

Беседин П.В., д-р техн. наук, проф.,
Андрущак С.В., аспирант,
Козлов В.К., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО ШЛАМА В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

pvbesedin@yandex.ru

В настоящее время важным направлением исследований является разработка методов энерго-сбережения для цементной промышленности. Методы интенсификации транспортировки шлама на основе механического и механохимических воздействий эффективно влияют на увеличение подвижности и улучшение реологических свойств цементных шламов. Представленная в работе методика исследования состоит в изучении воздействия вибрации на модельные образцы шламов нескольких цементных заводов, а также обработке полученных экспериментальных данных и построении аналитических моделей. Полученные результаты исследований при частотах вибрации от 0 до 50 Гц показали, что зависимость подвижности шламовых суспензий имеет экстремальный характер с пиком в области 25 Гц, а увеличение амплитуды колебаний смещает экстремум в область более низких частот. Рассчитанные модели можно использовать для проектирования системы управления транспортировкой шлама.

Ключевые слова: интенсификация обжига клинкера, цементный шлам, влажность шлама, вибрация, аппроксимация данных.

Введение. Цементные сырьевые шламы относятся к классу так называемых неньютоновских структурно-вязкопластических жидкостей, вязкость которых зависит от режима течения. Свойства неньютоновских жидкостей изучает реология – наука о деформациях и текучести вещества, которая рассматривает процессы, связанные с необратимыми остаточными деформациями и течением разнообразных вязких и пластических материалов и дисперсных систем [1].

Считается, что в цементном сырьевом шламе каждая частица карбонатных пород или кварца окружена глинистой коллоидной пленкой. Размеры пленки колеблются в диапазоне от нескольких молекулярных слоев до одного микрометра. Глинистый компонент определяет способность к катионному обмену, что обуславливает разжижаемость шламов. При таком обмене разрушается коагуляционная структура, происходит уменьшение внутреннего трения, текучесть сырьевого шлама увеличивается [2].

Снижение влажности шлама является важным резервом повышения производительности вращающихся печей и снижения расхода топлива. Известно, что каждый процент снижения влажности сырьевого шлама позволяет повысить производительность вращающейся печи на 1-1,5% и примерно настолько же снизить расход топлива [3].

Существует множество различных факторов, влияющих на подвижность и структурно-механические свойства шламов. Основными из них являются [4]:

- виброобработка в диапазоне частот от 10 до 35 Гц, которая позволяет снизить влажность транспортируемых шламов на 5...9 %;
- ультразвуковая обработка в диапазоне частот от 30 до 1000 КГц, разрушающая агрегативные образования и разжижающая шлам;
- механическое перемешивание, разрушающая структуру шлама и увеличивающая текучесть.

Проблеме снижения вязкости сырьевых цементных шламов посвящено много исследовательских работ, однако отсутствуют критерии, позволяющие выбрать наиболее оптимальный метод снижения влажности. Недостаточны знания о механизме действия разжижающих веществ. Часто разжижители подбираются эмпирически для каждого конкретного случая. В результате этого десятки заводов России и стран СНГ вынуждены использовать шлам с высокой влажностью. Многие цементные заводы используют пластификаторы, но тип разжижителя и его дозировка в большинстве случаев не обоснованы [5,6]. Утверждается, что из-за высокой влажности шлама в печь подается от 8 до 10 т/ч лишней воды, что в свою очередь требует дополнительно 5...7% топлива на обжиг клинкера.

Методология. Для изучения воздействия вибрации на реологические свойства шламов была разработана вибраторная установка. Устройство вибратора позволило производить замену вибрирующих органов, характеризующихся различным насосным эффектом. В составе установки эксплуатировались вибрирующие органы следующих типов:

1. спиралеобразный;
2. с вертикальным насосным эффектом (пластина с отверстиями);
3. с горизонтальным насосным эффектом (пластина без отверстий).

На приборе исследовались вязкопластические свойства шламовых суспензий, которые в последующем подвергались виброобработке. Вязкопластические свойства оценивались по скорости истечения суспензий через капилляры различного сечения. Замена вибрирующих органов позволила определить влияние конструк-

тивных особенностей вибраторов на скорость истечения суспензий, и, следовательно, на изменение их реологических свойств.

