

УДК 691.327

**Хохряков О.В.** – кандидат технических наук, старший преподаватель

E-mail: [olvik@list.ru](mailto:olvik@list.ru)

**Морозов Н.М.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [nikola\\_535@mail.ru](mailto:nikola_535@mail.ru)

**Хозин В.Г.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: [khozin@kgasu.ru](mailto:khozin@kgasu.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

## **СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕЛЬНИЦ ПО РАЗМОЛОСПОСОБНОСТИ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА И ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ В ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНАХ**

### **АННОТАЦИЯ**

Применение тонкодисперсных наполнителей в цементных бетонах позволяет улучшить их физико-механические характеристики. Как правило, их получают путем помола природных или техногенных материалов. В статье выполнена сравнительная оценка мельниц трех разных производителей по размолоспособности и продолжительности измельчения в них кремнеземистого наполнителя – кварцевого песка. На следующем этапе работы исследована его техническая эффективность в цементных бетонах. На основании результатов гранулометрического распределения частиц, активности по отношению к гидратной извести и прочности цементных бетонов показано, что эффективность кварцевого песка выше при его измельчении в виброшаровых мельницах.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** наполнители, гранулометрический состав, цементный бетон, измельчение.

**Khohryakov O.V.** – candidate of technical science, senior lecturer

**Morozov N.M.** – candidate of technical science, associate professor

**Khozin V.G.** – doctor of technical science, professor

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

## **COMPARATIVE ESTIMATION OF MILLS BY EFFICIENCY IT IS THIN THE GROUND FILLER IN CEMENT CONCRETE**

### **ABSTRACT**

Application is thin disperse fillers in cement concrete allows to improve their physicomachanical characteristics. As a rule, fillers receive by a grinding of natural or technogenic materials. In article the comparative estimation of mills of three different manufacturers by efficiency of a filler – ground quartz sand in cement concrete is executed. On the basis of positive results of distribution of particles in the diameters, to activity in relation to a lime and durability of cement concrete it is shown that efficiency of quartz sand above at crushing in vibrating spherical mills.

**KEYWORDS:** fillers, grain structure, cement concrete, crushing.

Широко распространенным приемом улучшения структуры и свойств цементных бетонов является использование тонкодисперсных наполнителей [1]. В зависимости от химической природы и происхождения их действие проявляется весьма разносторонне: обеспечивается возможность химического взаимодействия с продуктами гидратации цемента и упрочнения цементного камня, уплотняется структура цементного камня, улучшаются реологические свойства цементных бетонов и др.

Применяемые для получения порошковых наполнителей помольные агрегаты весьма разнообразны. От вида мельницы и способа разрушения исходных зерен зависит техническая эффективность наполнителей в цементных бетонах. Это связано, главным образом, с особенностями поверхности частиц измельченного наполнителя и его гранулометрическим составом.

Под измельчением твёрдых тел понимается направленное уменьшение их первоначальных размеров в результате механического воздействия. В производстве минеральных добавок и наполнителей применяется механическое измельчение, приводящее к образованию дисперсных систем, или порошков [2]. Разрушение твёрдых тел может производиться различными способами, наиболее распространёнными из которых являются: раздавливание, истирание, изгиб, раскалывание.

Обычно в размольных машинах или мельницах разрушение твёрдого тела происходит несколькими способами в результате комбинированного воздействия, но преобладающими являются один или два способа. Исходя из физических свойств твёрдого тела, выбирается наиболее оптимальный способ его разрушения. Однако, помимо физических свойств материала на выбор механизма измельчения, реализующего наиболее оптимальный способ разрушения, оказывает влияние исходный размер твёрдого тела и, в большей степени, требуемый размер частиц конечного продукта. При этом наполнители с одинаковой степенью измельчения могут отличаться по морфологии зерен и гранулометрическому составу [2, 3, 4].

