УДК 621.926.3

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСМЕМБРАТОРНОЙ МЕЛЬНИЦЫ СО ВСТРОЕННЫМ КЛАССИФИКАТОРОМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА АКТИВАЦИИ ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ

канд. техн. наук, доц. А.А. ГАРАБАЖИУ
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Рассматривается конструкция и принцип действия высокоэффективной дисмембраторной мельницы со встроенным классификатором. Представлена методика проведения экспериментальных исследований процесса активации цементного и гипсового вяжущих на базе данной мельницы. Показаны полученные по результатам экспериментальных исследований графические зависимости изменения прочности цементного (гипсового) камня от скорости обработки цемента (гипса) или песка и угла поворота жалюзи классификационной камеры при различных сроках твердения образцов. Выполнена математическая обработка результатов экспериментальных исследований.

Введение. В последние годы в странах бывшего Советского Союза отмечается значительный рост теоретических и экспериментальных исследований в области активации вяжущих материалов. Подобный интерес можно объяснить следующим образом. Срок годности любого вяжущего материала напрямую зависит от условия его хранения. Так, например, для обычных и высокомарочных цементов это 60 и 45 суток соответственно, а для гипсового вяжущего – не более 2 месяцев [1; 2]. Когда гарантийный срок хранения материала закончился, это не означает, что он полностью потерял все свои свойства. Вследствие истекшего срока хранения может произойти его слёживание, слипание частиц, частичная гидратация, и такой материал может показать более низкую прочность и пластичность в процессе эксплуатации – это одна из основных проблем большинства заводов по производству строительных материалов в Беларуси. В результате слеживания вяжущего материала для получения продукции той же прочности, что и при использовании нормального материала, необходимо увеличить его расход, а это повлечет за собой увеличение стоимости продукции и, следовательно, повлияет на ее конкурентоспособность.

Решение данной проблемы видится в использовании процесса активации для возвращения вяжущему материалу первоначальных свойств [3].

Активация или механоактивация – это процесс механической обработки твердых веществ, в результате которого происходит увеличение кривизны поверхности частичек, что влияет на их активность. В результате активации на месте разлома частичек образуются свободные ионы, стремящиеся объединиться. За счет этих ионов происходит увеличение прочности вяжущего материала после его твердения. Качество активации во многом зависит от типа выбранной машины, в которой данный процесс будет происходить. Существует три типа машин, которые используют для активации, – это машины ударного действия, машины истирающего действия и машины ударно-истирающего действия. Анализ современной научно-технической и патентной литературы показал, что наиболее эффективной и экономически целесообразной машиной для проведения процесса механической активации вяжущих материалов является дисмембратор или дезинтегратор [3]. Основными преимуществами машин данного типа являются небольшая мощность привода при большой удельной производительности, высокая степень обработки исходного материала и небольшой удельный расход энергии при его активации.

Описание конструкции и принципа действия дисмембраторной мельницы со встроенным классификатором. Для изучения процесса активации минеральных веществ на кафедре «Машины и аппараты химических и силикатных производств» Белорусского государственного технологического университета была разработана лабораторная установка дисмембраторного типа, основным элементом которой является дисмембраторная мельница со встроенным классификатором.

Дисмембраторная мельница со встроенным классификатором (рис. 1) состоит из корпуса *1* с размещенными в нем ротором *2* и статором *3*. На роторе *2* и статоре *3* располагаются пальцы *5*, периферийный ряд которых на роторе *2* заменен лопастями *4*, создающими поток воздуха, необходимый для уноса частиц из зоны помола. Устройство для выгрузки материала *7* выполнено в виде криволинейного патрубка *9*, размещенного в зазоре *10* между статором *3* и корпусом *1* и соединенного с загрузочным лотком *6* через окно *13*, а со статором *3* – через боковое отверстие *8*. Криволинейный патрубок *9* на вогнутой поверхности снабжен продольным отверстием *11*, перекрытым поворотными жалюзи *12*.

Материал через загрузочный лоток *6* попадает в рабочую зону дисмембратора под ударное воздействие пальцев *5* ротора *2* и статора *3*, где происходит его первоначальное измельчение. Затем под действием сил тяжести, центробежной силы и силы аэродинамического воздействия частицы проходят в зазоры между пальцами *5* и поступают на следующую ступень измельчения. При этом материал, проходя от центра дисмембратора к периферии, подвергается интенсивному нагружению, которое постепенно

возрастает за счет увеличения скорости движения лопастей *4* ротора *2* и уменьшения зазоров между пальцами *5* статора *3* на каждой последующей ступени измельчения. С последней (периферийной) ступени измельченный материал совместно с воздушным потоком через боковое отверстие *8* в статоре *3* попадает в устройство для выгрузки материала *7*, где при его движении по криволинейному патрубку *9* под действием центробежной силы происходит классификация частиц. Частицы большего размера, движущиеся по внешнему радиусу криволинейного патрубка *9*, через окно *13* попадают в загрузочный лоток *6* и возвращаются на доизмельчение, в то время как более мелкие частицы, движущиеся по внутреннему радиусу криволинейного патрубка *9*, проходя через продольное отверстие *11*, перекрытое поворотными жалюзи *12*, удаляются из дисмембратора. За счет изменения угла установки пластин жалюзи *12* происходит регулирование фракционного состава готового продукта и обеспечивается гарантированное получение измельченного материала с заданными характеристиками [4].