На виброустановке изучались бездобавочные шламы различных заводов (табл. 1) с титрами $76 \pm 1,5\%$ и растекаемостью 52, 56, 60 мм. Основным регулируемым параметром являлась частота вибрации в диапазоне от 0 до 50 Гц. Влажность шламов изменялась от 37,1 до 50,2 %. На выходе емкости, в которую помещался испытуемый шлам, устанавливались два вида капилляров диаметром 13 мм и 15 мм.

Таблица 1

Регулируемые параметры реологических свойств шламов

Регулируемый параметр шлама	Номер наблюдения					
	1	2	3	4	5	6
Влажность шлама, %:						
– Балаклейского завода;	37,1	37,1	38,1	38,1	41,6	41,6
– Амвросиевского завода;	46	46	47,8	47,8	50,2	50,2
– Каменец-Подольского завода;	34,1	34,1	35,8	35,8	37	37
– Николаевского завода;	38,1	38,1	39,7	39,7	42,2	42,2
Растекаемость по конусу, мм	52	52	56	56	60	60
Диаметр капилляра, мм	13	15	13	15	13	15

Важной характеристикой периодического движения является амплитуда, поэтому было целесообразно проанализировать зависимость подвижности шлама от амплитуды колебаний рабочего органа [7,8]. Для данного опыта был взят шлам Балаклейского цементного завода, при этом амплитуда колебаний имела значения от 2, 3 и 4 мм.

Естественным продолжением исследований явилось изучение влияния комплексного механохимического воздействия на структурно-механические свойства шлама. С этой целью в исследуемые шлам Каменец-Подольского цементного завода вводились химические реагенты, часто применяемые в технологии цемента, такие как лигносульфонаты (ЛСТ) и углещелочной реагент (УЩР). Причем, во всей серии исследований вводилось одинаковое количество реагента – 0,25 масс. % ЛСТ и 0,1 мас. % УЩР. Затем приготовленные образцы шлама подвергались виброобработке.

Для того, чтобы охарактеризовать степень влияния вибрирующего воздействия на подвижность шлама, введем понятие – коэффициент увеличения подвижности $k_{y.n.}$. Данная величина показывает, насколько изменяется текучесть сырьевой смеси под воздействием вибрации по сравнению с состоянием без вибрации:

$$k_{y.n.}(\omega) = \frac{v(\omega)}{v(0)},$$

где $v(0)$ – объемный расход шлама без вибрационного воздействия.

Результаты измерений и их подробный анализ будут рассмотрены далее.

Основная часть. Первым этапом исследований целесообразно определить различия во влиянии вибрирующих органов трех типов на шлам. Эксперименты были выполнены на шламе Балаклейского цементного завода.

Для анализа данных, полученных в ходе выполнения опытов, аппроксимируем полиномом зависимость объемного расхода сырьевого шлама от частоты вибрации с рабочим органом 1. Выберем 4 порядок аппроксимирующего полинома, так как в ходе обработки данных было выявлено, что он наиболее точно описывает экспериментальную зависимость [9]:

$$v(\omega) = a_4 \omega^4 + a_3 \omega^3 + a_2 \omega^2 + a_1 \omega + a_0, \quad (1)$$

где ω – частота вибрации, Гц; a – коэффициенты аппроксимирующего полинома; v – объемный расход шлама, л/мин.

В таблице 2 приведены коэффициенты полученных полиномов для рабочего органа первого типа.

На рисунке 1 представлены графики полученных полиномов, а также исходные данные эксперимента, выделенные круглыми точками.

Рассчитаем экстремальные значения коэффициента увеличения подвижности (табл. 3) на основе полученных ранее аппроксимирующих полиномов (табл. 2). Для этого необходимо определить максимальное значение объемного расхода для каждого полинома, а также значение частоты вибрации, при которой достигается такой расход.

Таблица 2

Коэффициенты аппроксимирующих полиномов

Номер кривой	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
1	-0,0000002	0,0000256	-0,0015429	0,0362933	0,0363503
2	0,0000001	-0,0000105	-0,0000893	0,0165721	0,2053385
3	-0,0000003	0,0000530	-0,0036631	0,0882216	0,2393383
4	-0,0000003	0,0000514	-0,0036931	0,0963513	0,4262834
5	-0,0000004	0,0000632	-0,0041068	0,1061051	0,5988373
6	-0,0000004	0,0000658	-0,0043459	0,1144684	0,9187435

В таблице 3 использованы следующие сокращения: d – диаметр капилляра, R – растекаемость, w – влажность, v_0 – объемный расход без

вибрации, ω_{extr} – частота вибрации в точке экстремума, v_{extr} – объемный расход в точке экстремума.