Целью нашей работы явилась сравнительная техническая оценка мельниц трех разных производителей по размолоспособности в них кварцевого песка до удельной поверхности  $600 \text{ м}^2/\text{кг}$  и изучение его влияния на свойства цементных бетонов. Для помола использованы следующие мельницы: вибрационно-шаровые СМВ-0,005 (производитель ООО «Консит-А») и СВМ-3 (производитель ООО «Опытный завод со специальным бюро»), а также пружинная с истирающе-сдавливающим способом измельчения. Начальная удельная поверхность кварцевого песка составляла  $5 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Первоначально выполнена сравнительная оценка лабораторных мельниц по следующим техническим показателям: мощность привода (Вт), энергозатраты  $N$  (кВт·ч/кг), коэффициент размолоспособности КР ( $\text{м}^2/\text{ч}$ ), удельные энергозатраты на единицу поверхности  $N/\Delta S_{\text{уд}}$  (Вт·ч/ $\text{м}^2$ ). Размолоспособность КР рассчитана путем умножения изменения удельной поверхности от начального ( $5 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) до конечного ( $600 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) значения на массу навески, кг, и их делением на продолжительность измельчения, ч.

Таблица 1

**Сравнительная техническая эффективность лабораторных мельниц  
на примере помола кварцевого песка**

| № п/п | Вид помольного агрегата | Значения технических показателей |   |                   |                 |                           |               |   |
|-------|-------------------------|----------------------------------|---|-------------------|-----------------|---------------------------|---------------|---|
|       |                         | мощность привода, Вт             | $\Delta S_{\text{уд}}$ , $\text{м}^2/\text{кг}$ | масса навески, кг | время помола, ч | КР, $\text{м}^2/\text{ч}$ | $N$ , Вт·ч/кг | $N/\Delta S_{\text{уд}}$ , Вт·ч/ $\text{м}^2$ |
| 1     | СМВ-0,005               | 550                              | 595   | 1,5               | 4               | 225                       | 1380          | 2,3   |
| 2     | Пружинная мельница      | 1500                             |   | 0,2               | 0,083           | 1428                      | 375           | 0,63  |
| 3     | СВМ-3                   | 3000                             |   | 3,0               | 0,333           | 5355                      | 180           | 0,3   |

Как следует из табл. 1, наименее энергоемкой и с большей эффективностью по размолоспособности является мельница СВМ-3. Менее эффективными оказались СМВ-0,005 и пружинная мельница. Очевидно, что это связано не только со способом помола в данных мельницах, но также и с объемом измельчаемого материала. При увеличении объема мельницы чаще всего увеличивается ее энергоэффективность.

Оценку гранулометрического распределения частиц измельченного песка кварцевого выполняли с помощью лазерного анализатора Horiba LA-950V2 с диапазоном измерения от 0,01 до 3000 мкм. Исследования проводили на низкоконтрированных суспензиях наполнителя (~0,6 %) в дистиллированной воде. Для разрушения крупных агрегатов и скоплений частиц суспензии подвергали ультразвуковой обработке в течение одной минуты. Результаты определения представлены на рис. 1 и в табл. 2.

Как следует из рис.1, вид кривых распределения идентичен. Они имеют три максимума с диапазоном частиц для левой «ветви» 0,22-1,7 мкм, среднего диапазона 1,7-9 мкм и правой «ветви» 9-116 мкм. Несмотря на схожесть кривых, содержание крупных и мелких частиц и преобладающий размер в каждом из указанных интервалов отличаются (табл. 2). Как видно, с наибольшим содержанием мелких частиц оказался кварцевый песок, измельченный в мельнице СВМ-3.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что независимо от вида и направления ударной нагрузки разрушение зерен песка происходит строго по одним и тем же дефектным зонам. Различие в соотношении мелких и крупных частиц, вероятно, связано лишь со скоростью «раскрытия» одних дефектных зон по отношению к другим.

Весьма информативным показателем эффективности измельченного кварцевого песка является его способность к поглощению гидратной извести ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Методика её определения, описанная в [5], заключается в оценке доли связанной извести песком (в пересчете на СаО) из её насыщенного раствора в течение 30 сут. Кварцевый песок был измельчен до  $S_{\text{уд}}=600 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Результаты определения приведены на рис. 2.

