Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLI, вып. 1, 1959 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПИТАТЕЛЯ

В. Н. Покровская

При гидравлическом транспортировании мелкозернистых материалов для выдачи их на поверхность с глубин, превышающих 100 *м*, возникает необходимость подачи этих материалов шламовыми насосами в трубопровод шахтного водоотлива через специальный питатель. Такой питатель представляет собой полый цилиндр, включенный в сеть напорного става главного водоотлива. Специальные задвижки позволяют или отключить питатель от става в момент загрузки его материалом, или же направить в момент вымыва материала в цилиндр питателя создаваемую насосами главного водоотлива напорную струю. Таким способом размытый материал в виде пульпы слабой концентрации (Т : Ж до 1 : 20) по основному водоотливному ставу выдается на поверхность.

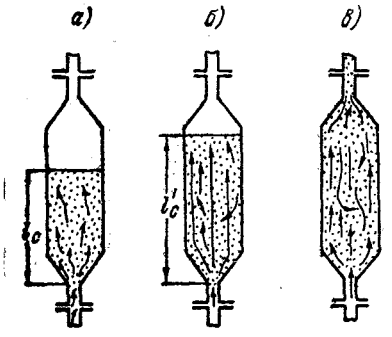


Рис. 1. Схема вымыва материала из вертикального питателя с отношением диаметра питателя $D_п$ к диаметру трубопровода $d_{тр}$ равным 3:
l_c — высота загруженного слоя; l_c' — высота расширенного (взвешенного слоя)

До настоящего времени работа таких питателей не исследовалась. В лаборатории рудничного транспорта Ленинградского горного института были выполнены такие экспериментальные исследования и полученные данные сопоставлены с теоретическими предположениями. Работа гидравлического питателя для подачи мелкозернистых материалов в напорный трубопровод изучалась экспериментально — сам процесс и теоретически — анализ процесса с точки зрения законов гидравлики, причем данный процесс рассматривался как частный случай гидравлического транспортирования.

Экспериментальные исследования велись в различных областях скоростного режима работы установки — от малых скоростей, ниже скорости свободного падения твердых компонентов в жидкости, до скоростей, во много раз ее превышающих. Было установлено, что весь процесс вымыва материала из питателя складывается из трех фаз (рис. 1). Начальной является фаза насыщения и фильтрации, когда поток жид-

кости протекает по порам загруженного материала, постепенно насыщая его и промывая себе русла (рис. 1, *а*). Вторая стадия — период перехода зерен материала во взвешенное состояние. Этот период начинается с того момента, когда величина скорости потока становится более определенной, называемой критической скоростью взвешивания для данного материала. Зерна материала начинают приходить в движение, высота (толщина) слоя увеличивается и происходит как бы «расширение» слоя (рис. 1, *б*). Значение критической скорости взвешивания зависит от плотности (удельного веса) материала, размеров и формы зерен и пористости. В этот период весь слой находится в состоянии динамического равновесия, отдельные же частицы материала совершают беспорядочное скачкообразное движение. С нарастанием давления отдельные ручейки сливаются, слой материала расплывается и начинается вынос зерен в общем потоке жидкости (рис. 1, *в*). Этот период

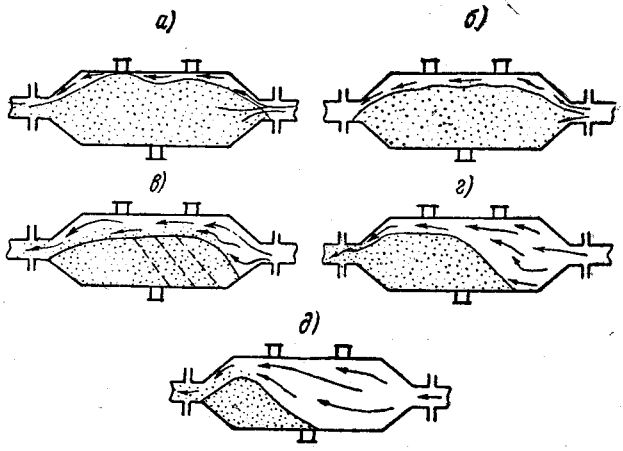


Рис. 2. Схема движения материала в горизонтально установленном цилиндре питателя

является третьей фазой процесса — фазой непосредственного вымыва материала.