Таблица 3

Экстремальные значения коэффициента увеличения подвижности

Тип рабочего органа	№ опыта	d , мм	R , мм	w , %	v_0 , л/мин	ω_{extr} , Гц	v_{extr} , л/мин	$k_{y.p.}$
1	1	13	52	37,1	0,036	19,716	0,322	8,863
	2	15			0,205	24,531	0,444	2,165
	3	13	56	38,1	0,239	18,588	0,922	3,850
	4	15			0,426	20,384	1,241	2,911
	5	13	60	41,6	0,599	21,978	1,524	2,545
	6	15			0,919	22,356	1,936	2,107
2	7	13	52	37,1	0,045	20,348	0,312	6,891
	8	15			0,118	21,342	0,596	5,034
	9	13	56	38,1	0,178	25,516	0,901	5,047
	10	15			0,228	22,869	1,236	5,428
	11	13	60	41,6	0,515	21,954	1,656	3,214
	12	15			0,667	22,607	1,898	2,846
3	13	13	52	37,1	0,05	21,89	0,57	12,48
	14	15			0,15	23,60	0,71	4,85
	15	13	56	38,1	0,21	23,39	1,47	7,12
	16	15			0,31	23,19	1,67	5,36
	17	13	60	41,6	0,53	20,64	2,00	3,80
	18	15			0,78	21,43	2,25	2,90

По рассчитанным значениям коэффициента усиления подвижности было замечено, что спиралеобразный рабочий виброорган (тип 1) увеличивал текучесть шлама в 3...9 раз, виброорган с вертикальным насосным эффектом (тип 2) увеличивал текучесть шлама в 2...6 раз, а виброорган с горизонтальным наносным эффектом (тип 3) позволял увеличить текучесть шлама в 2...12 раз. Причем наибольший пластифицирующий эффект проявляется у шламовых суспензий, имеющих более низкую влажность, при этом точка экстремума объемного расхода шлама через капилляр явно выражена при частотах вибрации всех типов органов в пределах от 18 до 25 Гц.

Согласно полученным результатам можно сделать следующие выводы об эффективности применения вибрационного воздействия:

- наиболее влияние получают шламы низкой влажности;

- максимальное разрушающее воздействие на структуру шлама и его текучесть достигается при помощи рабочего органа третьего типа;

- зависимость скорости истечения шлама от частоты вибрации носит экстремальный характер, поэтому для автоматического поиска и поддержания оптимальной частоты вибрации целесообразно применить экстремальный регулятор;

- экстремальные значения частот для шламов различной влажности лежат в диапазоне от 20 до 25 Гц;

- изменение диаметра капилляра не оказывает существенного воздействия.

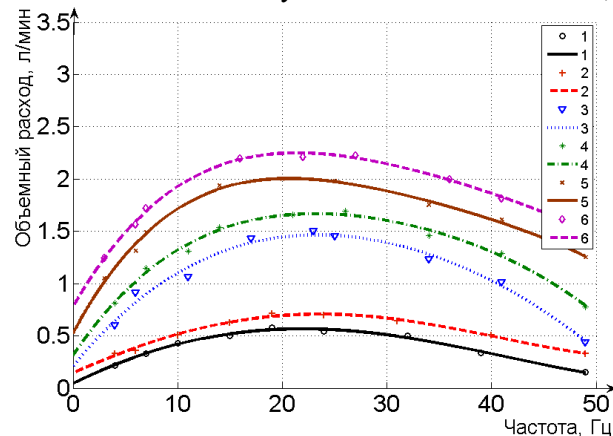
Вдобавок, стоит отметить, что положение виброоргана по отношению к капиллярам также играет важную роль. Установлено, что дальность распространения волны в шламе составляет 2,6...3,1 диаметра рабочего органа вибратора, причем волна колебаний затухает на расстоянии 1,8 диаметра рабочего органа вибратора. Из этого следует, что оптимальное расстояние монта-

жа виброоргана от выходного отверстия должно быть менее одного диаметра его рабочего органа. Тиксотропные свойства структуры шлама после вибровоздействия восстанавливаются через 25...30 секунд.