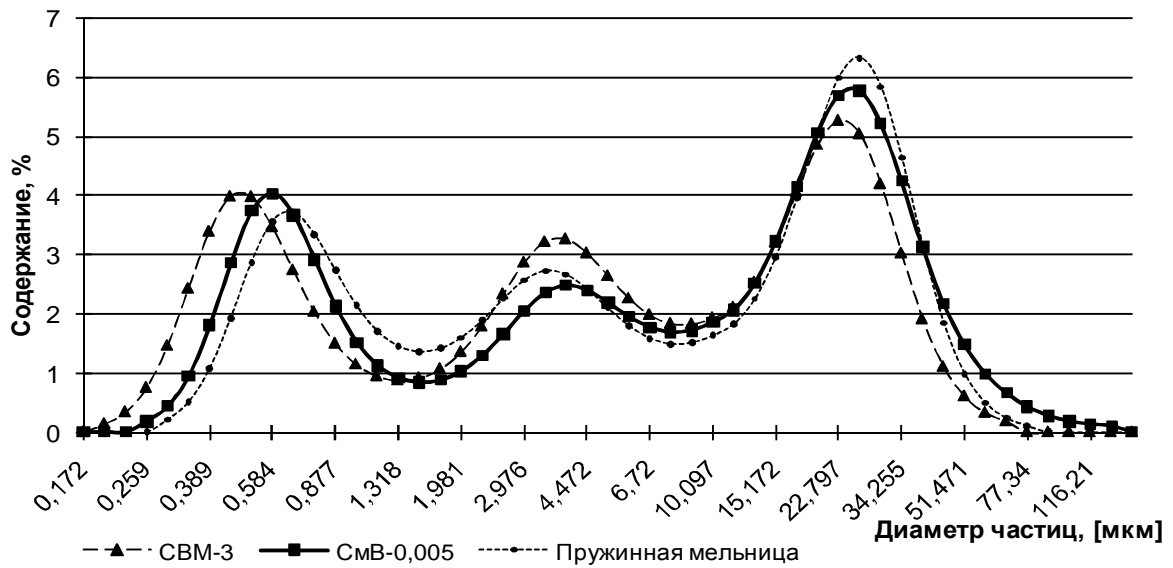


Рис. 1. Распределение частиц по размерам измельченного кварцевого песка

Таблица 2

Содержание и преобладающий размер частиц в измельченном кварцевом песке

| № п/п | Вид помольного агрегата | Содержание частиц, %, размером, мкм |                          |                      | Преобладающий размер частиц в каждом максимуме, мкм |                          |                      |
|-------|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------|----------------------|---|--------------------------|----------------------|
|       |                         | 0,22-1,7 (левая ветвь)              | 1,7-9 (средний максимум) | 9-116 (правая ветвь) | 0,22-1,7 (левая ветвь)                              | 1,7-9 (средний максимум) | 9-116 (правая ветвь) |
| 1     | СМВ-0,005               | 28,0                                | 22,6                     | 49,4                 | 0,64  | 4,5                      | 30,1                 |
| 2     | Пружинная мельница      | 28,0                                | 24,6                     | 47,4                 | 0,71  | 4,1                      | 32,0                 |
| 3     | СВМ-3                   | 31,2                                | 28,4                     | 40,4                 | 0,55  | 4,2                      | 25,1                 |