Изменение скорости потока подаваемой в цилиндр питателя жидкости вносит изменение в общий характер процесса. Понижение скорости до величин, близких к скорости свободного осаждения, нарушает нормальный ход процесса и снижает его эффективность. В горизонтально установленном питателе, работающем вообще, как показали эксперименты, менее эффективно, понижение скорости вызывает переход к послоевому вымыву и передвижению материала по дну питателя. Фильтрация жидкости и насыщение ею материала в этом случае наблюдается лишь в начале процесса вымыва, который в основном происходит послойно при скачкообразном передвижении зерен материала по дну питателя и сопровождается образованием на дне песчаных волн. Подъем и перенос отдельных зерен материала, видимо, является следствием особенностей турбулентного режима движения потока.

Поток воды из напорного трубопровода поступает в верхнюю часть сечения цилиндра и промывает себе путь по линии наименее уплотненного материала (рис. 2, *а*). По мере вымыва материала сечение русла увеличивается, что приводит к снижению скорости потока (рис. 2, *б*). Эффективность вымыва снижается и начинается смыв материала слоями, наклоненными под углом 40—45° к направлению движения основ-

ного потока (рис. 2, *в*). Вынос материала сопровождается переносом его частиц в конец цилиндра, считая по пути движения потока. Эффективность действия снижается и в конечном итоге в цилиндре остаются несмытые «дюны» из твердых компонентов (рис. 2, *г*, *д*).

В вертикально установленном питателе понижение скорости движения потока сказывается в замедлении течения процесса и образовании несмываемого осадка. Увеличение скорости потока, наоборот, повышает эффективность процесса, но лишь до определенного предела скорости, названного нами критическим, после которого дальнейшее увеличение скорости вызывает нарастание вихревого движения. Последнее обусловливает беспорядочное движение зерен материала в цилиндре питателя, что приводит к увеличению трения между зернами и общего сопротивления движению, а следовательно, повышает расход энергии. Кроме того, при этом нарастает опасность гидравлических ударов, являющихся следствием возникающих в этом случае перепадов скорости, подъема, спрессованного в виде пробки материала и быстрого увеличения давления под слоем материала.

Значительное влияние на характер рабочего процесса в цилиндре питателя оказывает изменение физико-механических свойств загружаемого материала: плотности (удельного веса), крупности зерен, вязкости, пористости. Процесс транспортирования мелкозернистых материалов (песка с крупностью зерен от 0,5 до 5,0 *мм*) характеризуется повышенным вихреобразованием и скачкообразным движением, сглаживающимся по мере увеличения размеров зерен. Период фильтрации при мелкозернистом песке удлиняется, очевидно, вследствие меньшей пористости такого песка. Увеличение крупности зерен приводит к значительному увеличению времени вымыва материала из цилиндра питателя.

Добавление в песок глинистых компонентов (до 50%) вызывает повышение эффективности процесса вымыва — его ускорение, и уменьшение беспорядочного движения зерен. Очевидно, это вызывается образованием в течение первой фазы процесса глинистого раствора, в котором во взвешенном состоянии и находятся зерна песка, т. е. имеет место перемещение в тяжелой среде. По данным А. П. Юфина [1], при транспортировании глинисто-песчанистых смесей уменьшаются сопротивления трения и потери напора. Видимо, можно считать, что глинистый раствор играет роль смазки и уменьшает внутреннее трение между зернами песка. Кроме того, данный случай можно рассматривать, как перемещение песка в тяжелой среде, вносящей успокоение в движение потока и в то же время ускорение перехода потока в турбулентный режим движения. При загрузке в питатель угля с размером зерен в 4—5 раз превышающим размеры зерен крупнозернистого песка, вследствие меньшей (в 2 раза) плотности и большей пористости слоя, процесс происходит более эффективно. Ускоряется и происходит более равномерно вымыв, характеризующийся поступательным движением материала.

