

УДК 622.73

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ МЕХАНОАКТИВАЦИИ ЦЕМЕНТА

Овчинников Д.А.

ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», Белгород, e-mail: ovchinnikov\_d\_a@mail.ru

Проведен анализ снижения сырьевых затрат на современном производстве сухих строительных смесей, железобетонных изделий и конструкций. Учитывая литературный обзор, разработана и создана установка для пневматической механоактивации цемента непрерывного действия. В статье приведены аналитические выражения, описывающие конструктивно-технологические параметры смесительно-разгонного узла установки для пневматической механоактивации цемента. В пневматическую установку непрерывного действия цемент подается дозатором. Процесс механической активации в непрерывно действующей установке зависит от регулируемых параметров системы, к которым относится число разгонных трубок, диаметр сопел, диаметр разгонных трубок и геометрические размеры рабочей камеры установки. Показано, что пневматические установки наиболее целесообразно применять непосредственно на производствах ЖБИ, ЖБК и ССС, так как наблюдается максимальный эффект от механоактивации цемента. Исследования показывают, что механическая активация цемента позволяет снизить расход цемента до 17%, а, следовательно, снизить себестоимость ЖБИ, ЖБК и ССС, не изменяя качественных характеристик готового продукта.

**Ключевые слова:** сырьевые затраты, сухие строительные смеси, железобетонные изделия и конструкции, пневматическая механоактивация, смесительно-разгонный узел, разгонная трубка

## RESEARCH IS CONSTRUCTIVE – TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF INSTALLATION FOR PNEUMATIC MECHANOACTIVATION OF CEMENT

Ovchinnikov D.A.

Belgorod State Technological University a. V.G. Shukhov, Belgorod, e-mail: ovchinnikov\_d\_a@mail.ru

The analysis of lowering of raw expenses on the modern production of dry construction compounds, steel concrete products and constructions is carried out. Considering the literary review, installation for pneumatic mechanical activation of cement of the continuous action is developed and created. The analytical expressions describing constructive technological parameters of a mixing and accelerating node of installation for pneumatic mechanical activation of cement are given in article. In pneumatic installation of the continuous action cement moves the dispenser. Process of mechanical activation in continuously operating installation depends on adjustable parameters of system to which the number of accelerating tubes belongs, diameter snuffed, diameter of accelerating tubes and the geometrical sizes of the working camera of installation. It is set that it is most expedient to apply pneumatic installations directly on productions of concrete goods, ZhBK and CCC as the maximum effect from cement mechanical activation is watched. Researches show that mechanical activation of cement allows to cut the cement expenditure to 17%, and, therefore, to reduce prime cost of concrete goods, ZhBK and CCC, without changing qualitative characteristics of a ready-made product.

**Keywords:** raw expenses, dry construction compounds, steel concrete products and constructions, pneumatic mechanoactivation, mixing and accelerating node, accelerating tube

В условиях современного строительства снижение затрат на материалы и изделия становятся всё более актуальным. К сожалению, ценовая политика основных производителей в цементной отрасли в настоящее время привела к существенному его удорожанию. Следовательно, идет удорожание изделий и материалов на его основе. Потребители цемента вынуждены искать способы снижения его применения без снижения прочностных и потребительских свойств изделий на его основе. Одним из перспективных направлений является изменение свойств цементных вяжущих при помощи интенсивной механической обработки порошка, получившей название механической активации. Проведение таковой непосредственно перед применением в приготовлении цементных и бетонных растворов обеспечивает снижение расхода цемента до 17%.

Именно по этим причинам пневмо-струйная установка для механической активации цемента по праву считается наиболее необходимым участком заводов по производству сухих строительных смесей, ЖБИ и ЖБК. Внедрение оборудования для активации является важнейшим шагом на пути снижения затрат на производство.

**Цель исследования:** разработка конструкции установки для пневматической механоактивации цемента и методики расчёта параметров смесительно-разгонного узла, с учётом конструктивно-технологических параметров данной установки.

### Материалы и методы исследования

Для опытных лабораторных испытаний использовался цемент и слой цементного клинкера в качестве преграды, а энергоноситель – сжатый воздух, подаваемый компрессором в установку. Расчёт конструктивно-технологических параметров смеситель-

но-разгонного узла проводился с использованием экспериментальных данных, полученных на модельных опытно-промышленных установках, а также с помощью методов теории подобия.

**Результаты исследования и их обсуждения**

В Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова коллективом авторов разработана и создана установка [4], в которой механоактивация цемента производится в результате свободного удара частиц, находящихся в высокоскоростных двухфазных струях о преграду, в качестве которой используется насыпной слой клинкера. Отражательный слой клин-

кера 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.

Сложность и недостаточная изученность процессов струйной активации цемента приводит к необходимости использования при расчетах и проектировании пневмоструйных активаторов экспериментальных данных, полученных на модельных опытно-промышленных установках, а также с помощью методов теории подобия [2]. Схема установки [4] показана на рис. 1.