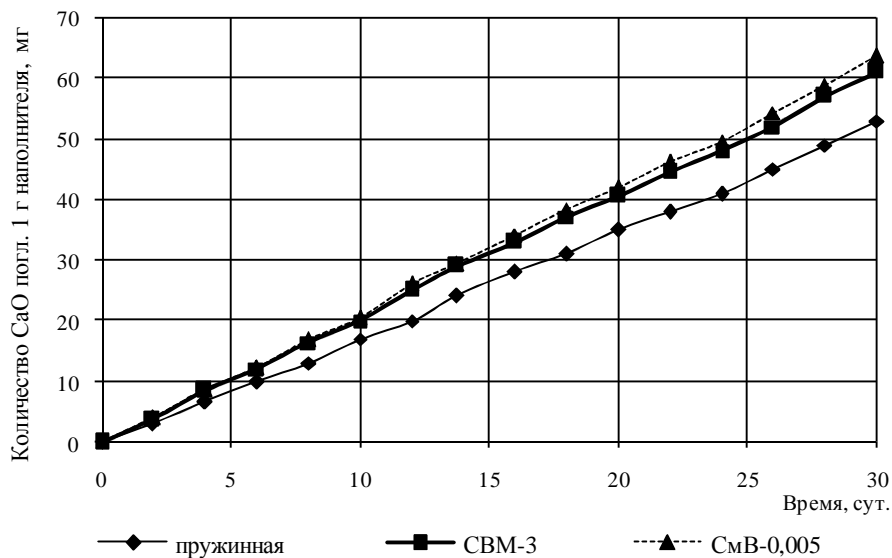


Рис. 2. Активность молотого кварцевого песка в зависимости от вида мельницы

Из рис. 2 видно, что наибольшей активностью обладают пески, полученные измельчением в вибрационно-шаровых мельницах. Скорость поглощения СаО 1 г песка для СМВ-0,005 составила 2-2,1 мг/сут, для СВМ-3 – 1,9-2 мг/сут. Кварцевый песок, измельченный в пружинной мельнице, оказался наименее активным по отношению к СаО, скорость поглощения составила всего 1,6-1,7 мг/сут.

Представленные результаты хорошо согласуются с данными гранулометрического распределения частиц песка. Чем выше доля мелких частиц в кварцевом песке, тем большую активность он проявляет к поглощению извести. Закономерно это должно отразиться и на прочности цементных систем.

Для проверки этого предположения были изготовлены образцы цементного камня размером 2х2х2 см, полученные из теста нормальной густоты. В состав образцов вводили измельченный кварцевый песок ( $S_{уд}=600\text{м}^2/\text{кг}$ ) в количестве 5 % от массы цемента. В качестве вяжущего использовали портландцемент марки ЦЕМ II/A-П 42,5Н ОАО «Мордовцемент». Образцы твердели в нормально-влажностных условиях и по истечении 1 и 7 суток были подвергнуты испытанию. Результаты прочности на сжатие представлены в табл. 3.

Таблица 3

### Прочность на сжатие цементного камня с молотым кварцевым песком

| № п/п | Вид мельницы, на которой производили помол песка | Плотность цементного камня, кг/м <sup>3</sup> | Прочность цементного камня на сжатие, МПа/%, в возрасте |          |
|-------|--|---|---|----------|
|       |  |   | 1 суток   | 7 суток  |
| 1     | -  | 2015  | 40,1/100  | 59,4/100 |
| 2     | СМВ-0,005  | 2102  | 51,5/128  | 71,5/120 |
| 3     | Пружинная мельница                               | 2077  | 43,1/107  | 63,3/107 |
| 4     | СВМ-3  | 2089  | 50,2/125  | 67,3/113 |

Как видно из табл. 3, кварцевый песок с большей активностью по отношению к СаО способствует большему росту прочности цементного камня. Наибольшим приростом прочности отличается цементный камень, содержащий в своем составе кварцевый песок, измельченный в вибрационно-шаровой мельнице СМВ-0,005. Это связано не только с высокой его активностью по отношению к СаО, но и с гранулометрическим составом. По рис. 1 видно, что такой песок имеет меньше всего частиц диаметром от 2 до 20 мкм, зато больше частиц в правой ветви кривой. Это позволяет лучше уплотнить цементный камень (табл. 3), так как частицы цемента находятся в диапазоне размера от 10-25 мкм, а наполнитель содержит, в основном, частицы либо большего, либо меньшего размера. Повышение плотности упаковки частиц цемента и наполнителя на микроуровне позволяет повысить прочность цементного камня [6]. Поэтому при практически равной активности (по поглощению СаО) песков, измельченных на мельницах СВМ-3 и СМВ-0,005, большей эффективностью обладает помол на последней.

Далее было проведено исследование эффективности наполнителей в песчаном бетоне. Так как наполнители увеличивают водопотребность бетонных смесей, то дополнительно в состав песчаного бетона вводили суперпластификатор С-3. Состав песчаного бетона принят с соотношением цемента к песку 1:3. Наполнитель (измельченный кварцевый песок) вводили в количестве 5 % от массы цемента (табл. 4).

