Таким чином, отримані результати по кінетиці мінералоутворення при випалі сумішей, які розраховані на отримання портландцементного клінкеру заданого мінералогічного складу, з різною дисперсністю (8 – 20 мас. %), а також їх комплексний термічний аналіз підтверджують недоцільність розмелу вихідних матеріалів до високої питомої поверхні і низького значення величини залишку на ситі № 008. Дисперсність сировинної суміші, яка рекомендується для впровадження, може складати 15 – 16мас. % залишку на контрольному ситі, що дозволить збільшити продуктивність помольної установки на 12 – 16 %.

Список літератури: **1**. *Сычев М.М.* Технологические свойства сырьевых цементных шихт. – М.: Госстройиздат, 1962. – 136 с. **2.** *Сычев М.М., Астахова М.А.* Влияние тонкости известнякового компонента на спекание цементных шихт // Цемент. – 1962. – № 3. – С. 12 – 14. **3.** *Захарова Л.В., Кулик В.А., Салей А.А, Шевченко А.Ф., Сигунов А.А., Алексеева Н.С.* Влияние природы материалов на их размалываемость и формирование дисперсности продуктов помола // Вестник национального технического университета “ХПИ”. – 2005. – № 23 – С. 78 – 89. **4.** Оптимизация составов закладочных смесей. Часть 1. Анализ химико-минералогического состава и физико-технических показателей шлаков Донецко-Приднепровского региона / *Кулик В.А., Салей А.А., Кравченко Т.В., Сигунов А.А, Стрельченко И.С.* // Вопросы химии и химической технологии. – 2004. – № 2. – С. 54 – 60.

Надійшла до редколегії 15.06.07

УДК 62.822

И. В. КОЦ, канд. техн. наук,
Винницкий национальный технический университет

ВЕРТИКАЛЬНАЯ ГИДРОПРИВОДНАЯ ВИБРАЦИОННАЯ СУШИЛЬНАЯ УСТАНОВКА С КОНВЕКТИВНЫМ МЕТОДОМ СУШКИ

Розглянута нова принципова схема вертикальної вібраційної сушильної установки із гідроприводом. Розроблена математична модель робочого процесу, що надає можливість провести аналіз всіх основних складових, які сприяють створенню такого робочого режиму, при якому буде пришвидшене сушіння і поліпшена його якість.

New principle scheme of the vertical vibration drying with hydraulic drive setting, is consider. Develop mathematical model of working process, which gives possibility to make the analysis of all basic constit-

uents, which assist to creation of such operating condition, at which drying is accelerated and his quality gets better.

Актуальность работы. В различных отраслях промышленности, таких как, например, химическая, горная, фармацевтическая и пищевая, важную роль при изготовлении качественной продукции играют процессы сушки различных материалов. Поэтому создание новых конструкций сушильных агрегатов, которые характеризуются достаточным уровнем экономичности, надежности и качества выходной продукции есть актуальной задачей [1, 2].

Анализ последних исследований и публикаций. Наибольшее распространение среди известных способов сушки сыпучих материалов имеет конвективный способ, который часто соединяет в себе различные виды теплообмена. К наиболее эффективным конвективным аппаратам с активным гидродинамическим режимом относятся сушилки с виброкипящими слоями различных модификаций, в которых создаются равные тепловые и аэродинамические условия по всему рабочему объему сушильного агрегата [1, 2].

Постановка цели и задач исследований. Целью работы является исследование предложенной конструкции вибрационной установки для конвективной сушки сыпучих материалов. Необходимо произвести обоснование и выбор таких взаимосвязей и соотношений между её рабочими характеристиками и параметрами, которые будут обеспечивать надежное функционирование оборудования и получение качественной выходной продукции при относительно небольших энергетических расходах.

Изложение основного материала и результаты исследований.