Помимо изучения работы питателя при пропуске через него полного расхода насосов главного водоотлива, исследовалась также параллельная работа питателя с напорным ставом главного водоотлива. Так как при этом вода, подаваемая насосом в единицу времени, разделялась на два потока, обратно пропорционально соотношению сопротивлений напорного става и линии ответвления, на которой смонтирован питатель, то в данном случае режим работы питателя соответствовал режиму работы на пониженной скорости со всеми его особенностями. Особенный интерес при этом представляет отсутствие опасности возникновения гидравлических ударов. Исследования параллельной работы питателя и става главного водоотлива позволило установить, что схему установки

можно значительно упростить. Для установления режима движения потока были определены значения чисел Рейнольдса для различных условий транспортирования и выявлены его критические значения для транспортируемых материалов. Характер зависимости между коэффициентом сопротивления в период турбулентной фильтрации и числом Рейнольдса, показанный на рис. 3, подтверждает правильность положения об обратно пропорциональной зависимости $\eta_з$ и $Re_з$ в период турбулентной фильтрации. Изменение характера кривых для всех исследованных материалов подчиняется общему закону, а граничные точки перехода на постоянную величину коэффициента сопротивления, независимую от числа Рейнольдса, соответствуют началу турбулентного режима движения потока.

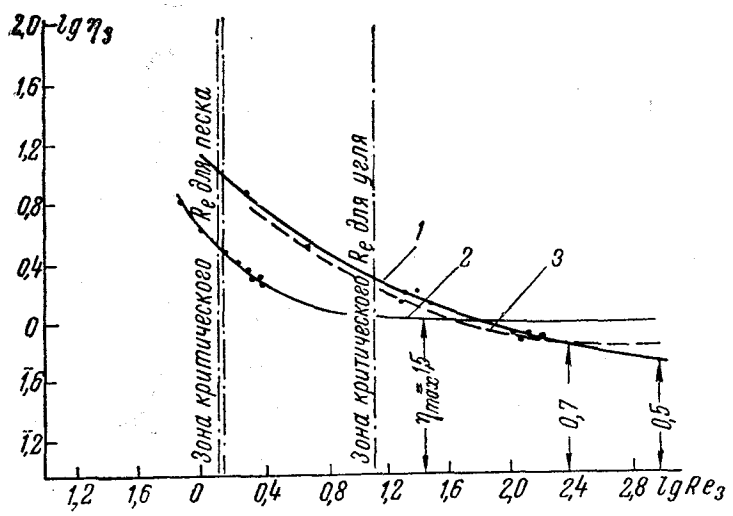


Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса:
1 — крупнозернистый песок; *2* — мелкозернистый песок; *3* — уголь

В процессе исследований установлено, что во всех случаях, за исключением параллельной работы питателя с напорным трубопроводом при транспортировании мелкозернистого песка, движение потока имеет турбулентный характер. В связи с этим дальнейший анализ и вывод зависимостей между гидравлическими параметрами производился для режима турбулентной фильтрации и турбулентного движения потока. Коэффициент сопротивления при напорной фильтрации стесненного материала резко увеличивается по сравнению с коэффициентом сопротивления, характеризующим режим свободного осаждения. Изменению величины сопротивления соответствуют условия неустановившегося режима работы. Следует отметить, что неустановившийся режим работы питателя является основным фактором, определяющим особенности течения всего процесса, что не дало возможности пользоваться для определения основных, характеризующих процесс параметров ранее выведенными зависимостями и потребовало тщательного анализа экспериментальных материалов.

Проведенная экспериментальная работа в полном соответствии с теоретическими предпосылками показала, что эффективность работы установки в первую очередь зависит от скорости движения воды в питателе, которая должна быть в несколько раз выше скорости свободного

осаждения материала данной крупности и должна обеспечивать турбулентный режим движения. Изменение этой скорости как в ту, так и в другую сторону в пределах, допустимых для данной установки, ведет к резкому изменению характера процесса. При определении скорости свободного осаждения в условиях турбулентного движения величина коэффициента сопротивления может быть принята постоянной. Это положение подтверждается существующей теорией, проведенными экспериментами (см. рис. 2) и сопоставлением с выводами других исследователей [2].