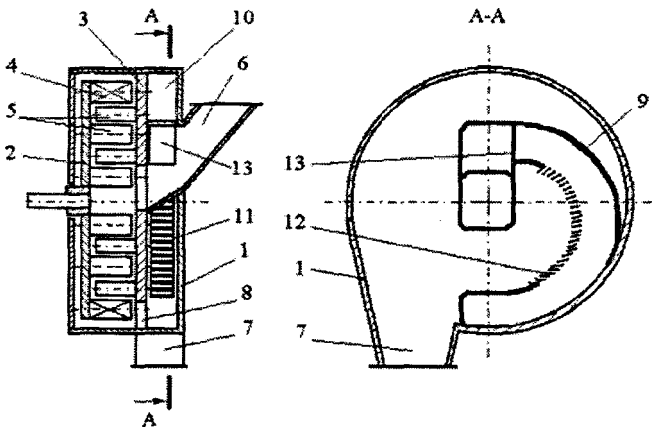

Рис. 1. Дисмембраторная мельница со встроенным классификатором

Методика проведения экспериментальных исследований

В рамках научно-исследовательской работы по активации минеральных веществ проводились *три серии экспериментальных исследований*:

1) активация слежавшегося цемента марки М500 с последующим добавлением необработанного песка;

2) активация песка с последующим добавлением необработанного цемента;

3) активация слежавшегося гипса марки Г-5.

Вначале цемент, гипс или песок пропускались через дисмембратор со встроенным классификатором (см. рис. 1) или без него при различных скоростях вращения ротора и различных углах поворота жалюзи классификационной камеры, где они подвергались дополнительному помолу и активации. После этого из обработанного материала делались опытные образцы, представляющие собой кубики с размерами 2×2×2 см.

При изготовлении опытных образцов использовались *три различные методики*:

1) в активированный цемент добавлялись необработанный песок в соотношении 1/3 соответственно и вода в водоцементном соотношении 0,4 и перемешивались в течение одной минуты;

2) в активированный песок добавлялись необработанный цемент в соотношении 3/1 соответственно и вода в водоцементном соотношении 0,5 и перемешивались в течение одной минуты;

3) в активированный гипс добавлялись 0,5 частей воды, перемешивались в течение одной минуты.

Полученные таким образом опытные образцы выдерживались в течение 3, 7 и 28 суток и подвергались дальнейшему испытанию на прочность на гидравлическом прессе МС-1000 [5; 6].

Опытные испытания дисмембраторной мельницы (см. рис. 1) проводились при угле поворота жалюзи классификационной камеры +30°, +15, 0° (радиальное направление), –15°, –30° и скоростях вращения ротора от 2500 до 4000 об/мин с шагом 500 об/мин.

Результаты экспериментальных исследований

Для проведения сравнительного анализа результатов экспериментальных исследований вначале были получены данные о прочности образцов, изготовленных из неактивированного цемента и гипса. Так, например, после 3-суточного твердения прочность неактивированного цемента составила 5,25 МПа, а прочность неактивированного гипса – 2,81 МПа. После 7- и 28-суточного твердения прочность не активированного цемента составила 7,23 и 10,32 МПа соответственно, а прочность неактивированного гипса – 4,23 и 5,01 МПа соответственно.

Основные результаты экспериментальных исследований были обработаны и представлены в виде графических зависимостей (рис. 2–10).

На рисунках 2–4 представлены зависимости изменения прочности цементного камня от скорости обработки цемента и угла поворота жалюзи при 3-, 7- и 28-суточном сроках твердения образцов соответственно.