На рисунке показана принципиальная схема экспериментальной вертикальной гидравлической вибрационной сушильной установки [3]. Устройство работает следующим образом. Влажный сыпучий материал через входной патрубок с ротационным дозатором 13 подается в теплоизолированную сушильную камеру 1. Под действием переменного давления жидкости, которая поступает от насоса 8 к рабочим камерам исполнительных плунжерных гидроцилиндров-вибраторов 2, происходят возвратно-поступательные перемещения газораспределительной решетки 4 и размещенного на ней сыпучего материала. Переменное давление в гидросистеме создается гидравлическим генератором колебаний давления рабочей жидкости 5. В результате периодических колебаний сыпучий материал во время каждого хода газораспределительной решетки 4 вверх будет подбрасываться и отрываться от неё, а затем будет осуществляться свободное падение материала. Во время отрыва от

опорной поверхности в образованную полость между газораспределительной решеткой 4 и сыпучим материалом будет поступать горячий воздух, интенсивно нагревающий взрыхленный материал, находящийся в полете. Таким образом, в результате периодически повторяющихся возвратно-поступательных перемещений и взрыхлений сыпучего материала будет происходить его перемешивание, обеспечивающее равномерную сушку всего массива, при нагревании горячим воздухом, поступающим от теплообменника-калорифера 11. Отработанный сушильный агент через выкидной воздуховод 14 выводится во внешнюю среду.

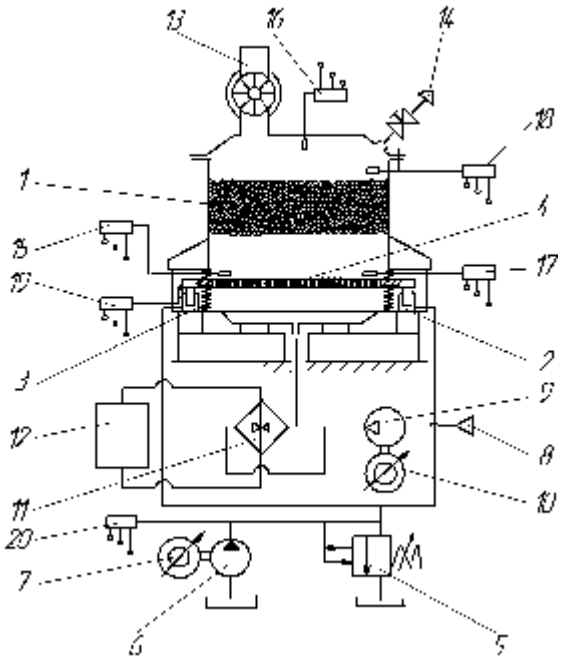

Рисунок – Принципиальная схема экспериментальной вертикальной гидравлической вибрационной сушильной установки

Для описания динамики рабочего процесса примем следующие допущения: массу сыпучего материала принимаем сосредоточенной, размерами и формой его частиц пренебрегаем [4]; жидкость в приводной гидросистеме полагается сжимаемой, причем коэффициент сжимаемости при давлении 0,3МПа имеет среднеинтегральное значение $\beta_{ср}$, а при давлении свыше 3 МПа – некоторое постоянное значение β [4]; срабатывание генератора колебаний давления рабочей жидкости происходит релейно; давление в сливной магистрали и производительность насоса 6 принимаются постоянными.

Первый этап рабочего цикла – рост давления рабочей жидкости в гид-

росистеме от $p_{сл}$ до $p_1 \geq (P_П + R_{тр})/F_{пл}$, при котором начинается движение рабочих органов плунжерных гидроцилиндров 2:

$$Q_н = \frac{dp}{dt} W_n \quad . \tag{1}$$

Второй этап – совместный ход вверх газораспределительной решетки 4 и сыпучего материала расположенного на ней, при начальных условиях:

$$t = t_1, \quad z = z_н = 0, \quad \frac{dz}{dt} = 0:$$

$$\begin{cases} M_C \dfrac{d^2 z}{dt^2} = pF_{пл} - c(z + z_н) - \sim_{тр} \dfrac{dz}{dt} - R_{тр} sign(\dfrac{dz}{dt}) - M_C g + P_{B1}, \\ Q_н = \dfrac{dp}{dt} W_n \quad + F_{пл} \dfrac{dz}{dt}. \end{cases} \tag{2}$$

