

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА

В. В. Матюкин¹, В. Я. Борщев²

*АО «ЗАВКОМ» (1), Тамбов, Россия;
кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность» (2),
borschov@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: интерполяционная модель; кварцевый песок; кинетика процесса измельчения; математическое планирование эксперимента; экспериментальные исследования.

Аннотация: Проведено исследование процесса измельчения кварцевого песка в измельчителе ударно-стирающего действия. Установлено, что наиболее интенсивно песок измельчается при более высокой частоте вращения приводного вала установки, большей массе мелющих тел и меньшей массе измельчаемого материала. В работе реализован активный эксперимент с помощью процедуры математического планирования эксперимента. В результате обработки опытных данных в Microsoft Excel получена статистическая математическая модель процесса измельчения кварцевого песка в измельчителе ударно-стирающего действия.

Введение

В настоящее время кварцевый песок является одним из наиболее востребованных строительных материалов. Он используется в качестве необходимого компонента при производстве любых видов стекла, начиная от обычного оконного и заканчивая медицинскими и промышленными стеклянными изделиями. Кроме того, кварцевый песок соответствующей фракции используется в различных фильтрах для очистки воды – высокие сорбционные свойства делают его одним из лучших материалов для фильтров и других подобных устройств [1].

Кварцевый песок в качестве основного компонента входит практически во все строительные сухие смеси, цементные растворы, вяжущие материалы. При этом качество изделий напрямую зависит от его гранулометрического состава [2]. Однако качеству песка при производстве различных изделий из него уделяют недостаточно внимания. Тем не менее данные вопросы зачастую являются одними из важных. Природный кварцевый песок, как правило, характеризуется низкой однородностью. Достижение высокой однородности песка возможно только в результате его измельчения.

Цель работы – исследование процесса измельчения кварцевого песка в лабораторных условиях, построение математической модели с помощью математического планирования эксперимента.

Экспериментальная часть

Для получения тонкодисперсных материалов наиболее эффективными являются измельчители ударно-стирающего действия [3]. В настоящей работе исследование процесса измельчения кварцевого песка проведено на лабораторной установке, состоящей из сварного корпуса, расположенного на основании состоящего из двух частей, разделенных стенкой. В одной части расположен привод, а во второй – исполнительный механизм. Экспериментальная установка отличается от базовой использованием мелющих тел для процесса измельчения. Вследствие этого основным рабочим органом модернизированной установки является рабочая камера с мелющими телами – металлическими шарами (рис. 1). Конструкция установки позволяет варьировать скорость вращения рабочей камеры, степень ее заполнения материалом и время процесса измельчения. В процессе движения цилиндрической рабочей камеры измельчителя мелющие тела совершают в ней достаточно сложное (хаотическое) движение. Измельчение материала в корпусе происходит как под действием удара, так и истирания вследствие сложного пространственного движения рабочей камеры измельчителя.

Исходным измельчаемым материалом в процессе исследования являлся просушенный кварцевый песок. Начальный диаметр частиц кварцевого песка до измельчения определен с помощью микроскопа серии ЕС МЕТАМ РВ. Средний диаметр частиц песка перед измельчением равен $d_x = 0,849$ мм.

В качестве мелющих тел использовали металлические шары диаметром $d_{ш} = 8$ мм. Коэффициент заполнения рабочей камеры мелющими телами в процессе измельчения оставался постоянным, равным 5 %.

Относительно малый коэффициент заполнения рабочей камеры мелющими шарами объясняется необходимостью обеспечения высокой подвижности шаров в процессе измельчения и, как следствие, высокой эффективности измельчения в результате преобладающего воздействия на измельчаемый материал ударных нагрузок. При больших коэффициентах заполнения рабочей камеры мелющими телами эффективность измельчения несколько снижается, так как преобладающими в процессе измельчения становятся эффекты истирания.

Методика проведения эксперимента заключается в следующем.