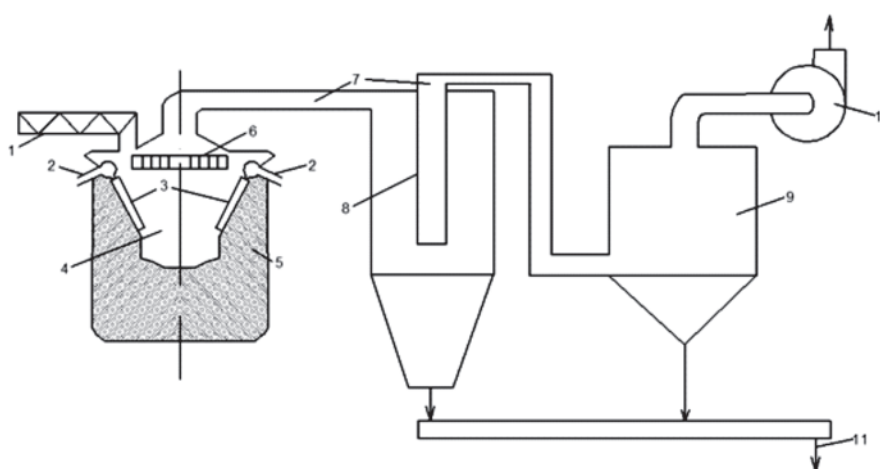


Рис. 1. Схема установки для пневматической механоактивации цемента:  
 1 – материалопровод исходного цемента; 2 – эжекторы; 3 – разгонные трубки;  
 4 – рабочая камера; 5 – клинкер; 6 – сепаратор; 7 – воздухопроводы; 8 – циклон; 9 – рукавный фильтр; 10 – вентилятор; 11 – выход готового продукта

Кроме геометрического подобия модельной и проектируемой установки и постоянства гидродинамических критериев [6], постоянными должны оставаться следующие характеристики:

1. Удельный расход сжатого воздуха:

$$U = \frac{G_{св}}{\Pi} = \text{const.} \quad (1)$$

2. Плотность потока материала в разгонных трубках:

$$q = \frac{\Pi}{n_T f_T} = \text{const.} \quad (2)$$

3. Концентрация частиц в активационном объеме:

$$C_a = \frac{\Pi}{V_a} = \text{const.} \quad (3)$$

4. Энегронапряженность активационного объема:

$$\mathcal{E}_a = \frac{P}{V_a} = \text{const.} \quad (4)$$

5. Зависимость от размера частиц скорости их столкновения с зернами клинкера, значения разрушающей скорости частиц  $v_p \approx 36 \text{ м/см/с}$ , удельные энергозатраты на образование новой поверхности  $K = 5,6 \text{ Дж/м}^2$ .

Здесь  $G_{св}$  – массовый расход энергоносителя – сжатого воздуха, кг/с;  $\Pi$  – производительность установки, кг/с;  $f_T$  – площадь поперечного сечения разгонных трубок,  $\text{м}^2$ ,  $V_a$  – объем зоны активации,  $\text{м}^3$ ;  $P$  – мощность, вводимая в зону активации, Вт.

Основным элементом установки является рабочая камера, заблокированная с сепаратором (рис. 2).

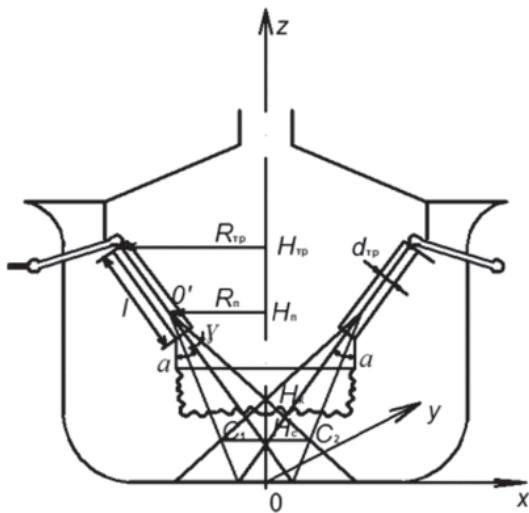


Рис. 2. Расчетная схема рабочей камеры установки ( $C_1, C_2$  – проекция совмещенного пятна взаимодействия левой и правой струй с клинкерным слоем)

Конструктивно-технологические параметры рабочей камеры установки для пневматической механоактивации цемента тесно связаны с геометрией двухфазных струй, выдуваемых в рабочую камеру из четырех симметрично расположенных разгонных трубок. Рассмотрим две системы координат: основную  $xuz$ , связанную с рабочей камерой (см. рис. 2), и вспомогательную  $x'y'z'$ , связанную с левой разгонной трубкой (рис. 3). Её начало совместим с полюсом струи, а ось  $0'x'$  направим по оси струи. Система  $x'y'z'$  повернута вокруг оси  $0y$  на угол  $-(90 - \alpha)$ , а её начало имеет в системе  $xuz$  координаты  $0'(-R_n; 0; H_n)$  (см. рис. 3).

Представим поверхность факела струи, истекающей из разгонной трубки, в виде конуса с вершиной в точке  $0'$ , с осью  $0'x'$  и углом расширения  $2\gamma = 14^\circ$  [1].

