

Уваров В. А., д-р техн. наук, проф.,  
 Шаптала В. Г., д-р техн. наук, проф.,  
 Шаптала В. В., канд. техн. наук, доц.,  
 Обчинников Д. А., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ МЕХАНОАКТИВАЦИИ ЦЕМЕНТА

v\_a\_uvarov@mail.ru

Использование цемента во многих случаях происходит нерационально. Одной из причин перерасхода цемента в строительстве является невысокая изначальная марочность цемента и снижение его активности вследствие неправильного или продолжительного хранения.

Перспективным направлением снижения расхода цемента и повышения экономической эффективности его использования является механическая активация рядового низкомарочного и лежалого цемента непосредственно при производстве строительных и бетонных смесей.

Тонкое доизмельчение и активация вяжущих материалов возможны только в высоконагруженных агрегатах, к которым относится и разработанная установка для пневматической механоактивации цемента. В данной установке механоактивация материала происходит в результате свободного удара частиц, находящихся в высокоскоростных двухфазных струях о преграду, в качестве которой используется насыпной слой клинкера, а также вследствие истирания частиц и приводит к существенному повышению его дисперсности, улучшению качества поверхности частиц, а в итоге – повышению активности цемента.

**Ключевые слова:** марочность, активность, пневматическая механоактивация, свободный удар, клинкер.

Несмотря на высокую стоимость использование цемента во многих случаях нерационально. Одной из причин перерасхода цемента в строительстве и в производстве строительных материалов и изделий является невысокая изначальная марочность цемента и снижение его активности вследствие неправильного или продолжительного хранения.

Перспективным направлением снижения расхода цемента и повышения экономической эффективности его использования является механическая активация рядового низкомарочного и лежалого цемента непосредственно при производстве строительных и бетонных смесей.

Тонкое доизмельчение и активация вяжущих материалов возможны только в высоконагруженных агрегатах [1,2], к которым отно-

сится и разработанная установка для пневматической механоактивации цемента [3]. В данной установке механоактивация материала происходит в результате свободного удара частиц, находящихся в высокоскоростных двухфазных струях о преграду, в качестве которой используется насыпной слой клинкера. Отражательный слой клинкера является не только элементом рабочей среды, но и служит футеровкой рабочей камеры установки. Износ такой футеровки не только не загрязняет готовый продукт, а напротив, обогащает его наиболее активными тонкодисперсными частицами остроугольной осколочной формы.

Схема установки приведена на рис. 1.

Схема рабочей камеры установки приведена на рис. 2.

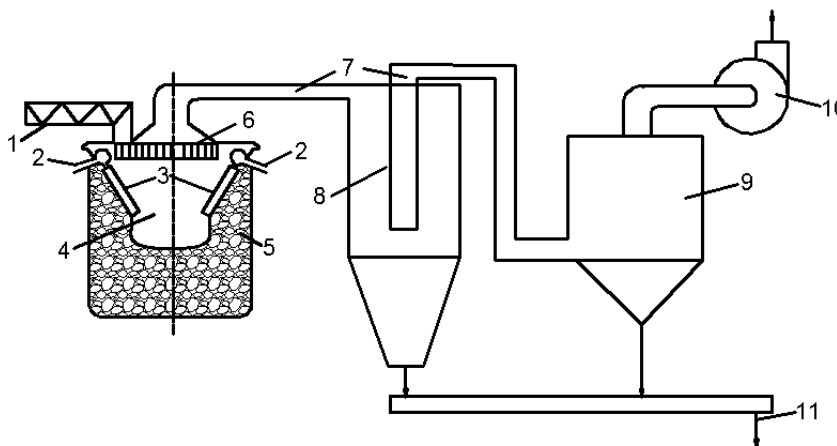


Рис. 1. Схема установки для пневматической механоактивации цемента:

1 – материалопровод исходного цемента; 2 – эжекторы; 3 – разгонные трубки; 4 – рабочая камера; 5 – клинкер; 6 – сепаратор; 7 – воздуховоды; 8 – циклон; 9 – рукавный фильтр; 10 – вентилятор; 11 – выход готового продукта