Рис. 1. Рабочая камера экспериментальной установки

В рабочую камеру измельчителя загружаются мелющие тела и определенная порция исходного материала. С помощью панели управления задаются режимные параметры измельчителя (частота вращения приводного вала и время измельчения), затем включается его привод.

В целях исследования кинетики процесса измельчения отбирали пробы измельченного материала через каждые пять минут. После выключения привода измельчителя из рабочей камеры выгружали измельченный материал вместе с мелющими телами на сито, служащее для разделения мелющих шаров и материала. Далее из массы измельченного материала из разных его объемов отбирали пробы [4] и проводили анализ размеров полученных частиц кварцевого песка с помощью микроскопического метода определения размеров частиц. С помощью микроскопа измеряли длину и ширину частиц. Каждый замер состоял из трех проб по 10 частиц в каждой. По полученным результатам рассчитывали средний проектированный диаметр частиц, мм, по формуле [5]

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}},$$

где S – площадь проекции сферической частицы, мм².

Общее время измельчения в каждом из опытов составляло 25 минут.

Экспериментальные исследования процесса измельчения кварцевого песка проводили при скорости вращения приводного вала, равной 36 об/мин.

На первом этапе исследовался процесс измельчения в зависимости от коэффициента заполнения рабочей камеры измельчаемым материалом β , %, равным 2,3 и 3,5.

Общая загрузка рабочей камеры, состоящая из измельчаемого материала и мелющих тел, определяется требуемыми условиями процесса измельчения, создаваемыми в рабочей камере измельчителя. Исходя из необходимости реализации процесса измельчения под действием ударно-истирающих воздействий, общая загрузка должна быть, на наш взгляд, не более 15 % объема рабочей камеры.

Результаты экспериментальных исследований процесса измельчения в зависимости от коэффициента заполнения материалом представлены на рис. 2.

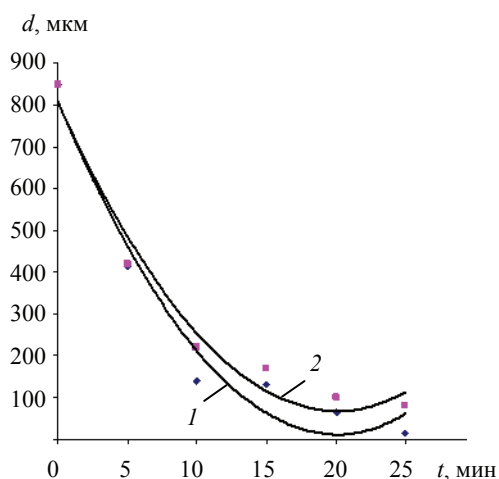


Рис. 2. Кинетика процесса измельчения кварцевого песка в зависимости от коэффициента заполнения рабочей камеры измельчаемым материалом, %:
1 – 2,30; 2 – 3,50

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что процесс измельчения частиц кварцевого песка наиболее интенсивно протекает в начальный период измельчения. Затем следует период малоинтенсивного помола, что вызвано влиянием на процесс измельчения образующихся при помоле мелких частиц. Мелкие частицы существенно снижают ударное воздействие металлических шаров на измельчаемый материал. Измельчение песка при меньшем коэффициенте заполнения протекает несколько интенсивнее, чем при большем коэффициенте (см. рис. 2). Анализ кривых показывает, что даже незначительное увеличение коэффициента заполнения рабочей камеры измельчаемым материалом существенно снижает эффективность помола.

Также проведено исследование влияния скорости вращения приводного вала рабочей камеры установки на процесс измельчения (рис. 3, а). Как видно, измельчение при большей частоте вращения приводного вала протекает интенсивнее, чем при меньшей, при одинаковых массах измельчаемого материала и мелющих тел.

Далее исследована кинетика процесса измельчения кварцевого песка в зависимости от коэффициента заполнения рабочей камеры мелющими телами (рис. 3, б). Установлено значительное влияние коэффициента заполнения рабочей камеры шарами на процесс измельчения. С увеличением коэффициента заполнения наблюдается повышение как интенсивности, так и эффективности помола частиц кварцевого песка.