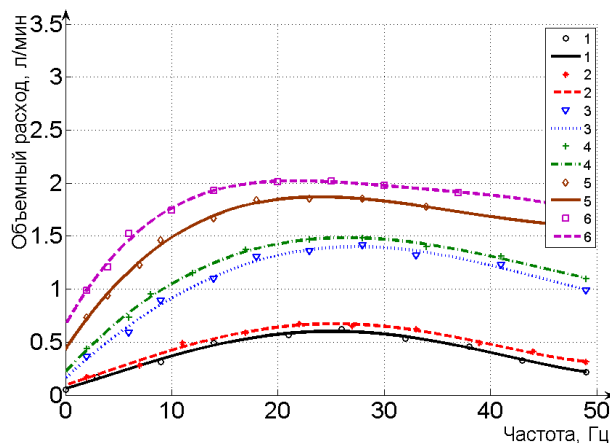
Далее сравним влияние вибрации на реологические свойства суспензий Балаклейского,

Амвросиевского, Каменец-Подольского и Николаевского цементных заводов с рабочим органом 3 типа.

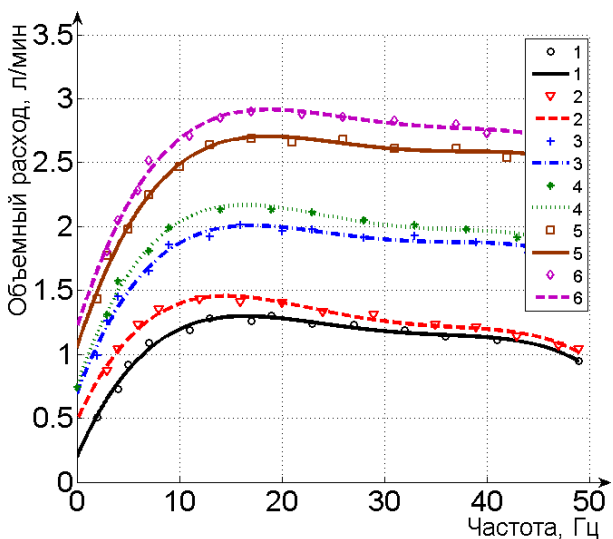
Рассчитаем экстремальные значения коэффициента увеличения подвижности для шламов каждого завода (табл. 4).



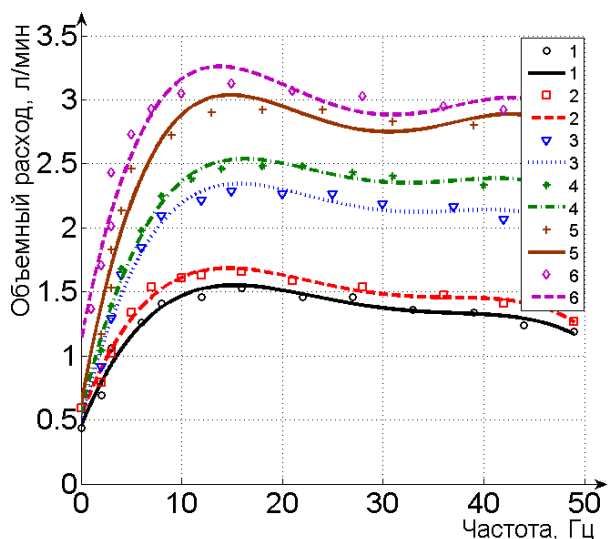
Балаклейский завод



Амвросиевский завод



Каменец-Подольский завод



Николаевский завод

Рис. 1. Зависимости объемного расхода шлама от частоты вибрации на шламы различных заводов

На рисунке 2 изображены зависимости экстремального коэффициента увеличения подвижности от растекаемости для шлама каждого завода. Для этих графиков константой является диаметр капилляра $d=13$ мм. По данному рисунку можно утверждать, что наиболее эффективно применение вибрирующего воздействия при работе с менее пластичными сырьевыми компонентами Балаклейского и Амвросиевского цементных заводов.