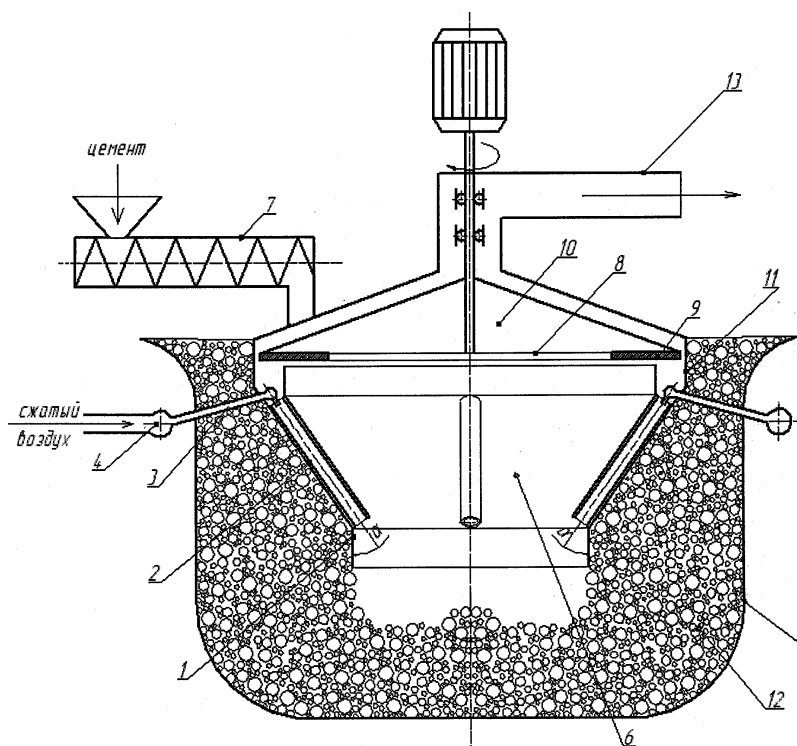


Рис. 2. Схема рабочей камеры установки для пневмоструйной механоактивации цемента

1 – внутренний корпус; 2 – разгонные трубки; 3 – сопла; 4 – коллектор, соединяющий сопла; 5 – внешний корпус; 6 – рабочая камера; 7 – шнековый дозатор; 8 – ротор-классификатор; 9 – разбрасывающая тарель; 10 – отбойные лопасти; 11 – отбойная футеровка; 12 – слой клинкера; 13 – патрубок отвода готового продукта

Установка работает следующим образом: сжатый воздух подается в коллектор 4 и поступает через сопла 3 в четыре разгонные трубки 2. Цемент шнековым дозатором 7 подается на разбрасывающую тарель 9 и сбрасывается в зону всасывания струй, истекающих из сопел. Частицы цемента, смешавшись с рабочим и инжектируемым воздухом, ускоряются в разгонных трубках и сталкиваются со слоем клинкера. В результате взаимодействия высокоскоростных газоматериальных струй с зернистым слоем клинкера происходит ударно-истирающая механоактивация цемента, который восходящим потоком воздуха подается в зону действия центробежного сепаратора. В результате сепарации крупные частицы возвращаются на домол и повторную активацию, а готовый продукт поступает в систему пылеосаждения и газоочистки. Рабочие параметры опытно-промышленной установки имеют следующие значения: диаметр корпуса рабочей камеры – 0,5 м, его высота – 1 м, диаметр сопел – 4 мм, давление сжатого воздуха – 0,6 МПа, диаметр разгонных трубок 16-24 мм, угол между трубками и осью камеры  $\alpha=15-32^\circ$ , частота вращения ротора сепаратора 500-1500 об/мин, производительность установки – 100 кг/час, удельный расход энергоносителя –  $2 \text{ м}^3/\text{кг}$ , тонкость готового продукта регулируется сепаратором от 300 до  $500 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Рассмотренная выше конструкция пневматического активатора цемента позволяет в полной мере реализовать преимущества струйного способа активации:

- использование наиболее эффективного комбинированного ударно-отражательного и истирающего воздействия, позволяющего при сравнительно невысоком помольном эффекте получать частицы осколочной, остроугольной формы, а также модифицировать поверхность частиц цемента без изменения их крупности (удаление поверхностных пленок, образование на старых и свежих поверхностях центров химической активности в виде структурных дефектов);
- возможность получения высокой энергонапряженности и эффективности процесса механоактивации;
- возможность плавного регулирования дисперсных характеристик готового продукта;
- минимальный абразивный износ частей установки и практически полное отсутствие загрязнения готового продукта посторонними примесями;
- быстрый отвод выделяемой при механоактивации теплоты, позволяющий избежать перегрева готового продукта;
- струйная механоактивация цемента позволяет исключить переизмельчение и агрегацию его частиц;

– низкая металлоемкость установки, минимальное количество движущихся частиц, что позволяет увеличить продолжительность межремонтных периодов;

– низкая интенсивность технологических пылевыведений, позволяющая уменьшить потери готового продукта и снизить загрязнение производственной и окружающей среды.