После сравнительного анализа графических зависимостей можно отметить, что наиболее интенсивно песок измельчается при более высокой частоте вращения приводного вала установки, большей массе мелющих тел и меньшей массе измельчаемого материала.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности получения микроразмерных частиц кварцевого песка с помощью измельчителя ударно-стирающего действия.

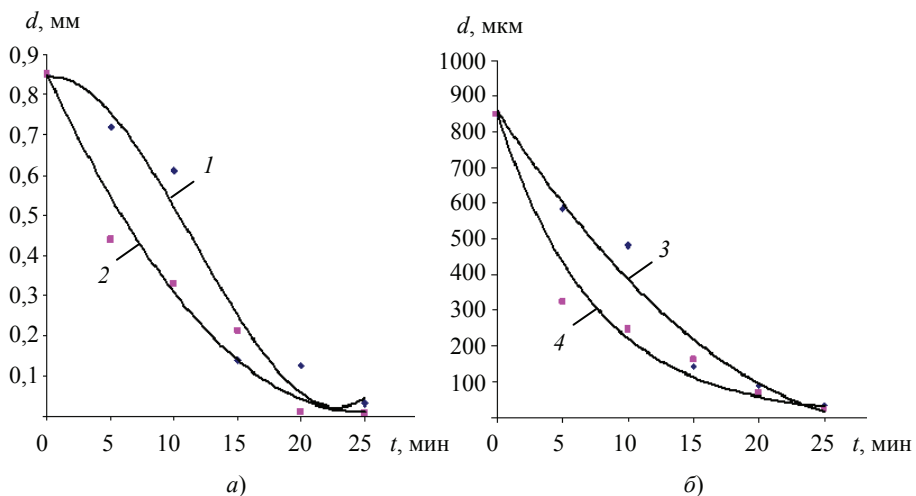


Рис. 3. Кинетика процесса измельчения кварцевого песка в зависимости от частоты вращения приводного вала (а), об/мин, и коэффициента заполнения рабочей камеры мелющими телами (б), %:
 1 – 36; 2 – 63; 3 – 5; 4 – 7

Построение интерполяционной модели

Процесс измельчения является достаточно сложным для аналитического описания. Поэтому на следующем этапе работы проведено исследование в целях получения интерполяционной модели процесса измельчения. Для этого реализован активный эксперимент с помощью процедуры математического планирования эксперимента [6].

Целью математического моделирования является получение информации, например, о влиянии факторов входа (масс кварцевого песка и мелющих тел, а также частоты вращения приводного вала рабочей камеры установки) на размер получаемых после измельчения частиц кварцевого песка. Такая взаимосвязь может быть представлена в виде уравнения, которое позволяет анализировать влияние факторов на выходной параметр и может быть использовано как основа описания качества исследуемого процесса.

Математическое описание модели в окрестности точки базового уровня можно получить варьированием каждого из факторов (массы кварцевого песка, массы мелющих тел и частоты вращения приводного вала экспериментальной установки) на двух уровнях, отличающихся от базового на величину интервала варьирования [6]. Интервал варьирования по каждому управляемому фактору выбирается так, чтобы приращение величины отклика к базовому значению можно было заметить при небольшом числе параллельных опытов.

Анализ вышеприведенных результатов позволил выделить основные факторы, влияющие на процесс измельчения: массы измельчаемого песка и мелющих тел, а также частоту вращения приводного вала рабочей камеры. Таким образом, реализован полный факторный эксперимент ($ПФЭ 2^3$).

На основе анализа проведенных ранее исследований и материалов экспертной оценки определены уровни и интервалы варьирования факторов (табл. 1). Составлен рандомизированный план проведения экспериментов по исследованию эффективности процесса измельчения (табл. 2).