Таблица 4

### Прочность песчаного бетона с наполнителем

| № п/п | Вид мельницы              | Удельная поверхность наполнителя, м <sup>2</sup> /кг | Количество наполнителя, % | Содержание С-3, % | Прочность бетона, МПа в возрасте 7 суток |            |
|-------|---------------------------|--|---------------------------|-------------------|--|------------|
|       |                           |  |                           |                   | при изгибе                               | при сжатии |
| 1     | пружинная                 | 200  | 5                         | 0,5               | 4,0                                      | 24,4       |
| 2     |                           | 400  |                           |                   | 4,3                                      | 26,4       |
| 3     |                           | 600  |                           |                   | 4,5                                      | 27,6       |
| 4     | вибро-шаровая (СМВ-0,005) | 200  | 5                         | 0,5               | 4,2                                      | 25,4       |
| 5     |                           | 400  |                           |                   | 4,4                                      | 28,8       |
| 6     |                           | 600  |                           |                   | 4,7                                      | 29,6       |
| 7     | вибрационная (СВМ-3)      | 200  | 5                         | 0,5               | 4,1                                      | 24,9       |
| 8     |                           | 400  |                           |                   | 4,4                                      | 25,2       |
| 9     |                           | 600  |                           |                   | 4,6                                      | 27,5       |

Из табл. 4 видно, что прочность песчаного бетона зависит от степени измельчения наполнителя. При увеличении степени помола с 200 до 600 м<sup>2</sup>/кг прочность увеличивается на 12-16 % в зависимости от вида мельницы. При этом наилучшие результаты по прочности, как на сжатие, так и при изгибе, имеют составы песчаного бетона с наполнителем, приготовленным в вибрационно-шаровой мельнице.

Наибольший прирост прочности наблюдается при испытании на изгиб, что говорит о лучшей степени взаимодействия наполнителя с продуктами гидратации цемента. Прочность на растяжение при изгибе больше в составах бетона с кварцевым песком, измельченным во второй и третьей мельницах, так как в составе такого наполнителя много мелких частиц и высока их активность по поглощению СаО. Уменьшение портландита в мелкозернистом бетоне приводит к повышению сцепления цементного камня с наполнителем, что позволяет увеличить прочность бетона на растяжение.

Таким образом, наиболее эффективен помол кварцевого песка в вибрационно-шаровых мельницах. При применении такого кварцевого наполнителя увеличивается прочность цементного камня и бетона.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л., Бродюженко О.М., Гарницкий Ю.В., Житковский В.В. Практическое бетоноведение в вопросах и ответах: Справочное пособие – СПб.: ООО «Строй-бетон», 2008. – 328 с.
2. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1972. – 239 с.
3. Липилин А.Б., Коренюгина Н.В., Векслер М.В. Инновационные технологии снижения расхода цемента в строительстве на основе использования сырьевых ресурсов Тульской области. Часть 1 // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2007, № 12. – С. 14-15.
4. Хохряков О.В., Хозин В.Г., М.И. Якупов, Красиникова Н.М., Сибгатуллин И.Р. Влияние ПАВ (суперпластификаторов и пенообразователей) на размолоспособность портландцемента и наполнителей // Науковий вісник будівництва – ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – Харків, вип. 59, 2010. – С. 78-90.
5. Кальгин А.А., Сулейманов Ф.Г. Лабораторный практикум по технологии бетонных и железобетонных изделий. – М.: Высшая школа, 1994. – 272 с.
6. Морозов Н.М., Хозин В.Г. Песчаный бетон высокой прочности // Строительные материалы, 2005, № 11. – С. 25-26.

### REFERENCES

1. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L., Brodugenko O.M., Garnicki Y.V., Gitkovski V.V. Practical Science about concrete in questions and answers: Help posobie./ – SPb.: Open Company «System-concrete», 2008. – 328 p.
2. Hodakov G. S. Thin crushing of building materials. – M: literature publishing house on building, 1972. – 239 p.
3. Lipilin A.B., Korenjugina N.V., Vexler M.V. Innovative technologies of decrease in the expense of cement in building on the basis of use of a source of raw materials of the Tula area. A part 1.//Building materials the equipment of technology of the XXI-st century, № 12, 2007. – P. 14-15.
4. Hohrjakov O. V, Hozin V. G, M.I.Jakupov, Krasinikova N.M., Sibgatullin I.R. Influence of surface-active substances (supersofteners and foaming agents) on Ability to a grinding cement and fillers//Scientific bulletin building – Kharkov, release 59, 2010. – P. 78-90.
5. Kalgin A.A., Sulejmanov F.G. Laboratory a practical work on technology of concrete and ferro-concrete products. – M: The higher school, 1994. – 272 p.
6. Morozov N.M., Hozin V.G. Sandy concrete of high durability // Building materials, 2005, № 11. – P. 25-26.