На эффективность процесса механоактивации существенное влияние оказывают физико-механические свойства цемента и отражательно-го слоя клинкера. Цемент представляет собой полидисперсную многокомпонентную систему, содержащую частицы клинкера, гипса и шлака. Наиболее прочным из них являются частицы клинкера, поэтому ниже будут рассматриваться только они. Плотность клинкерных частиц равна  $\rho_{\tau}=3000$  кг/м<sup>3</sup>. Обычные рядовые цементы имеют остаток на сите N<sub>008</sub>  $\delta$  – 5%, что соответствует удельным поверхностям от 250 до 300 м<sup>2</sup>/кг [4]. Их гранулометрический состав с приемлемой для инженерных расчетов точностью подчиняется закону Розина-Раммлера [5]:

$$R(d) = \exp\left[-\left(\frac{d}{d'}\right)^n\right], \quad (1)$$

$$D(d) = 1 - R(d) \quad (2)$$

с параметрами  $d' = 25-30$  мкм и  $n = 0.8 - 0.9$ , где  $R(d)$ ,  $D(d)$  – интегральные функции распределения частиц цемента по остатку к проходу,  $d$  – эквивалентный по объему размер частиц:

$$d = \sqrt[3]{\frac{6V_q}{\pi}}. \quad (3)$$

Здесь  $V_q$  – объем частиц,  $d'$  – характеристический размер частиц, определяющий размер ячеек сита с остатком 36,8%,  $n$  – коэффициент равномерности распределения частиц по размерам.

Обобщенной характеристикой дисперсности цемента является его удельная поверхность  $S_{y0}$ , величину которой можно найти экспериментально методом воздухопроницаемости или оценить расчетным путем с помощью формулы:

$$S_{y0} = \frac{6}{\rho_m} \sum_{i=1}^n \frac{f_i}{\bar{d}_i} \quad (4)$$

где  $f_i$  – содержание  $i$ -ой фракции цемента в долях единицы,  $\bar{d}_i$  – средний размер частиц  $i$ -ой фракции, м.

Удельная поверхность цемента (м<sup>2</sup>/кг) может быть приближенно найдена по параметрам его зернового распределения с помощью следующей формулы [6]:

$$S_{y0} = 3,54 \cdot 10^5 \left[ \left( \frac{\ln R_0}{20} \right)^{\frac{1}{n}} d' \right]^{\frac{1}{m}}, \quad (5)$$

где  $R_0 = 100$ ,  $m = 0.54$ .

Опытным путем установлено, что качество цемента и, в первую очередь, его марочная прочность, определяется не только удельной поверхностью, но и относительным содержанием отдельных фракций.

В частности, частиц меньше 5 мкм должно быть не более 20%, частиц с размерами 5-20 мкм – 40-45%, содержание частиц с размером больше 80 мкм не должно превышать 4%. В этом случае цемент с удельной поверхностью 280-300 м<sup>2</sup>/кг может показать при испытаниях марку 700.

Фракция 5-30мкм определяет прочность цементного камня в поздние сроки твердения, фракция <5мкм – ранние. Оптимальное отношение содержания этих фракций близко к 2:

$$\frac{R(5) - R(30)}{1 - R(5)} = 1,9 \pm 0,1.$$

Геометрическими характеристиками отражательного слоя клинкера являются его размеры (площадь, толщина), средний размер зерна ( $d_3 \approx 0.02$  м), пористость. Пористость клинкерного слоя  $\varepsilon$ , т.е. объемная доля незаполненного зернами пространства слоя, определяется соотношением:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_n}{\rho_k}, \quad (6)$$

где  $\rho_n$ ,  $\rho_m$  – насыпная и истинная плотность клинкера.

Установлено [7], что пористость зернистого слоя приближенно равна относительной доле живого сечения слоя, практически не зависит от размера зерен и составляет для клинкера  $\varepsilon \approx 0,45$ .