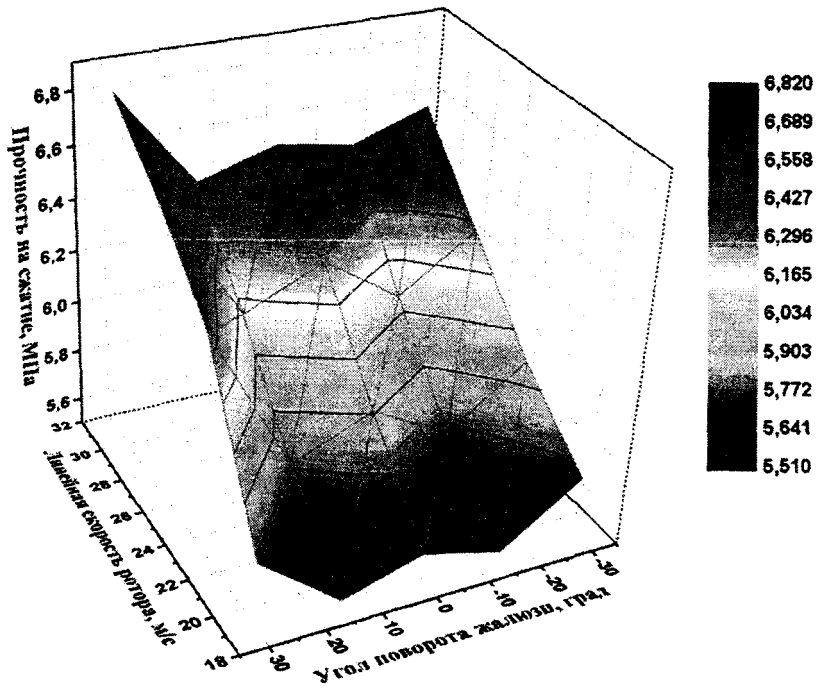

Рис. 2. Изменение прочности цементного камня в зависимости от скорости обработки цемента и угла поворота жалюзи при 3-суточном сроке твердения образцов

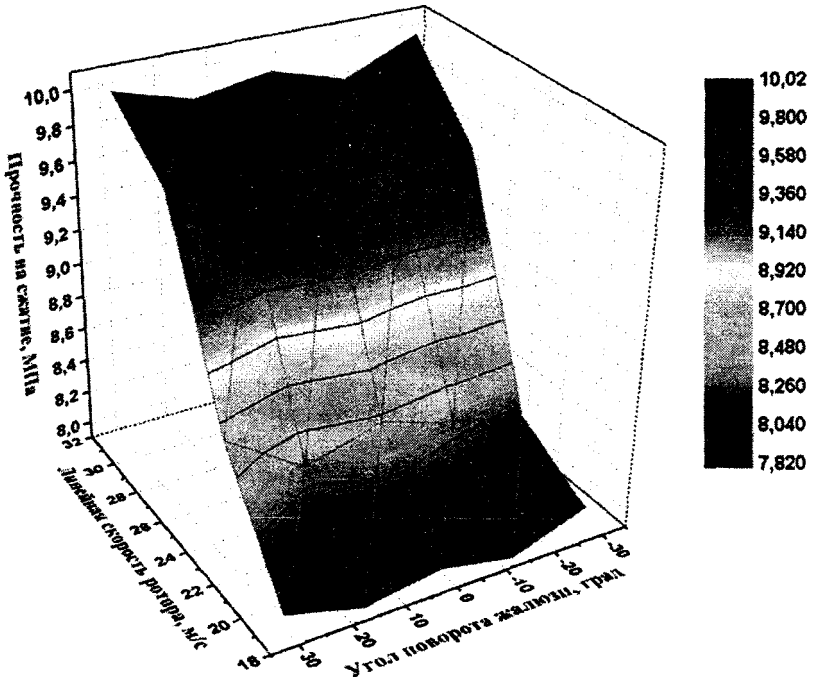

Рис. 3. Изменение прочности цементного камня в зависимости от скорости обработки цемента и угла поворота жалюзи при 7-суточном сроке твердения образцов

Максимальная прочность цементного камня (как видно из рисунков 2–3, и о чем свидетельствует рисунок 4) наблюдается при линейной скорости ротора дисмембратора 31,5 м/с (4000 об/мин) и угле поворота жалюзи классификационной камеры +30° независимо от срока твердения образцов. Для данной

частоты вращения ротора и при данном угле поворота жалюзи прочность образцов цементного камня из активированного цемента увеличилась по сравнению с образцами из исходного (неактивированного) цемента на 29,9, 38,6 и 39,3 % при 3-, 7- и 28-суточном сроке твердения образцов соответственно.

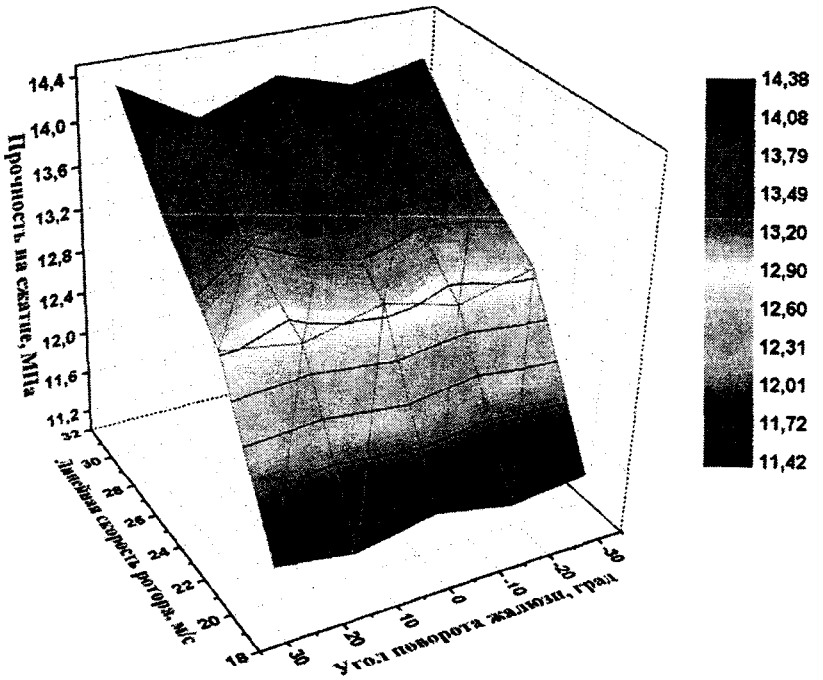

Рис. 4. Изменение прочности цементного камня в зависимости от скорости обработки цемента и угла поворота жалюзи при 28-суточном сроке твердения образцов

