмеси с постоянным сечением при постоянном законе распределения скоростей. В действительности распределение скоростей в сгустителе изменяется и значительно отличается от распределения их в трубопроводе [1]. Особенностью первого распределения является то, что оно имеет два максимума: первый совпадает с динамической осью потока, второй — с границей раздела сгущаемого и сливного потоков:

$$U_{сг.сум} = U_{д} \quad U_{сг}\left(1 - \frac{v_{д}}{v_{сг}}\right),$$

где $U_{сг.\,сум}$ — действительная скорость сгущаемого потока в камере.

Скорость, передаваемая сгущаемому потоку сливным потоком на высоте от дна сгустителя [2]

$$U_{д} = \frac{v_{сл} r_0}{y(1-\eta)} e^{-\frac{(1-\eta)^2 y^2}{4\nu t}} \qquad (3)$$

где $\eta = y/h$ — относительная высота потока; ν — кинематическая вязкость; t — постоянная времени; r_0 — средний радиус закругления потока слива.

Таким образом, распределение горизонтальной составляющей скорости в сгустителе имеет вид

$$U_{сг.\,сум} = \frac{v_{сл} r_0}{y(1-\eta)} e^{-\frac{(1-\eta_i)^2 y^2}{4\nu t}} + \left(\frac{1}{K} U_{исх} - \frac{n\delta}{h} U_{сл} \cos\alpha\right)\left(1 - \frac{v_{д}}{v_{сг}}\right). \qquad (4)$$

Действительные скорости $U_{исх}$ и $U_{сл}$, входящие в уравнение (3), могут быть определены по одному из законов распределения, например по параболе Х. Базена.

Остальные величины можно найти из выражений

$$v_{сл} = \frac{Q_{сл}}{n\,\delta'\,b};\quad v_{исх} = \frac{Q_{исх}}{\pi D^2};\quad \delta' = \delta \sin\alpha;\quad v_д = \int_y U_д\, d\,y;$$

$$r_0 = 2K_r\,\delta \sin^2\frac{\alpha}{2},$$

где K_r — эмпирический коэффициент; b — ширина сгустителя; D — диаметр трубопровода.

Распределение скоростей оказывает большое влияние на распределение удельного веса и консистенции смеси по высоте потока. Консистенция в общем случае определяется зависимостью

$$S = S_c\, e^{-W\int_c^y \frac{dy}{\varepsilon}} \tag{5}$$

где S_c — консистенция на высоте c от дна потока; W — гидравлическая крупность; ε — коэффициент турбулентной диффузии.

На практике часто решают такое уравнение при условии $\varepsilon = \text{const}$, что в конечном итоге дает возможность приблизительно определить закон изменения консистенции смеси в трубопроводе. В случае параболического закона распределения скоростей

$$S = S_c\, e^{-\frac{Wh}{\varepsilon}\left(\eta - \frac{c}{h}\right)} \tag{6}$$

откуда удельный вес в сечении

$$\gamma_{ср} = \frac{1}{\eta}\int_\eta \left[(\gamma_т - \gamma_0)\, S_c\, e^{-\frac{Wr}{\varepsilon}\left(\eta - \frac{c}{h}\right)} + \gamma_0\right] d\,\eta. \tag{7}$$

Решение последнего интеграла дает распределение удельного веса гидросмеси по высоте потока

$$\gamma = \gamma_{ср}\left[\frac{\gamma_{max}}{\gamma_{ср}} - \left(1 - \frac{\gamma_0}{\gamma_{ср}}\right)\frac{W\,r}{\varepsilon}\,\eta\right] \tag{8}$$

В отличие от трубопровода в сгустителе из-за отвода слива изменяются содержание твердого в потоке и закон распределения консистенции в различных сечениях. Так, если при $Q_{сл} = 0$ действительная консистенция равна S, а расход элементарной струи по твердому $dQ_{тв} = SU_h\,bdh$, то при сгущении (при $\gamma_{сл} = 1$) расход по твердому в том же сечении

$$d\,Q_{тв} = b\,(S + d\,S)\,(U_h - U_{h\,сл})\,dh,$$

где $U_{hсл}$ — горизонтальная проекция скорости потока, вовлекаемого в слив.

Приравняв правые части двух последних выражений, после некоторых преобразований получим

$$S_{сг} = S_h \frac{U_h}{U_h - U_{h\,сл}}$$

где S_h — мгновенная концентрация на высоте h.

Последняя зависимость показывает, что с увеличением $U_{сл}$ концентрация S растет и что влияние потока слива на изменение действительной консистенции уменьшается у дна.