Обработку результатов реализации плана ПФЭ 2^3 проводили с помощью программы Microsoft Excel. Однородность дисперсий проверяли с помощью критерия Кохрена. На основе полученных данных сделан вывод об однородности дисперсий. Гипотезы значимости коэффициентов уравнения регрессии проверяли с использованием критерия Стьюдента. В результате установлена значимость всех коэффициентов полученного уравнения.

Таблица 1

Основные факторы и уровни их варьирования

Уровень	Фактор		
	Масса, кг		Частота вращения приводного вала, c^{-1}
	песка	мелющих тел	
Верхний	0,150	1,2	1,05
Основной (нулевой)	0,125	0,8	0,90
Нижний	0,100	0,4	0,75
Кодированное обозначение	x_1	x_2	x_3
Верхний	+1	+1	+1
Основной (нулевой)	0	0	0
Нижний	-1	-1	-1

Матрица спланированных опытов в рандомизированном порядке

Номер опыта	x_1	x_2	x_3
4	0,15	0,400	0,75
3	0,15	0,400	1,05
8	0,10	0,400	1,05
5	0,10	1,200	1,05
7	0,10	0,400	1,05
2	0,15	1,200	0,75
1	0,15	1,200	1,05
6	0,10	1,200	0,75

Адекватность математической модели проверена с помощью критерия Фишера при принятом уровне значимости $\alpha = 0,95$. При этом подтверждена адекватность уравнения регрессии экспериментальным данным.

В результате обработки экспериментальных данных в Microsoft Excel построена статистическая математическая модель процесса измельчения кварцевого песка в кодированном виде

$$y = 32,875 + 1,3x_1 - 16x_2 - 4,45x_3 - 3,175x_1x_2 + 1,375x_1x_3 - 2,775x_2x_3 + 0,85x_1x_2x_3.$$

Полученное уравнение регрессии устанавливает зависимость между критерием оптимизации y (средний диаметр частиц измельченного материала d) и следующими факторами: массой измельчаемого материала (песка), массой мелющих тел и частотой вращения приводного вала рабочей камеры.

Обсуждение результатов и выводы

Проведенные экспериментальные исследования позволяют построить с помощью математического планирования статистическую математическую модель и получить информацию, например, о влиянии факторов входа (масс кварцевого песка и мелющих тел и частоты вращения рабочей чаши) на средний размер, получаемых после измельчения, частиц кварцевого песка. Такая взаимосвязь представлена в виде уравнения, которое позволяет анализировать влияние факторов на целевую функцию и может быть использована как основа описания качества исследуемого процесса в промышленных масштабах.

О степени влияния на параметр оптимизации каждого из факторов свидетельствует величина коэффициентов при них. Анализ полученного уравнения показывает, что наиболее значимо на средний диаметр частиц измельченного материала влияет масса мелющих тел в рабочей камере, а также частота вращения приводного вала измельчителя. При этом увеличение данных факторов приводит к уменьшению среднего диаметра частиц измельченного материала.

В работе на примере измельчения кварцевого песка продемонстрирована способность модели изменяться в зависимости от воздействия различных факторов. На основании экспериментальных исследований можно предложить модель модернизации существующих установок ударно-стирающего действия с целью интенсификации процесса измельчения твердых материалов.

Список литературы

1. Хинт, Й. А. Основы производства силикальцитных изделий / Й. А. Хинт. – М. : Госстройиздат, 1962. – 642 с.
2. Шванов, В. Н. Песчаные породы и методы их изучения / В. Н. Шванов. – Л. : Недра, 1969. – 248 с.
3. Сиденко, П. М. Измельчение в химической промышленности / П. М. Сиденко. – 2-е изд., перераб. – М. : Химия, 1977. – 368 с.
4. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
5. Гаврилова, Н. Н. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов : учеб. пособие / Н. Н. Гаврилова, В. В. Назаров, О. В. Яровая. – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. – 52 с.
6. Макаричев, Ю. А. Методы планирования эксперимента и обработки данных : учеб. пособие / Ю. А. Макаричев, Ю. Н. Иванников. – Самара : Самарский гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с.