Сопоставляя зависимости объемного расхода шламов от частоты вибрации, а также проанализировав полученные графики и данные можно утверждать, что:

- точки экстремума Каменец-Подольского и Николаевского цементных заводов смещены в область низких частот, по сравнению с Балаклейским и Амвросиевским заводами;

- шламовые суспензии Каменец-Подольского и Николаевского заводов имеют более монотонный спад после точки экстремума, при этом точки экстремума четко выражены у шламов Балаклейского и Амвросиевского заводов.

Проанализируем влияние амплитуды колебаний рабочего органа на сырьевой шлам Балаклейского цементного завода с растекаемостью 56 и 60 мм с рабочим органом типа 3.

Определив коэффициенты аппроксимирующего полинома, построим зависимости объемного расхода сырьевого шлама от частоты и ам-

плитуды вибрации (исходные данные выделены круглыми точками).

Таблица 4

Экстремальные значения коэффициента увеличения подвижности

Завод	№ опыта	d, мм	R, мм	w, %	v_0 , л/мин	ω_{extr} , Гц	v_{extr} , л/мин	$k_{y.p.}$
Балаклейский	1	13	52	37,1	0,05	21,89	0,57	12,48
	2	15			0,15	23,60	0,71	4,85
	3	13	56	38,1	0,21	23,39	1,47	7,12
	4	15			0,31	23,19	1,67	5,36
	5	13	60	41,6	0,53	20,64	2,00	3,80
	6	15			0,78	21,43	2,25	2,90
Амвросиевский	1	13	52	46	0,06	25,09	0,60	10,33
	2	15			0,09	25,29	0,67	7,27
	3	13	56	47,8	0,16	27,47	1,40	8,75
	4	15			0,22	26,51	1,48	6,86
	5	13	60	50,2	0,43	23,96	1,87	4,34
	6	15			0,66	21,66	2,02	3,06
Каменец-Подольский	1	13	52	34,1	0,20	16,43	1,30	6,43
	2	15			0,48	14,58	1,46	3,00
	3	13	56	35,8	0,70	17,08	2,01	2,87
	4	15			0,76	16,48	2,17	2,85
	5	13	60	37,0	1,05	18,64	2,70	2,57
	6	15			1,20	18,71	2,91	2,43
Николаевский	1	13	52	34,1	0,46	15,25	1,55	3,39
	2	15			0,54	14,64	1,68	3,13
	3	13	56	35,8	0,49	15,77	2,34	4,79
	4	15			0,54	16,23	2,54	4,68
	5	13	60	37,0	0,62	14,85	3,04	4,90
	6	15			1,12	13,78	3,26	2,92

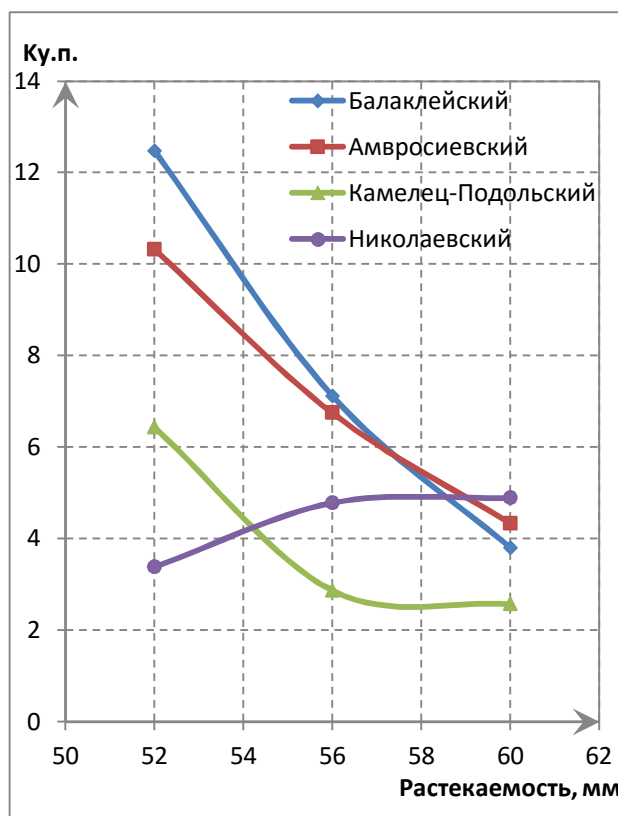


Рис. 2. Зависимости экстремального коэффициента увеличения подвижности от растекаемости для шлама каждого завода