На рисунках 5–7 представлены зависимости изменения прочности цементного камня от скорости обработки песка и угла поворота жалюзи при 3-, 7- и 28-суточном сроках твердения образцов соответственно.

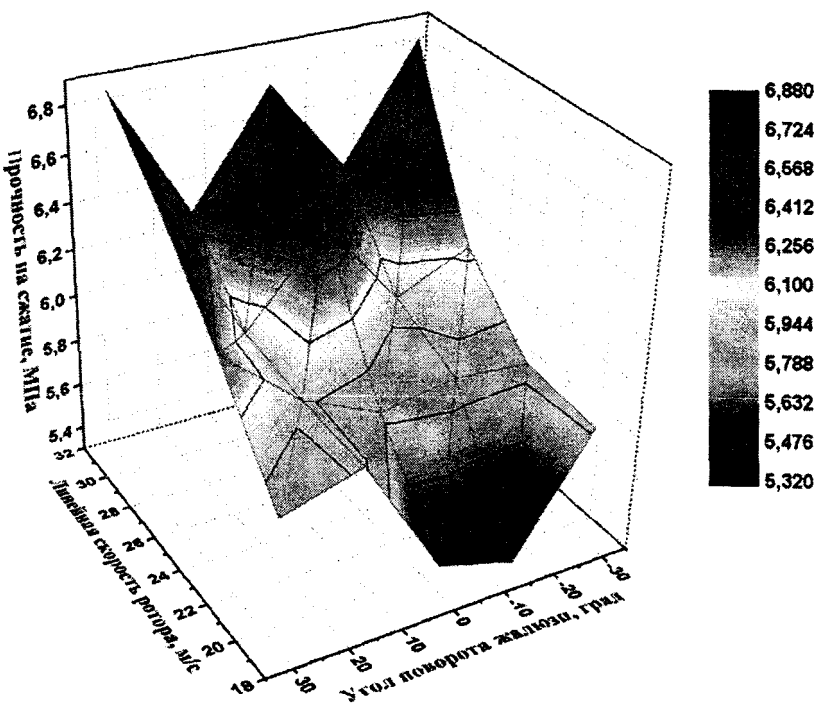

Рис. 5. Изменение прочности цементного камня в зависимости от скорости обработки песка и угла поворота жалюзи при 3-суточном сроке твердения образцов

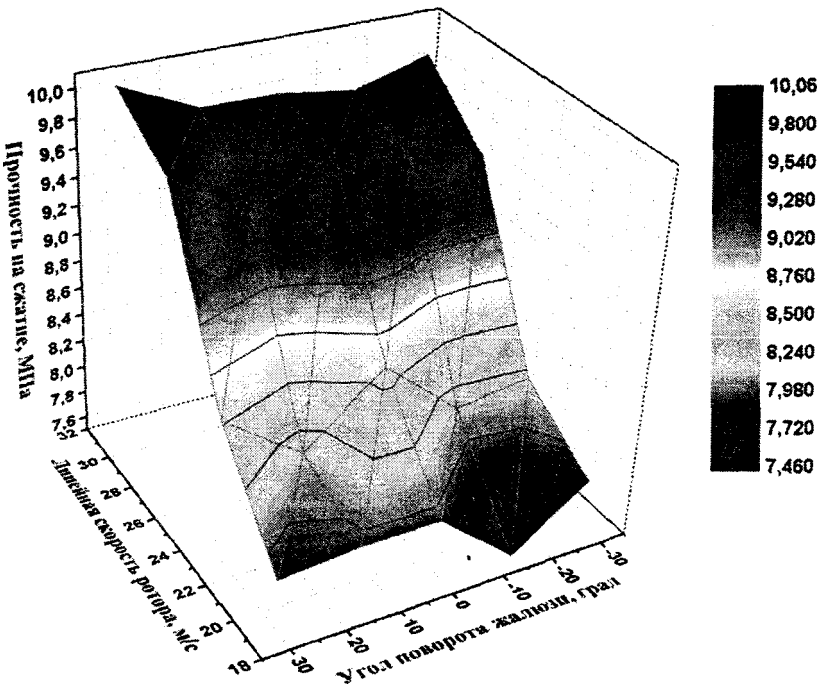

Рис. 6. Изменение прочности цементного камня в зависимости от скорости обработки песка и угла поворота жалюзи при 7-суточном сроке твердения образцов