Гидравлическое сопротивление отражательного слоя клинкера можно оценить с помощью формулы Эргана [7]:

$$\Delta P_{кл} = \left( 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu w}{d^2} + 1.75 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^2} \frac{\rho w^2}{d_s} \right) H \quad (7)$$

где  $w = G_g / (\rho \varepsilon S_k)$  – средняя скорость воздуха в клинкерной насадке,  $H$  – средняя высота клинкерного слоя:  $H = V_k / S_k$ ,  $V_k$  – объем клинкера,  $S_k$  – площадь поперечного сечения рабочей камеры,  $\mu$ ,  $\rho$  – динамическая вязкость и плотность воздуха. Экспериментальные исследования показывают, что зернистые слои вблизи стенок аппаратов на расстояниях от них до 3-5 средних размеров зерна из-за трения имеют повышенную на 20-60% пористость, что может привести к вы-

биванию запыленного воздуха из клинкерной насадки.

Механическая активация частиц цемента происходит в результате их ударного взаимодействия с зернами клинкера, а также вследствие истирания частиц. Ударное взаимодействие включает в себя:

- прямые удары крупных частиц;
- косые (скользящие) удары более мелких частиц, приводящие к скалыванию их углов и выступов.

Истирание (абразивный износ) частиц происходит в результате их многочисленных касательных взаимодействий с зернами клинкера. Таким образом, механоактивация цемента всегда связана с его доизмельчением, поэтому в качестве количественной характеристики её эффективности можно рассматривать прирост удельной поверхности цемента. Но вместе с увеличением удельной поверхности цемента происходит существенное улучшение качества поверхности частиц, приводящее к повышению активности цемента. Однако, этот аспект механоактивации трудно поддается формализации и количественной оценке, поэтому наряду с приростом удельной поверхности, в качестве обобщенного комплексного показателя эффективности механоактивации используется также прирост прочности на сжатие  $R_{сж2}$  и  $R_{сж28}$  специально приготовленных образцов.

Механические разрушения в частицах и зернах клинкера, приводящие к увеличению дисперсности цемента, возможны лишь при возникновении в них в результате удара разрушающего напряжения, которое для клинкера равно  $\sigma \approx 10^8$  Па. Скорость соударения  $v_p$ , достаточную для создания такого напряжения оценим с помощью закона сохранения энергии [8].

Пренебрегая энергозатратами на пластическое деформирование, получим:

$$\frac{mv_p^2}{2} = A_{y\partial}, \quad (8)$$

где  $A_{y\partial}$  – работа упругой деформации частицы:

$$A_{y\partial} = \sigma_p f_k \Delta d. \quad (9)$$

Здесь  $f_k$  – площадь контакта частицы с зерном клинкера:

$$f_k = \kappa d^2, \quad (10)$$

где  $\kappa < 1$  – эмпирический коэффициент,  $d$  – размер частицы,  $\Delta d$  – величина ее деформации. Считая форму частицы сферической, из уравнений (8-10), получим:

$$\frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_m \frac{v_p^2}{2} = \kappa \sigma_p d^3 \varepsilon, \quad (11)$$

где  $\varepsilon = \Delta d/d$  – относительная деформация частицы, которая по закону Гука равна:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_p}{E}. \quad (12)$$

Здесь  $E \approx 10^{10}$  Па – модуль упругости клинкера. Из уравнения (11) с учетом формулы (12) получим:

$$v_p = \sqrt{\frac{12\kappa\sigma_p^2}{\pi\rho_mE}} \leq 36 \text{ м/с}. \quad (13)$$

Экспериментально установлено [9], что в струйных агрегатах при ударном разрушении частицы около 10% её объема переходят в частицы продукта измельчения, размер которых в 8-10 раз меньше размера исходной частицы. Рассмотрим, как в этом случае возрастает удельная поверхность материала. Будем считать, что все вновь образовавшиеся частицы имеют одинаковый размер. Тогда из условия сохранения массы материала получим уравнение:

$$\gamma \frac{\pi d_u^3}{6} = n \frac{\pi d_n^3}{6}, \quad (14)$$

где  $\gamma = 0,1$  – доля объема исходной частицы, которая переходит в частицы продукта измельчения;  $n$  – число вновь образовавшихся частиц;  $d_u$ ,  $d_n$  – размеры исходной и новых частиц.

Из уравнения (14) следует соотношение:

$$n = \gamma I^3. \quad (15)$$

где  $I = d_u/d_n = 8-10$  – степень мельчания.