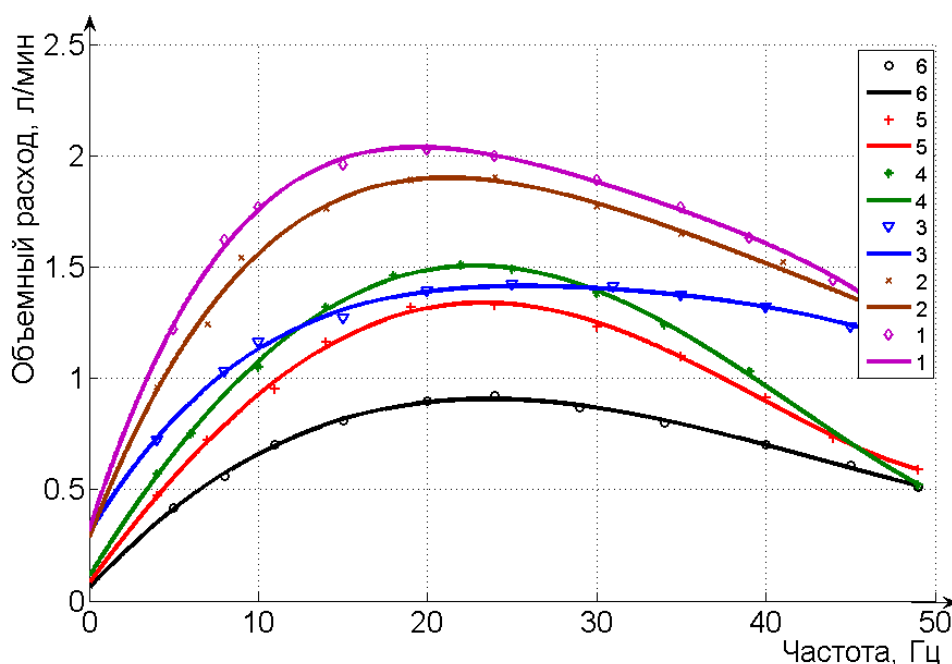


Рис. 3. Зависимости объемного расхода шлама от частоты вибрации на шламы при различной амплитуде колебаний

В таблице 5 представлены рассчитанные экстремальные значения коэффициента увеличения подвижности.

Таблица 5

Экстремальные значения коэффициента увеличения подвижности

№ опыта	Амплитуда, мм	Растекаемость, мм	v_0 , л/мин	ω_{extr} , Гц	v_{extr} , л/мин	$k_{у.п.}$
1	4	60	0,32	19,44	2,04	6,42
2	3		0,29	21,19	1,90	6,62
3	2		0,30	25,72	1,41	4,68
4	4	56	0,11	22,83	1,51	13,93
5	3		0,08	23,31	1,34	16,91
6	2		0,06	23,60	0,91	15,89

Анализируя полученные данные, видно, что при повышении амплитуды колебаний снижаются экстремальные значения частот, так, для шлама с растекаемостью 60 мм при амплитуде 4 мм экстремальная частота составляет 19,44 Гц, а при 2 мм – 25,72 Гц. Наибольший объемный расход шлама достигается при наибольших значениях амплитуды колебаний, причем, для густых шламов влияние амплитуды более существенно. При повышении частоты вибровоздействия выше оптимальной наблюдается уменьшение эффективности амплитуды колебаний, при этом, чем больше амплитуда, тем больше относительное уменьшение объемного расхода сырьевого шлама, что, по всей видимости связано с интенсивным передвижением частиц шлама в поперечном направлении относительно основного потока. Таким образом, амплитуда колебаний рабочего органа вибратора оказывает заметное влияние на подвижность сырьевых шламов, причем увеличение амплитуды позволяет усилить эффект при низких частотах вибрации.