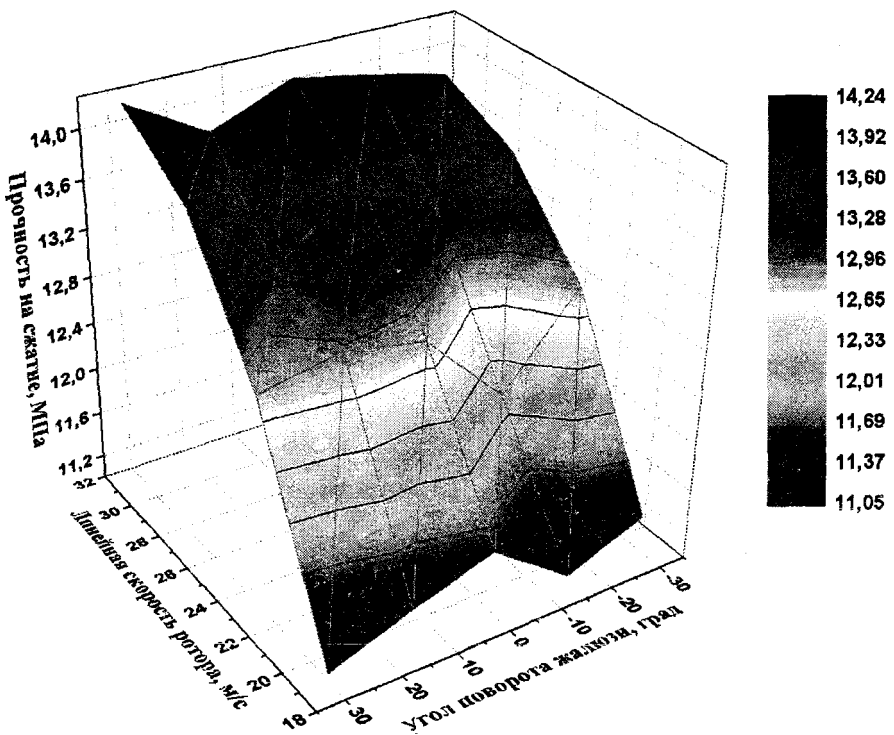

Рис. 7. Изменение прочности цементного камня в зависимости от скорости обработки песка и угла поворота жалюзи при 28-суточном сроке твердения образцов

Анализ зависимостей, представленных на рисунках 5–7, позволил сделать вывод, что максимальная прочность цементного камня наблюдается при линейной скорости ротора дисмембратора 31,5 м/с (4000 об/мин) и угле поворота жалюзи классификационной камеры +30° независимо от срока твердения образцов. Для данной частоты вращения ротора и при данном угле поворота жалюзи прочность образцов цементного камня из активированного песка увеличилась по сравнению с образцами из исходного (неактивированного) песка на 31,1, 39,1 и 38,8 % при 3-, 7- и 28-суточном сроке твердения образцов соответственно.

На рисунках 8–10 представлены зависимости изменения прочности гипсового камня от скорости обработки гипса и угла поворота жалюзи при 3-, 7- и 28-суточном сроках твердения образцов соответственно.

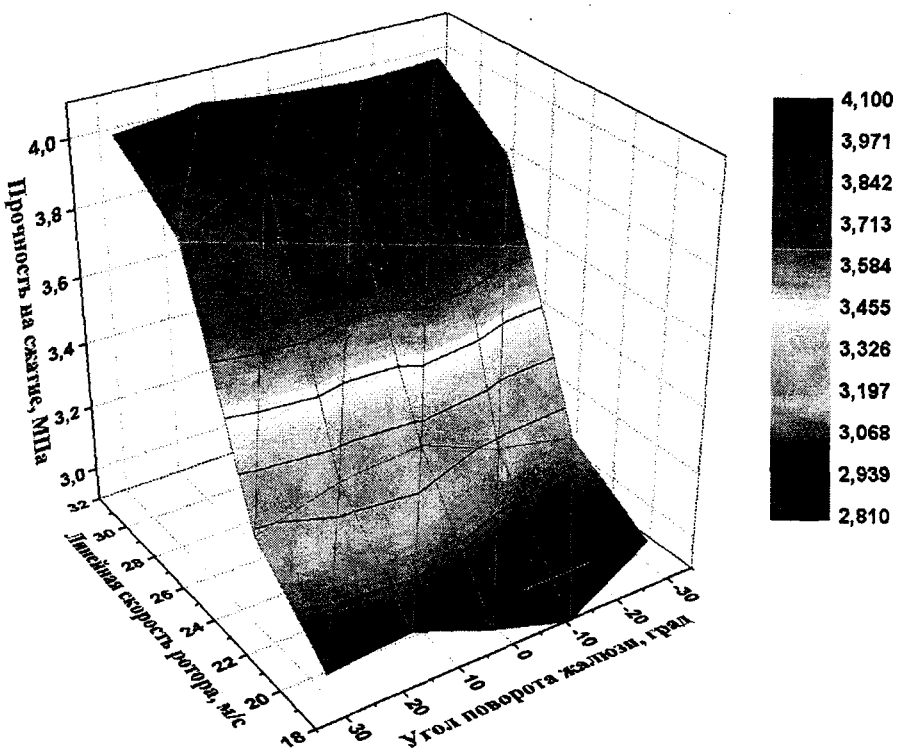

Рис. 8. Изменение прочности гипсового камня в зависимости от скорости обработки гипса и угла поворота жалюзи при 3-суточном сроке твердения образцов