Средняя консистенция в сечении

$$S_{ср} = \frac{1}{h}\int_h S_h \frac{U_h}{U_h - U_{h\,сл}} d\,h. \tag{9}$$

Для выяснения характера изменения скорости и плотности гидросмеси вдоль оси камеры сгущения рассмотрим два сечения площадью ω и $\omega + d\omega$ на расстоянии одно от другого dx. Количество движения всего потока относительно оси сгустителя в единицу времени в первом сечении равно

$$\chi \frac{}{g} Q v,$$

во втором

$$\frac{1}{g}(\gamma + d\gamma)(\chi + d\chi)(Q + d\,Q)(v + d\,v),$$

где χ — функция, характеризующая связь между средними и действительными значениями скорости или плотности.

Количество движения отделяющегося потока слива относительно той же оси равно

$$\frac{1}{g}\gamma_{сл}\chi_{сл} d\,Q\, v_{сл}\cos\alpha.$$

Изменение количества движения выделенного объема за время dt равно

$$\frac{1}{g}[(\gamma + d\gamma)(\chi + d\chi)(Q + d\,Q)(v + d\,v) - \chi v Q\gamma + \gamma_{сл}\chi_{сл} v_{сл}\cos\alpha\, d\,Q]dt.$$

На выделенный объем действуют силы давления, тяжести и трения. Соответственно импульс сил давления равен

$$\left(p + \frac{dp}{2}\right) d\,\omega\, d\,t,$$

сил тяжести

$$-\left(\gamma + \frac{d\,\gamma}{2}\right)\left(\omega + \frac{d\,\omega}{2}\right) d\,z\, d\,t,$$

трения

$$i_f\left(\gamma + \frac{d\,\gamma}{2}\right)\left(\omega + \frac{d\,\omega}{2}\right) d\,x\, d\,t.$$

Приравняв количество движения сумме импульсов сил, получим уравнение движения в камере сгущения

$$\frac{\chi}{g} v\, d\,v + \frac{dp}{} + d\,z + i_f d\,x + \frac{v^2}{g} d\chi - \frac{\chi}{g} v^2 \frac{dQ}{Q} - \frac{\chi_{сл}}{g} \frac{}{} \gamma_{сл} v \frac{d\,Q}{Q} \vartheta$$

$$+ \frac{\chi}{g} v^2 \frac{d\,\gamma}{\gamma} = 0, \tag{10}$$

где $\vartheta = v_{сл}\cos\alpha$ — проекция скорости слива на ось потока.

Данное уравнение движения гидросмеси отличается от аналогичных уравнений для потока жидкости постоянного сечения и удельного веса [3] наличием членов, учитывающих влияние сечения потока и его удельного веса на величину энергии потока.

Рассмотрев три последних члена уравнения (10), можно заметить как увеличение, так и уменьшение сопротивления движению гидросмеси в камере сгущения в зависимости от параметров потока.

В уравнение (10) входит семь неизвестных, поэтому для замыкания системы необходимы дополнительные уравнения. Решение основного уравнения движения числовым методом совместно с решением уравнений неразрывности

$$\chi_1 (v\, d\, \omega + \omega\, d\, v) \qquad \chi_{сл}\, d\, Q$$

и баланса масс

$$\chi_2 (\gamma\, v\, d\, \omega + v\, \omega\, d\, \gamma + \gamma\, \omega\, d\, v) = \chi_{сл} d\, Q\, \gamma_{сл},$$

при рассмотрении упрощенной модели движения гидросмеси (например, при $dz/dx=0$, $di_f/dx=\text{const}$, $\chi = \chi_1 = \chi_2 = \chi_{сл} = \text{const}$) позволяет оценить характер воздействия потока слива на изменение скорости и плотности потока вдоль камеры сгущения.

Выводы

1. Движение гидросмеси в сгустителе отличается от движения в трубопроводе. В распределении скоростей по вертикали наблюдается наличие двух максимумов: один из них совпадает с динамической осью потока, другой — с границей раздела сгущаемого и сливного потоков.

2. Наиболее насыщена твердым нижняя и верхняя части сгустителя. Влияние потока слива на изменение действительной консистенции смеси уменьшается у дна сгустителя.

3. Общее уравнение движения гидросмеси в камере сгустителя позволяет оценить характер воздействия слива на структуру сгущаемого потока. Для упрощенной модели для конкретных условий такое уравнение можно решить числовым методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойцов Ю. П. Сгущение гидросмесей при транспортировании мелкофракционного материала. — В сб.: «Новые исследования в горной электромеханике». Л. 1969.
2. Великанов М. А. Динамика русловых потоков. ГИТТИ, 1954.
3. Петров Г. А. Динамика жидкости переменной массы. Харьков, 1964.