Рассмотрим влияние комплексного механохимического воздействия на сырьевой шлам Каменец-Подольского цементного завода растекаемостью 52, 56 и 58 мм. В качестве химических добавок использовались лигносульфонат и углещелочной реагент. Во всей серии исследований вводилось одинаковое количество реагента – 0,25 мас. % ЛСТ и 0,1 мас. % УЩР. Приготовленные образцы шлама подвергались виброобработке рабочим органом типа 3.

Проанализировав полученные данные можно сделать вывод, что комплексное воздействие наиболее эффективно для суспензий с пониженной влажностью (растекаемость 56 мм и менее). При этом применение механохимического воздействия смещает точки экстремума объемного расхода в область более высоких частот (на 2-5 Гц).

Проведенные исследования показывают, что применение механохимических методов обработки эффективно для шламов пониженной влажности.

Таблица 6

Экстремальные значения коэффициента увеличения подвижности

№ опыта	Растекаемость, мм	Тип реагента	v_0 , л/мин	ω_{extr} , Гц	v_{extr} , л/мин	$k_{y.t.}$
1	58	ЛСТ	0,59	24,04	2,62	4,44
2		Нет	0,65	20,65	2,80	4,32
3		УЩР	0,72	19,21	2,91	4,06
4	56	ЛСТ	0,32	16,62	1,97	6,08
5		Нет	0,35	15,66	2,11	6,02
6		УЩР	0,45	15,25	2,19	4,87
7	52	ЛСТ	0,15	17,95	1,20	7,72
8		Нет	0,23	17,81	1,25	5,48
9		УЩР	0,35	17,46	1,31	3,70

Выводы. В работе рассмотрены механический и механохимический методы регулирования реологических свойств шлама. Установлено, что зависимость объемного расхода шламовых суспензий при частотах вибрации от 0 до 50 Гц имеет экстремальный характер. Амплитуда колебаний смещает экстремум влияния частоты вибрации в сторону более низких частот. Результаты исследований и полученные аналитические зависимости можно применить для проектирования эффективной системы управления транспортировкой шлама.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беседин П.В., Трубаев П.А. Энерготехнологический анализ процессов в технологии цементного клинкера. Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, БИЭИ, 2005. 460с.
2. Пономарев И. Ф. Эффективные способы снижения влажности сырьевого шлама // Цемент. 1974. № 2. С. 9.
3. Беседин П.В., Трубаев П.А., Панова О.А., Гришко Б.М. Некоторые направления энергосбережения в технологии цемента // Цемент и его применение. 2011. № 2. С. 130-134.
4. Богомолов Б.Н. Интенсификация процесса обжига путем предварительной виброобработки сырьевых шламов // Цемент. 1973. №7. С. 9.
5. Трубаев П. А., Беседин П. В. Интенсификация процесса обжига цементного клинкера при использовании техногенных материалов // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. 2005. № 10. С. 60-61.
6. Панасенко А.И., Везенцев А.И., Мосьпан В.И., Беседин П.В. Модификация глин Балаклеевского цементно-шиферного комбината с целью снижения влажности шлама // Цемент. 1993. №5/6. С.64-66.
7. Ткачев В.В. Снижение влажности шлама путем разрушения его коагуляционной структуры // Цемент. 1974. № 5. С. 12-13.
8. Трубаев П.А., Беседин П.В. Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. 2005. № 10. С. 60-61.
9. Кривилев А. Основы компьютерной математики с использованием системы MATLAB. Лекс-Книга, 2005.

Besedin P.V., Andruschak S.V., Kozlov V.K.

RESEARCH AND SIMULATION OF THE MOTION CEMENT SLURRY UNDER LABORATORY CONDITIONS

Currently, an important area of research is the development of energy-saving techniques for the cement industry. Intensification methods of transportation of sludge on the basis of mechanical and mechanochemical action effectively influence the increase in mobility and improve the rheological properties of cement slurries. Presented in the methodology of the research is to study the effects of vibration on model samples of sludge several cement plants, as well as the processing of the experimental data and the construction of analytical models. The results obtained with the vibration frequency from 0 to 50 Hz showed that the dependence of the mobility of sludge suspensions has an extreme character with a peak in the region of 25 Hz, and the increase in the oscillation amplitude shifts extreme at lower frequencies. The calculated model can be used to design the control system transporting sludge.

Key words: intensification of clinker, cement slurry, sludge humidity, vibration, approximation of data.