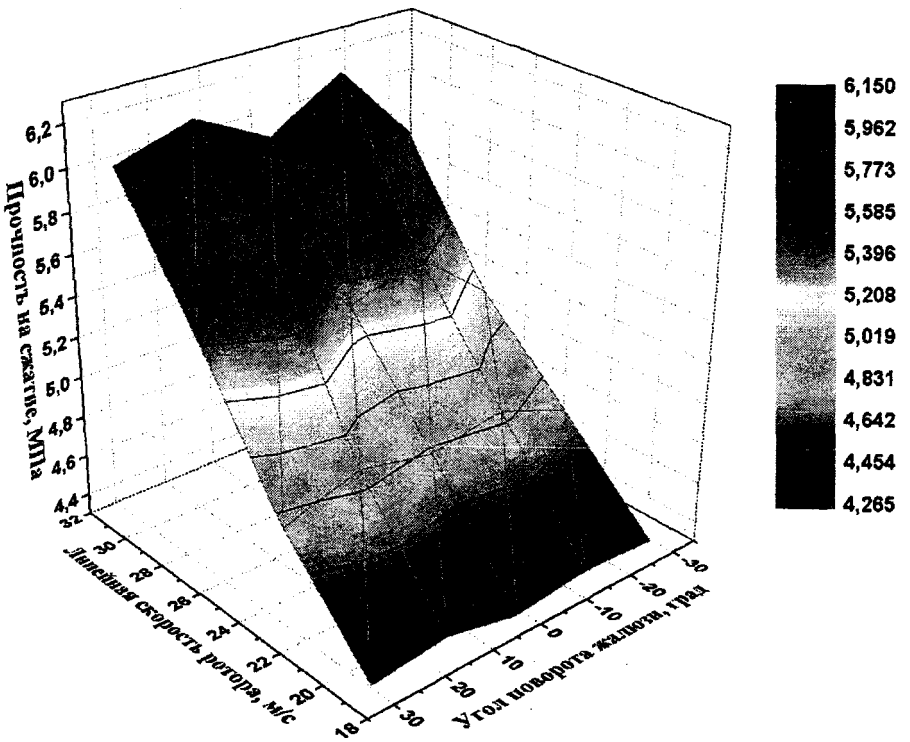

Рис. 9. Изменение прочности гипсового камня в зависимости от скорости обработки гипса и угла поворота жалюзи при 7-суточном сроке твердения образцов

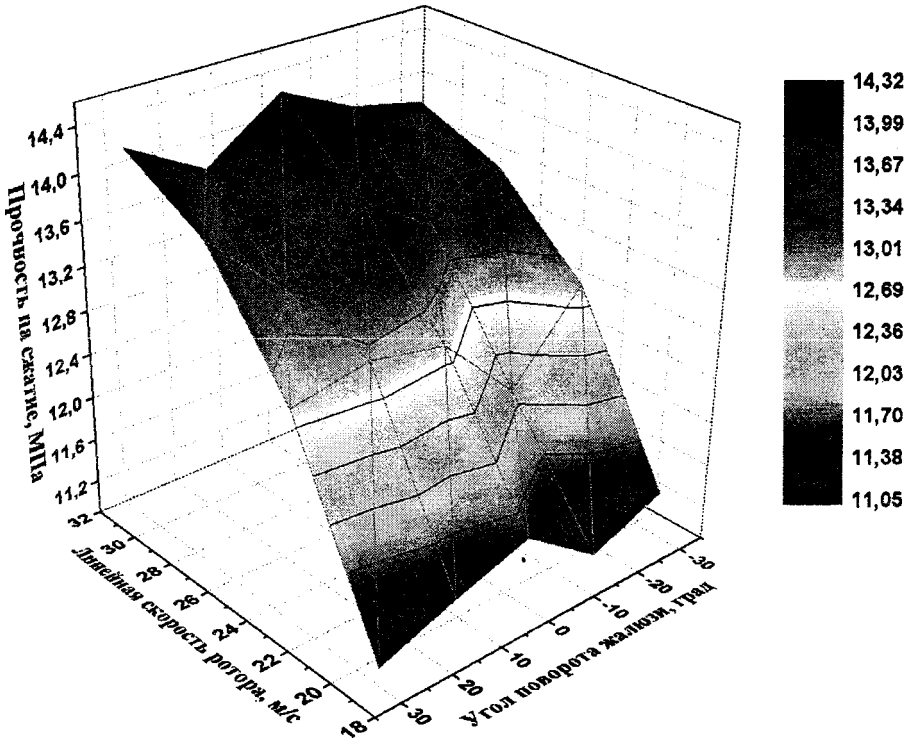

Рис. 10. Изменение прочности гипсового камня в зависимости от скорости обработки гипса и угла поворота жалюзи при 28-суточном сроке твердения образцов