При малых скоростях движение потока является ламинарным и сопротивление движению зависит главным образом от силы вязкостного трения, учитываемого числом Рейнольдса. С увеличением скорости движения воды в питателе, когда характер движения становится явно турбулентным, преобладающее значение приобретают инерционные силы. Значение этого фактора увеличивается с увеличением крупности зерен. Основываясь на этих теоретических предпосылках и данных исследований осаждения мелкозернистых материалов в турбулентной среде, можно для расчета величины скорости осаждения рекомендовать следующие средние значения η для угля 0,7, для крупнозернистого песка 0,5 и для мелкозернистого песка 1,5.

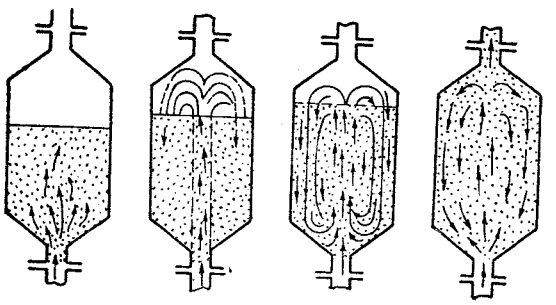


Рис. 4. Схема движения потока в вертикальном питателе при $\frac{D_п}{d_{тр}} = 5$

Как показали экспериментальные исследования, движение материала в питателе имеет место и при скоростях ниже расчетной свободной скорости осаждения θ для данного материала. Это объясняется тем, что передвижение материала в этом случае происходит или за счет других движущих сил (например, динамического воздействия струи), или за счет изменения фактической скорости движения вследствие уменьшения свободного сечения для прохода жидкости. Так, например, при работе питателя с горизонтальной установкой цилиндра в начале процесса вымыва сечение для прохода потока жидкости сужено, что и приводит к увеличению фактической скорости потока (см. рис. 4). При работе питателя с вертикальной установкой цилиндра в зоне пониженных скоростей движения потока вымыв материала происходит под действием динамической силы струи, фонтанирующей за счет перепада скоростей потока в трубопроводе при $d_{тр} = 75$ *мм* и в цилиндре питателя при $D_п = 400$ *мм*.

В ходе исследований выявился также критерий определения рациональной величины скорости движения жидкости в питателе. Таким критерием является характер движения потока. Нижней границей скорости движения потока следует считать ту скорость, ниже которой нарушается нормальный режим работы установки. Резко возрастает время вымыва, возникает неполный вымыв и т. д. Верхней границей является скорость, при которой проявляется резко выраженный турбулентный режим работы питателя, увеличивается сопротивление трения между зернами, возрастает потребление энергии, увеличивается опасность возникновения гидравлических ударов и закупорок цилиндра питателя. Скорость, определяющая переходную точку в режиме установки, является критической.

Величина критической скорости главным образом зависит от режима работы установки и физико-механических свойств материала.

Как установлено, рациональный режим работы гидравлического питателя может быть охарактеризован отношением

$$K = \frac{v_п}{\theta}, \qquad (1)$$

где $v_п$ — скорость движения потока.

Это отношение можно назвать коэффициентом эффективности работы гидравлического питателя. Значения этого коэффициента, определенные экспериментальным путем, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Питатель	Коэффициент эффективности для		
	угля	песка	
	$d_з$=18 *мм* $\gamma_м$=1400 *кг/м*³	$d_з$=5 *мм* $\gamma_м$=2650 *кг/м*³	$d_з$=7 *мм* $\gamma_м$=2650 *кг/м*³
С горизонтальным расположением цилиндра	5,5	5,5	12,1
С вертикальным расположением цилиндра	2,4	2,5	5,5

Примечание: $d_з$ — диаметр зерна; $\gamma_м$ — объемный вес материала.

На основании приведенных выше соображений критическая скорость движения потока жидкости

$$v_{кр} = 0{,}0224K\sqrt{\rho'\frac{d_{з_{ср}}}{\eta_з}}, \ см/сек^2; \qquad (2)$$

$$\rho' = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1},$$

где ρ_1 — плотность воды, *г/см*³;

ρ_2 — плотность материала, *г/см*³;

$d_{з_{ср}}$ — средний или эквивалентный диаметр зерен, *см*.