A Study of the Grinding Process of Quartz Sand

V. V. Matyukin¹, V. Ya. Borshchev²

JSC “ZAVKOM” (1), Tambov, Russia;
Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety (2),
borschov@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: interpolation model; quartz sand; kinetics of the grinding process; mathematical planning of experiment; experimental research.

Abstract: A study of the process of grinding quartz sand in a grinder with an impact-abrasive action was made. It has been found that sand is crushed most intensively at a higher frequency of rotation of the drive shaft of the installation, a larger mass of grinding bodies and a smaller mass of the crushed material. An active experiment is implemented in the work using the procedure of mathematical planning of the experiment. As a result of processing experimental data in Microsoft Excel, a statistical mathematical model of the process of grinding quartz sand in a grinder with an impact-abrasive action was obtained.

References

1. Khint Y.A. *Osnovy proizvodstva silikal'tsitnykh izdeliy* [Fundamentals of the production of silicate products], Moscow: Gosstroyizdat, 1962, 642 p. (In Russ.)
2. Shvanov V.N. *Peschanyye porody i metody ikh izucheniya* [Sandy rocks and methods of their study], Leningrad: Nedra, 1969, 248 p. (In Russ.)
3. Sidenko P.M. *Izmel'cheniye v khimicheskoy promyshlennosti* [Grinding in the chemical industry], Moscow: Khimiya, 1977, 368 p. (In Russ.)
4. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Apparatus for mixing bulk materials], Moscow: Mashinostroyeniye, 1973, 216 p. (In Russ.)
5. Gavrilova N.N., Nazarov V.V., Yarovaya O.V. *Mikroskopicheskiye metody opredeleniya razmerov chastits dispersnykh materialov: uchebnoye posobiye* [Microscopic methods for determining the size of particles of dispersed materials: textbook], Moscow: RKHTU im. D. I. Mendeleyeva, 2012, 52 p. (In Russ.)

6. Makarichev Yu.A., Ivannikov Yu.N. *Metody planirovaniye eksperimenta i obrabotki dannykh: uchebnoye posobiye* [Methods of experiment planning and data processing: a tutorial], Samara: Samarskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2016, 131 p. (In Russ.)

Untersuchung des Mahlprozesses von Quarzsand

Zusammenfassung: Es ist eine Studie über den Prozess des Mahlens von Quarzsand in einem Häcksler mit Schlagabriebwirkung durchgeführt. Es hat sich herausgestellt, dass bei einer höheren Drehzahl der Antriebswelle der Anlage, einer größeren Masse von Mahlkörpern und einer geringeren Masse des Brechgutes der Sand am intensivsten zerkleinert wird. Mit dem Verfahren der mathematischen Versuchsplanung ist in der Arbeit ein aktives Experiment implementiert. Als Ergebnis der Verarbeitung von experimentellen Daten in Microsoft Excel ist ein statistisches mathematisches Modell des Prozesses des Mahlens von Quarzsand in einem Häcksler mit einer Schlagschleifwirkung erhalten.

Étude du processus de broyage du sable de quartz

Résumé: Est réalisée une étude du processus du broyage du sable de quartz dans un broyeur à impact. Est établi que le sable est broyé le plus intensément à une vitesse plus élevée de l'arbre d'entraînement de l'installation, avec la plus grande masse de corps de broyage et la moindre masse du matériau broyé. L'article illustre une expérience active à l'aide de la procédure de la planification mathématique de l'expérience. À la suite du traitement de données expérimentales dans Microsoft Excel, est obtenu un modèle mathématique statistique du processus du broyage du sable de quartz dans un broyeur à impact-abrasion.

Авторы: *Матюкин Владимир Викторович* – инженер, АО «ЗАВКОМ», Тамбов; *Борщев Вячеслав Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.