Третий этап – ход газораспределительной решетки 4 вниз и свободное падение сыпучего материала , при начальных условиях:

$$t = t_2, \ z_1 = z_к, \ \frac{dz_1}{dt} = 0, \ z_2 = z_к, \ \frac{dz_2}{dt} = 0:$$

$$\begin{cases} M_{гр} \dfrac{d^2 z_1}{dt^2} = c\left[(z_н + z_к) - z\right] - \sim_{тр} \dfrac{dz}{dt} - R_{тр} sign(\dfrac{dz}{dt}) + M_{гр} g - P_{B1} + P_{B2}, \\ « \ f_{сл} \sqrt{\dfrac{2g}{¥}} \sqrt{p - p_{сл}} = Q_н + \dfrac{dp}{dt} W_n \quad + F_{пл} \dfrac{dz}{dt}, \\ M_M \dfrac{d^2 z_2}{dt^2} = \quad M_M g - P_{B2}. \end{cases} \tag{3}$$

В уравнениях (1 – 3) приняты следующие обозначения: $Q_н$ – производительность насоса 6; p, t – текущее давление и время; W_n – суммарный объем рабочих полостей, включая полость генератора колебаний давления рабочей жидкости 5, полость приводной гидросистемы и гидроцилиндров 9; $_{ср}$ – среднеинтегральное значение коэффициента сжимаемости жидкости в интервале давления от $p_{сл}$ до p_1 ; M_C – суммарная масса (которая состоит:

$M_C = M_{гр} + M_M$, здесь $M_{гр}$ – масса газораспределительной решетки; M_M – сосредоточенная масса сыпучего материала); z , z_1 – соответственно, текущее перемещение совместного движения плунжеров гидроцилиндров-вибраторов 2 и газораспределительной решетки во время первого и второго этапов; z_2 – перемещение сыпучего материала; $z_н$, $z_к$ – начальное и конечное положение газораспределительной решетки; $F_{пл}$ – эффективная рабочая площадь поперечного сечения плунжеров гидроцилиндров-вибраторов 2; g – ускорение свободного падения; $P_{B1} = p_{возд}\, F_{гр}$ – сила давления воздуха, который нагнетается от вентилятора 10, на газораспределительную решетку, на которой плотным слоем расположен сыпучий материал; $F_{гр}$ – приведенная площадь поперечного сечения, по которой происходит прилегание сыпучего материала к газораспределительной решетке; $p_{возд}$ – давление воздуха, создаваемое вентилятором 10; c – жесткость упругих элементов 3; $R_{тр}$ – сила сухого трения, принятая постоянной [4]; $\sim_{тр}$ – постоянный коэффициент вязкого трения; « – коэффициент расхода рабочей жидкости; $f_{сл}$ – площадь проходного сечения сливной гидролинии; γ – удельный вес рабочей жидкости; $P_{B2} = p_{B2}\, F_{гр} = M_M g \left(\dfrac{v^2}{v_{вит}^2} \right)$ – сила давления на подвижную часть газораспределительной решетки и на массив приведенного в движение сыпучего материала [4]; p_{B2} – давление, которое создается в воздушной подушке между сыпучим материалом и газораспределительной решеткой; v , $v_{вит}$ – соответственно, скорость воздушного потока и скорость витания частиц обрабатываемого сыпучего влажного материала.

Полученные результаты были проверены экспериментально на примере сушки влажного песка. Как переменная состояния выбран показатель – «удельный расход энергии», определяемый по формуле [кВт·час/кг] [2]:

$$Q_{уд} = P/W_{вл}, \qquad (4)$$

где P – количество потребляемой энергии, кВт·час; $W_{вл}$ – количество испаренной влаги, кг.

В план эксперимента были включены следующие основные факторы:

x_1 – амплитуду вибрации, м; x_2 – температуру сушильного агента – горячего воздуха, С; x_3 – расход воздуха, м^3/ч.