Необходимые для вымыва материала расход воды и габаритные размеры питателя выбираются в зависимости от расчетной величины критической скорости.

При определении эффективного режима работы установки и выбора длины рабочего цилиндра питателя большое значение имеет эффективная длина струи, которая, как предполагалось, находится главным образом в зависимости от скорости движения потока жидкости в цилиндре и от его диаметра. Специальными экспериментами выявлен ряд интересных взаимосвязей этих зависимостей. Как установлено, эффективная длина струи является основным фактором, определяющим оптимальную высоту слоя загрузки материала. Причем, кроме уже указанных выше зависимостей, она значительно изменяется от свойств загруженного в питатель материала. Основными из этих свойств являются размер зерен материала, его пористость, вязкость и плотность. Ввиду имеющихся различий процессов вымыва в вертикальном и горизонтальном

питателях, эффективная длина струи, при равных остальных условиях, имеет для того и другого питателей резко отличную величину. Как показывает анализ, между скоростью струи и ее эффективной длиной существует прямо пропорциональная зависимость, кроме того, наименьшая величина эффективной длины струи соответствует мелкозернистому песку, имеющему наименьшую пористость, несмотря на одинаковую с крупнозернистым песком плотность и меньшую крупность зерна. Уголь с наибольшей (среди использованных для экспериментов материалов) пористостью и наименьшей плотностью, несмотря на значительно большую крупность зерен, дает наибольшую величину эффективной длины струи.

Изучение характера данной зависимости показывает, что в основу определения длины эффективной струи необходимо положить зависимость, имеющую параболический характер до предельной точки, переходящей в асимптотическую закономерность. На основании данных предпосылок эффективная длина струи и, следовательно, цилиндра питателя может быть определена по формуле

$$l_{эф} = \frac{l_1 K^2 d_3 m}{a + K^2 d_3 m}, \ м, \qquad (3)$$

где l_1 — длина струи, соответствующая асимптотическому пределу, определяемому по рис. 5, *м*;

m — пористость;

$$m = \frac{V_п}{V_м} \ (V_п — \text{объем, занимаемый порами;}$$
$$V_м — \text{объем материала});$$

a — постоянный для каждого материала коэффициент.

Значения величин l_1 и a приведены в табл. 2.

Таблица 2

Материал	При вертикальной установке рабочего цилиндра		При горизонтальной установке рабочего цилиндра	
	l_1, *м*	a	l_1, *м*	a
Мелкозернистый песок $d_3 = 0{,}5 \div 0{,}7$ *мм*	1,2	0,003	0,9	0,009
Крупнозернистый песок $d_3 = 3 \div 5$ *мм*	1,3	0,004	0,8	0,03
Уголь $d_3 = 12 \div 15$ *мм*	1,3	0,014	0,9	0,06
Глинисто-песчаная смесь $d_3 = 3 \div 5$ *мм*	1,3	0,01	1,3	0,01

Особенностью течения процесса (при различных материалах и одной и той же скорости движения воды в цилиндре питателя), как отмечено выше, является изменение занимаемого материалом объема, что происходит при насыщении материала водой вследствие изменения его пористости. Если в начальный период процесса (рис. 6) пористость свеженасыпанного материала составляет 0,23—0,35, то в ходе процесса происходят значительные изменения, причем в конце фазы фильтрации пористость взвешенного слоя достигает 0,95—0,97. Взвешивание слоя материала в восходящем потоке жидкости соответствует достижению граничной скорости потока для данного материала (см. рис. 5).