Площадь поверхностей вновь образовавшихся частиц продукта измельчения равна:

$$S_{np} = \mathcal{I}^3 \pi d_n^2 = \mathcal{I} S_u, \quad (16)$$

где  $S_u = \pi d_u^2$  – площадь поверхности исходной частицы. Размеры  $d_n$  и площадь поверхности  $S_n$  новой частицы, которая образуется вместо исходной, после отделения мелких частиц продукта измельчения, соответственно равны:

$$d_n = \sqrt[3]{1 - \gamma} d_u, \quad S_n = (1 - \gamma)^{2/3} S_u. \quad (17)$$

Прирост поверхности в результате разрушения исходной частицы равен:

$$\Delta S = S_n + S_{np} - S_u = \left[ (1 - \gamma)^{2/3} + \mathcal{I} - 1 \right] S_u. \quad (18)$$

Поскольку масса материала в результате разрушения исходной частицы не изменяется, то такое же соотношение имеет место и для удельных поверхностей. Таким образом, относительный прирост удельной поверхности в результате ударного разрушения частиц равен:

$$\frac{\Delta S_{y\partial}}{S_{y\partial}^u} = (1 - \gamma)^{2/3} + \mathcal{I} - 1 = (0,732 - 0,932), \quad (19)$$

т.е. удельная поверхность возрастает на 73-93%.

Прирост удельной поверхности материала возрастает с увеличением доли разрушаемого

объема частицы  $\gamma$  и степени измельчения  $I$ . Величины  $\gamma$  и  $I$  трудно поддаются экспериментальному определению, поэтому соотношение (19) носит ориентировочный характер. Для его уточнения оценим наибольший возможный прирост удельной поверхности частицы на основе энергетического подхода [9].

Будем считать, что кинетическая энергия частицы за вычетом энергозатрат на её упругое деформирование расходуется на образование новой поверхности. Тогда получим:

$$\frac{m}{2}(\nu^2(d) - \nu_p^2) = K \cdot \Delta S(d), \quad (20)$$

где  $\nu_p=36$  м/с – разрушающая скорость частицы,  $\nu(d)$  – её фактическая скорость ( $\nu(d) > \nu_p$ ),  $K=5,5$  Дж/м<sup>2</sup> – удельные энергозатраты на образование новой поверхности. Разделив обе части уравнения (20) на  $m$ , получим:

$$\Delta S_{y\delta}(d) = \frac{\nu^2(d) - \nu_p^2}{2K} \quad (21)$$

Однако, в реальных условиях ударно-истирающему взаимодействию с клинкерной засыпкой подвергаются лишь частицы размером  $d \geq d_p$ , скорость которых  $\nu(d) > \nu_p$ .

Будем считать, что зерновой состав цемента, поступающего в рабочую камеру активатора, подчиняется закону Розина-Раммлера. Тогда относительная массовая доля частиц, испытывающих ударные разрушения, равна:

$$R_1(d_p) = \exp \left[ - \left( \frac{d}{d'_1} \right)^{n_1} \right]. \quad (22)$$

Здесь  $R_1$ ,  $d'_1$  и  $n_1$  – параметры зернового состава цемента до его активации.

Критический размер частиц  $d_p$  делит поступающий в рабочую камеру цемент на неактивируемую ( $d < d_p$ ) и активируемую фракции со своими фракционными удельными поверхностями  $S_{y\delta}^{na}$  и  $S_{y\delta}^a$ , которые связаны с удельной поверхностью исходного цемента  $S_{y\delta}^u$  соотношением:

$$S_{y\delta}^u = (1 - R_1(d_p)) S_{y\delta}^{na} + R_1(d_p) S_{y\delta}^a. \quad (23)$$

Фракционные удельные поверхности связаны со средними фракционными размерами частиц:

$$S_{y\delta}^{na} = \frac{6}{\rho_m d_{cp}^{na}}, \quad S_{y\delta}^a = \frac{6}{\rho_m d_{cp}^a}. \quad (24)$$

При взаимодействии газоматериальных струй с клинкерной засыпкой неактивируемая фракция не меняется, а более грубодисперсная активируемая часть цемента доизмельчается в результате чего её удельная поверхность возрастает и достигает значения  $S_{y\delta}^a + \Delta S$ . А так как массовые доли активируемой и неактивируемой фракции остаются прежними, то для удельной поверхности активированного цемента в целом  $S_{y\delta}^a$  получим соотношение:

тает и достигает значения  $S_{y\delta}^a + \Delta S$ . А так как массовые доли активируемой и неактивируемой фракции остаются прежними, то для удельной поверхности активированного цемента в целом  $S_{y\delta}^a$  получим соотношение:

$$S_{y\delta}^a = (1 - R_1(d_p)) S_{y\delta}^{na} + R_1(d_p) (S_{y\delta}^a + \Delta S_{y\delta}). \quad (25)$$

В качестве примера рассмотрим механоактивацию в опытно-промышленной установке низкомарочного цемента с дисперсными характеристиками:  $S_{y\delta}^u = 2100 \frac{см^2}{г} = 210 \frac{м^2}{кг}$ ,  $d'_1=35$  мкм,  $n=0.8$ .