В результате обработки полученных экспериментальных данных было получено уравнение регрессии в следующем виде:

$$\begin{aligned} Y = 1{,}211 + 0{,}089x_1 - 0{,}034x_2 + 0{,}371x_3 - 0{,}056x_1x_2 - \\ - 0{,}059x_1x_3 + 0{,}057x_2x_3 - 0{,}092x_1^2 - 0{,}11x_2^2 + 0{,}199x_3^2 = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Дисперсия адекватности для проведенных опытов, которая определялась в соответствии с методикой [5], составила:

$$S_{ад}^2 = 6{,}212 \cdot 10^{-4}.$$

Адекватность полученной модели проверяем по критерию (критерий Фишера) [5]:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} = \frac{6{,}212 \cdot 10^{-4}}{2{,}552 \cdot 10^{-4}} = 2{,}434 < \ F_{табл} = 19{,}3 \ ,$$

где $F_{табл}$ – табличное значение критерия Фишера, $S_{ад}^2$ – дисперсия адекватности математической модели, S_y^2 – дисперсия ошибки опыта [5].

Для достижения значений факторов, которые обеспечивают оптимальное протекание процесса сушки, для уравнения регрессии (5) была составлена система дифференциальных уравнений, представляющих частные производные про трем факторам x_1, x_2, x_3, которые приравниваются к нулю:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial Y}{\partial x_1} = 0{,}089 - 0{,}184x_1 - 0{,}056x_2 - 0{,}059x_3 = 0, \\ \dfrac{\partial Y}{\partial x_2} = 0{,}034 - 0{,}056x_1 - 0{,}022x_2 + 0{,}057x_3 = 0, \\ \dfrac{\partial Y}{\partial x_3} = 0{,}371 - 0{,}059x_1 + 0{,}057x_2 + 0{,}398x_3 = 0. \end{cases} \quad (6)$$

После решения уравнений системы (6) относительно неизвестных были получены оптимальные значения факторов x_1, x_2, x_3 (таблица).

Таблица

Оптимальные значения факторов

Факторы	Оптимальные значения	
	Кодированные	Раскодированные
Амплитуда колебаний, м	1,035	$10{,}252 \cdot 10^{-3}$
Температура сушильного агента, ^{0}C	-0,656	131,121
Расход воздуха, м^3/час	-0,683	8,375

После подстановки оптимальных факторов в уравнение (5) был получен удельный расход энергии, который равняется 1,45 кВт·час/кг испаренной влаги.

Выводы. Предложена математическая модель рабочего процесса новой конструкции вертикальной гидроприводной вибрационной сушильной установки, а также осуществлена экспериментальная проверка работоспособности предложенной установки и получено при этом уравнение регрессии для выбора показателя состояния системы – удельного расхода энергии, которое обобщает основные факторы, влияющие на изменение показателя энергоемкости процесса сушки, на ее качество и продолжительность.

Использование результатов проведенных исследований предоставит разработчикам подобных сушильных установок возможность определять оптимальные их конструктивные и приводные параметры, характеристики рабочих режимов, правильный выбор которых будет содействовать улучшению выходной продукции, повысит экономичность и интенсивность процесса сушки.

Список литературы: **1.** *Членов Б.А., Михайлов Н.В.* Сушка сыпучих материалов в виброкипящем слое. – М.: Стройиздат, 1967. – 224 с. **2.** *Нагорнов С.А.* Управление процессами переноса теплоты в неоднородных псевдоожиженных и виброциркуляционных средах. – Тамбов: ВНИИТиН, 2002. – 101с. **3**. Деклараційний патент України на корисну модель № 24535, МКл. F 26 B17/10. Установка для вібраційного сушіння / Авт.: *Коц І.В., Насіковський А.Б., Петрусь В.В.* Бюлетень № 6 від 15.11.2006 р. **4.** *Коц И.В.* Математическое моделирование рабочего процесса виброгрохота с импульсным гидроприводом // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Химия, химическая технология и экология. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2006. № 30. – С. 8 – 15. **5.** *Адлер Ю.П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / *Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский./* М: Наука, 1976. – 280 с.

Поступила в редколлегию 15.09.07