Изменение пористости материала в цилиндре питателя имеет большое значение для определения времени течения процесса вымыва. Как показали наблюдения, это время складывается из трех фаз (в соответ-

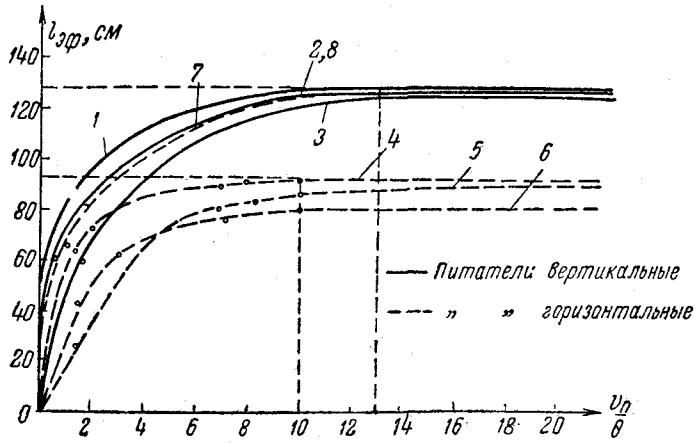


Рис. 5. $l_{эф} = f\left(\frac{v_п}{\theta}\right)$ для:

1, 7 — глинисто-песчаной смеси; *2, 6* — крупнозернистого песка; *3, 5* — мелкозернистого песка; *4, 8* — угля

ствии с пофазовым характером самого процесса): фильтрации, взвешивания зерен материала в потоке и вымыва.

Длительность первой фазы — фазы фильтрации $t_ф$ зависит главным образом от высоты (или длины) слоя материала в цилиндре питателя и скорости фильтрации. Последняя определяется пористостью материала, макрошероховатостью (т. е. формой и строением зерен, характером образования поровых протоков и т. д.) и особенностью фильтрационных свойств. Большое значение имеет также характер загрузки материала, его уплотненность и т. д. Длительность периода фильтрации может быть определена по формуле

$$t_ф = \frac{l_c}{v_ф}, \text{ сек}, \qquad (4)$$

где l_c — высота (или длина) слоя, *м*;

$v_ф$ — действительная скорость фильтрации, *м/сек*.

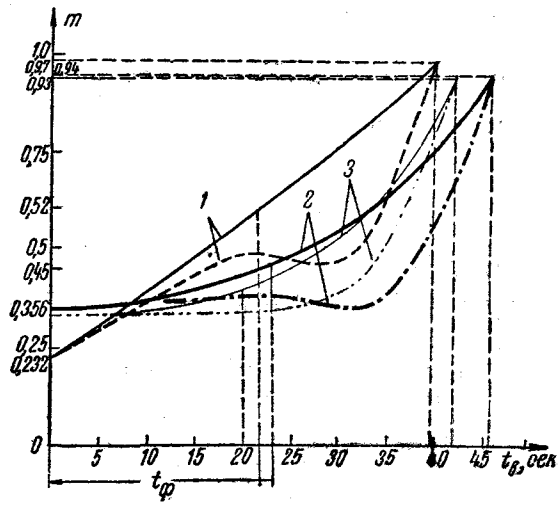


Рис. 6. Изменение величины пористости в течение процесса вымыва:

1 — мелкозернистый песок; *2* — крупнозернистый песок; *3* — уголь. Сплошные линии — нормальное течение процесса; пунктир — при сжатии расширенного слоя, когда имеет место сброс и нарастания величины пористости

Так как фильтрация производится через плотный слой материала по сухим (или слабо смоченным) поровым каналам, а кроме того, слой материала претерпевает некоторое дополнительное уплотнение, вследствие чего имеет место так называемая «стесненная»

фильтрация, то $v_ф$ оказывается в несколько раз ниже расчетной. Большое значение имеет образование застоев и скопление жидкости в слое загруженного материала. По даным Д. М. Минца [2], объем застойной жидкости при свободной фильтрации в плотных средах может составить 4,5% для песка и 7,4% для угля. По данным Л. С. Лейбензона [3] при ламинарном режиме относительный объем застойной жидкости составляет от 13 до 27%.