Как видно из рисунков 8–10, максимальная прочность гипсового камня наблюдается при линейной скорости ротора дисмембратора 31,5 м/с (4000 об/мин) и угле поворота жалюзи классификационной камеры +15° независимо от срока твердения образцов. Для данной частоты вращения ротора и при данном угле поворота жалюзи прочность образцов гипсового камня из активированного гипса увеличилась по сравнению с образцами из исходного (не активированного) гипса на 44,1, 44,9 и 23,4 % при 3-, 7 и 28-суточном сроке твердения образцов соответственно.

Математическая обработка результатов экспериментальных исследований. Для дальнейшего практического использования результаты экспериментальных исследований были математически обработаны с целью установления аналитической зависимости между линейной скоростью ротора, углом поворота жалюзи классификационной камеры и прочностью образцов цементного или гипсового камня на сжатие при различных сроках его твердения. Ниже приведены зависимости, полученные после математической аппроксимации.

Зависимость прочности цементного камня (при использовании активированного цемента) после 3-суточного твердения от линейной скорости ротора и угла поворота жалюзи классификационной камеры:

$$\sigma = 7{,}26 - 0{,}39v - 0{,}31\varphi + 0{,}21v^2 + 0{,}0009\varphi^2 + 0{,}01v\,\varphi - 0{,}0003v^3 + 2{,}28\varphi^3 - 2{,}56v\,\varphi^2 - 0{,}0002v^2\varphi, \qquad (1)$$

где σ – прочность образца цементного камня на сжатие, МПа: v – линейная скорость ротора, м/с; φ – угол поворота жалюзи классификационной камеры, град.

Зависимость прочности цементного камня (при использовании активированного цемента) после 7-суточного твердения от линейной скорости ротора и угла поворота жалюзи классификационной камеры:

$$\sigma = 12871{,}08 + 375{,}86v^{0{,}5}\cdot\ln v + 2357{,}36\cdot(\ln v)^2 + \frac{1085{,}37v}{\ln v} - 10353{,}18v^{0{,}5} - 0{,}005\varphi - 0{,}0005\varphi^2 + 2{,}65\varphi^3 + 9{,}31e^{-\varphi}. \qquad (2)$$

Зависимость прочности цементного камня (при использовании активированного цемента) после 28-суточного твердения от линейной скорости ротора и угла поворота жалюзи классификационной камеры:

$$\sigma = 24030{,}52 - \frac{16856{,}15}{\ln v} + \frac{1042990{,}2}{\ln v^{1{,}5}} - \frac{1251875{,}4}{\ln v^2} + 6{,}03\varphi + 4{,}38\varphi^3 + 20677{,}08\cdot e^{\varphi/v} + 1{,}47e. \qquad (3)$$

Зависимость прочности цементного камня (при использовании активированного песка) после 3-суточного твердения от линейной скорости ротора и угла поворота жалюзи классификационной камеры:

$$\sigma = -53{,}11 - 0{,}23v\cdot\ln v + 55{,}45\cdot e^{v} - 0{,}0005\varphi^2 + 2{,}82\varphi^3 + 1{,}2e^{-\varphi}. \quad (4)$$

Зависимость прочности цементного камня (при использовании активированного песка) после 7-суточного твердения от линейной скорости ротора и угла поворота жалюзи классификационной камеры:

$$\sigma = 18147{,}79 - 17{,}44\,v^{1,5} + 1765{,}32\cdot e^{v} - 342{,}79(\ln v)^2 + \frac{743{,}39v}{\ln v} + 6{,}71\varphi + 4{,}52\varphi^3 - 21124{,}28\cdot e^{\varphi} + 1{,}69\cdot e^{-\varphi}. \quad (5)$$

Зависимость прочности цементного камня (при использовании активированного песка) после 28-суточного твердения от линейной скорости ротора и угла поворота жалюзи классификационной камеры:

$$\sigma = 14466{,}34 - \frac{111645{,}36\cdot\ln v}{v} + \frac{580142{,}56}{v} - \frac{1469692{,}9}{v^{1,5}} + \frac{1354666{,}1}{v^2} + 6{,}33\varphi + 5{,}25\varphi^3 - 13693{,}71e^{\varphi} + 2{,}28e^{-\varphi}. \quad (6)$$

Зависимость прочности гипсового камня (при использовании активированного гипса) после 3-суточного твердения от линейной скорости ротора и угла поворота жалюзи классификационной камеры:

$$\sigma = -40{,}6 + \frac{3420{,}528}{v} - 0{,}0003\varphi - \frac{85013{,}07}{v^2} - 0{,}0003\varphi^2 + \frac{0{,}06\varphi}{v} + \frac{678911{,}08}{v^3} - 1{,}85\varphi^3 + \frac{0{,}006\varphi^2}{v} + \frac{0{,}007\varphi}{v^2}. \quad (7)$$