Разрушающую скорость  $\nu_p=36$  м/с имеют частицы размером  $d_p=20$  мкм. Тогда содержание неактивируемой ( $d < 20$  мкм) и активируемой ( $d > 20$  мкм) исходного цемента соответственно равны:

$$1 - R_1(20) = 0,472; \quad R_1(20) = 0,528;$$

а для средних размеров частиц получим:

$$d_{y\delta}^{na} = 5,2 \text{ мкм}, \quad d_{cp}^a = 36 \text{ мкм}.$$

Удельные поверхности неактивируемой и активируемой частей исходного цемента имеют следующие значения:

$$S_{y\delta}^a = 382,8 \frac{м^2}{кг}, \quad S_{y\delta}^{na} = 55,6 \frac{м^2}{кг}.$$

Средняя скорость соударений частиц активируемой части цемента с зёрнами клинкера равна:  $\nu(36)=46$  м/с.

Прирост удельной поверхности активируемой части цемента находим по формуле (21):

$$\Delta S_{y\delta} = \frac{46^2 - 36^2}{11} = 74,5 \frac{м^2}{кг}.$$

Удельная поверхность активированного цемента согласно формулы (25) равна:

$$S_{y\delta}^a = 0,472 \cdot 382,8 + 0,528(55,6 + 74,5) = 249,4 \frac{м^2}{кг},$$

Т.е. за один цикл активации удельная поверхность цемента возрастает на 18,7%.

В результате увеличения удельной поверхности изменяются дисперсные характеристики цемента. В активируемом цементе уменьшается содержание фракции  $d_p$ , поскольку все осколки разрушенных частиц переходят в более мелкие фракции:

$$R_2(d_p) = 0,9 R_1(d_p) \quad (26)$$

Параметры зернового состава активированного цемента  $d'_2$  и  $n_2$  – найдем с помощью соотношений (1) и (5), которые путем логарифмирования можно представить в виде:

$$\begin{cases} \lg S_{y\delta}^a = 7,55 - \frac{0,2}{mn_2} - \frac{\lg d'_2}{m}; \\ n_2 \lg(d_p - \lg d'_2) - 0,3622 = \lg[-\lg 0,9R_1(d_p)] \end{cases} \quad (27)$$

где  $m=0,54$ .

Решение системы уравнений (27) имеет вид:

$$d'_2 = 10^{6,55m - 0,2/n_2 - m \lg S_{y\delta}^a}; \quad (28)$$

$$n_2 = \frac{0,1622 + \lg[-\lg 0,9R_1(d_p)]}{m(\lg S_{y\delta}^a - 6,55) + \lg d_p}. \quad (29)$$

Для рассмотренного выше, примера получим:  $n_2 = 0,82$ ,  $d'_2 = 29$  мкм.

Таким образом, пневматическая механизация цемента приводит к существенному повышению его дисперсности, улучшению качества поверхности частиц, а в итоге – повышению активности цемента.

Испытания опытно-промышленной установки показали, что ее использование для механоактивации цемента позволяет снизить его расход при приготовлении бетонных смесей и растворов на 10-18% по массе.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. Новосибирск: Наука, 1980. 297 с.

2. Молчанов В.И., Селезнева О.Г., Жирнов Е.Н. Активация минералов при измельчении. М.: Недра, 1988. 208с.

3. Патент РФ № 100431. (Установка для пневматической механоактивации цемента.) Оpubл. 20.12.2010. БЮЛ.№ 35.

4. Дуда В. Цемент. М.: Стройиздат, 1981. 493 с.

5. Андреев С.Е., Товаров В.В., Перов В.А. Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава. М.: Металлургиздат, 1959. 437с.

6. Богданов В.С., Несмеянов Н.П., Пироцкий В.З., Морозов А.И. Механическое оборудование предприятий строительных материалов. Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 1998. 180 с.

7. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем – Л.: Химия, 1979. 76 с.

8. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов. М.: Стройиздат, 1972. 235 с.

9. Акунов В.И. Струйные мельницы. М.: Машгиз.1962. 264 с.

10. Уваров В.А., Богданов В.С., Гаврилов Р.В. Расчет конструктивно-технологических параметров струйных мельниц // Известия Вузов. Строительство. 1996. №10. С. 113–119.