Существует ряд формул для определения действительной скорости фильтрации. Наименьшие отклонения от опытных данных дают значения скорости, определенные по формуле С. А. Избаша [4]. Положенная в основу этой формулы квадратичная зависимость между скоростью фильтрации, с одной стороны, и диаметром зерен материала и гидравлическим уклоном, с другой, лучше всего удовлетворяют определяемым параметрам и соответствуют характеру процесса. Таким образом, действительную скорость фильтрации целесообразно определять по формуле

$$v_ф = C_ф \sqrt{d_э I}, \ см/сек, \tag{5}$$

где I — гидравлический уклон;

$C_ф$ — коэффициент пропорциональности для условий турбулентного режима напорной фильтрации, зависящий от физико-механических ствойств транспортируемых материалов.

Анализ экспериментальных материалов показывает, что предложенная формула дает достаточно точные результаты при определении скорости фильтрации через слой загруженного в цилиндр питателя материала, если коэффициент пропорциональности при транспортировании песка и шламов с крупностью зерен до 5 *мм* берется равным 7,5, а при транспортировании угля крупностью до 12 *мм* — равным 3.

Значение $t_ф$, определенное по усредненным показателям опытов и подтвержденное покадровым изучением кинопленки, составляет 45—50% от общей длительности процесса.

Длительность второй фазы — процесса перехода зерен материала во взвешенное состояние

$$t_{взв} = \frac{l_c'}{v_ф \frac{m'}{m}}, \ сек, \tag{6}$$

где l_c' — высота расширенного слоя насыщенного материала, *м*;

$\frac{m'}{m}$ — отношение пористости загруженного материала к пористости взвешенного слоя.

Степень расширения слоя материала при переходе его зерен во взвешенное состояние

$$e = \frac{l_c' - l_c}{l_c}. \tag{7}$$

Между величиной относительного расширения слоя и его пористостью существует зависимость

$$e + 1 = \frac{1 - m}{1 - m'}. \tag{8}$$

Свободное расширение материала происходит в то время, когда цилиндр не заполнен. Заполнение цилиндра сопровождается сжатием расширенного слоя материала, что может вызвать образование пробки. Расширение слоя по экспериментальным данным составляет 0,16 для

крупнозернистого песка, 1,03 для мелкозернистого и 0.08 для угля. При сжатии слоя коэффициент пористости уменьшается до 0,35—0,4.

Найденная опытами продолжительность этой фазы $t_{вз}$ составляет 25—30% от длительности процесса.

Длительность третьей фазы — процесса чистого вымыва

$$t_в = \frac{l_п}{v_п}, \; сек, \tag{9}$$

где $l_п$ — полная длина цилиндра питателя, $м$.

Третья фаза характеризуется турбулентным движением потока, возникновением завихрений и беспорядочным движением отдельных зерен. Обычно $t_в$ составляет 20—30% от общей продолжительности процесса.

Данные расчетов, проведенных по рекомендуемым для определения времени вымыва формулам, достаточно точно совпали с экспериментальными данными. Величина относительной погрешности 3,6 ÷ 2%.

Необходимо иметь в виду, что деление процесса на фазы находится в зависимости от скорости движения потока в цилиндре питателя. С увеличением скорости длительность первой фазы процесса резко сокращается, грани между фазами стираются, происходит совмещение во времени смежных фаз, которое затем переходит в совместное течение. В этом случае фильтрация сопровождается переходом части зерен во взвешенное состояние, вымыв материала начинается еще до окончания процесса фильтрации. Рациональный режим работы, соответствующий критической скорости, характеризуется быстрым течением процесса с сокращением ясно чередующихся фаз.

Выводы

Основным параметром, определяющим характер течения всего рабочего процесса гидравлического питателя, является критическая скорость движения потока жидкости в цилиндре питателя.

Нарушение установленной закономерности в определении критической скорости потока приводит к резкому нарушению течения процесса, снижает его эффективность.

При создании промышленной установки гидравлического питателя весь комплекс вопросов должен рассматриваться из условия обеспечения требуемой величины критической скорости, обусловленной физико-механическими свойствами транспортируемого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юфин А. П. Напорный гидротранспорт. Госэнергоиздат, 1950.
2. Минц Д. М., Шуберт С. А. Гидравлика зернистых материалов. Изд. МКХ РСФСР, 1955.
3. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде, Гостехиздат, 1947.
4. Избаш С. В. О фильтрации в крупнозернистом материале. Изв. НИИГа, 1931, т. I.