Зависимость прочности гипсового камня (при использовании активированного гипса) после 7-суточного твердения от линейной скорости ротора и угла поворота жалюзи классификационной камеры:

$$\sigma = -1906{,}2 - 147{,}55v + 66{,}97v\ln v - 7{,}72v^2 + 1{,}35v^2\ln v - 1{,}69\varphi - 2{,}92\varphi^3 + 2318{,}87e^{\varphi} - 1{,}11e^{-\varphi}. \quad (8)$$

Зависимость прочности гипсового камня (при использовании активированного гипса) после 28- суточного твердения от линейной скорости ротора и угла поворота жалюзи классификационной камеры

$$\sigma = 16664{,}55 - \frac{129141{,}98\ln v}{v} + \frac{670422{,}92}{v} - \frac{1696020{,}2}{v^{1,5}} + \frac{1560181{,}6}{v^2} + 7{,}29\varphi + 5{,}99\varphi^3 + 15768{,}51e^{\varphi} + 2{,}56e^{-\varphi}. \quad (9)$$

Расхождение прочности цементного (гипсового) камня при использовании активированного цемента (гипса) или песка, определяемой при помощи зависимостей (1)–(9), от результатов, представленных на рисунках 2–10, составляет 5...7 %.

Заключение. По результатам комплексных экспериментальных исследований процесса активации цементного вяжущего и песка в дисмембраторной мельнице со встроенным классификатором можно сделать следующие выводы:

- для получения максимальной прочности образцов цементного камня при активации цемента или песка оптимальная скорость вращения ротора дисмембратора должна составлять 31,5 м/с (4000 об/мин), угол поворота жалюзи классификационной камеры должен быть +30°, а оптимальное время твердения образцов – 28 или 7 суток соответственно;

- при оптимальной скорости вращения ротора дисмембратора 31,5 м/с (4000 об/мин), угле поворота жалюзи классификационной камеры +30° и после 28-суточного твердения максимальное увеличение прочности образцов цементного камня из активированного цемента по сравнению с образцами из исходного (неактивированного) цемента составляет 39,3 %;

- при оптимальной скорости вращения ротора дисмембратора 31,5 м/с (4000 об/мин), угле поворота жалюзи классификационной камеры +30° и после 7-суточного твердения максимальное увеличение прочности образцов цементного камня из активированного песка по сравнению с образцами из исходного (неактивированного) песка составляет 39,1 %;

- для получения максимальной прочности образцов гипсового камня при активации гипса оптимальная скорость вращения ротора дисмембратора должна составлять 31,5 м/с (4000 об/мин), угол поворота жалюзи классификационной камеры должен быть +15°, оптимальное время твердения образцов – 7 суток;

- при оптимальной скорости вращения ротора дисмембратора 31,5 м/с (4000 об/мин), угле поворота жалюзи классификационной камеры +15° и после 7-суточного твердения максимальное увеличение прочности образцов гипсового камня из активированного гипса по сравнению с образцами из исходного (неактивированного) гипса составляет 44,9 %;

- получены аналитические зависимости прочности цементного (при использовании активированного цемента или песка) и гипсового камня после различных сроков твердения от линейной скорости ротора и угла поворота жалюзи классификационной камеры дисмембратора, погрешность которых от приведенных экспериментальных данных не превышает 5...7 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хинт, Й.А. Основы производства силикальцитных изделий / Й.А. Хинт. – М.: Госстройиздат, 1962. – 134 с.
2. Вяжущие гипсовые. Технические условия: ГОСТ 125-79. – Введ. 01.07.80. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1981. – 14 с.
3. Молчанов, В.И. Активация минералов при измельчении / В.И. Молчанов, О.Г. Селезнева, Е.Н. Жирнов. – М.: Недра, 1988. – 208 с.
4. Дисмембратор со встроенным классификатором: пат. 7952 МПК7 В 02 С 13/22 / В.Ю. Мурог, П.Е. Вайтехович; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № а 20030154; заявл. 24.02.2003; опубл. 30.09.04 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 2. – С. 55.
5. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии: ГОСТ 310.4-81. – Введ. 01.07.83. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1992. – 31 с.
6. Вяжущие гипсовые. Методы испытаний: ГОСТ 23789-79. – Введ. 01.07.80. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1986. – 26 с.

Поступила 18.01.2014

DEMONSTRATE HOW DISMEMBRATORNOY MILLS WITH INTEGRATED QUALIFIER FOR RESEARCH OF ACTIVATION CEMENTITIOUS MATERIALS

A. GARABAZHIU

This article describes the design and operation of high performance dismembratornoy mill with integrated classifier. Describes the methodology of experimental studies of the activation process of cement and gypsum binders based on this mill. The results of experimental studies have provided a graph of changes in the strength of the cement (gypsum) stone on the processing speed of cement (gypsum) or sand and angle of the camera shutters classification under different terms of curing samples. A mathematical treatment of the results of experimental studies.