Уравнение этой поверхности в системе координат  $x'y'z'$  имеет вид:

$$\operatorname{tg}^2 \gamma \cdot x'^2 = y'^2 + z'^2. \quad (5)$$

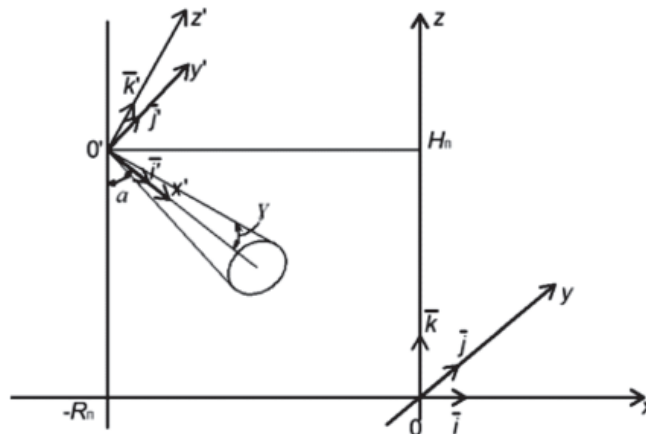


Рис. 3. К выводу уравнения поверхности факела струи

Уравнение факела струи в основной системе координат  $xuz$  выводится из уравнения (5) с помощью формул преобразования координат [5]:

$$x' = R_n \sin \alpha + H_n \cos \alpha + x \sin \alpha - z \cos \alpha;$$

$$\operatorname{tg}^2 \gamma [(R_n + x) \sin \alpha + (H_n - z) \cos \alpha]^2 = y^2 + [(R_n + x) \cos \alpha + (z - H_n) \sin \alpha]^2. \quad (7)$$

Уравнение конуса правой струи получим из уравнения (7) с помощью замены:  $R_n \rightarrow -R_n$ ,  $\alpha \rightarrow -\alpha$ :

$$\operatorname{tg}^2 \gamma [(R_n - x) \sin \alpha + (H_n - z) \cos \alpha]^2 = y^2 + [(R_n - x) \cos \alpha + (z - H_n) \sin \alpha]^2. \quad (8)$$

Аналогично выводятся уравнения поверхностей конусов передней струи:

$$\operatorname{tg}^2 \gamma [(R_n + y) \sin \alpha + (H_n - z) \cos \alpha]^2 = x^2 + [(R_n + y) \cos \alpha + (z - H_n) \sin \alpha]^2 \quad (9)$$

и задней струи:

$$\operatorname{tg}^2 \gamma [(R_n - y) \sin \alpha + (H_n - z) \cos \alpha]^2 = x^2 + [(R_n - y) \cos \alpha + (z - H_n) \sin \alpha]^2. \quad (10)$$

Натекая на плоскость, перпендикулярную оси  $oz$ , струи образуют эллиптические пятна их взаимодействия с преградами, которые в зависимости от угла наклона

разгонных трубок и расположения отражательной преграды могут не соприкасаться или накладываться друг на друга (рис. 4).

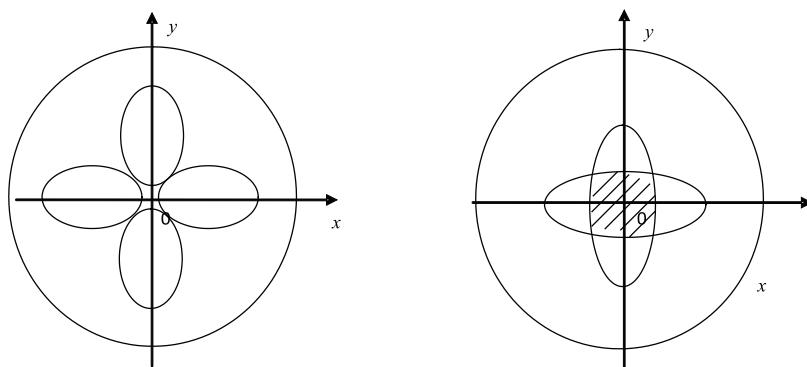


Рис. 4. Пятна взаимодействия газоматериальных струй с отражательной преградой

Наибольший практический интерес представляет случай, когда пятна взаимодействия противоположных струй совпадают (рис. 5). В этом случае площадь результирующего пятна взаимодействия будет минимальной, а объемная плотность энергии, вводимой струями в зернистый слой, достигнет наибольшего значения, что является необходимым условием интенсификации процесса механоактивации цемента.

том, вершины которого находятся в точках пересечения эллипсов:

$$\begin{aligned} \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} &= 1; \\ \frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{a^2} &= 1, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $a, b$  – полуоси эллипсов совмещенных пятен противоположных струй.

Решив систему уравнений (11), найдем сторону результирующего пятна и его площадь:

$$S = \frac{4a^2 b^2}{a^2 + b^2}. \quad (12)$$

Выведем условия совмещения пятен противоположно расположенных струй и найдем их полуоси  $a$  и  $b$ .

Как следует из рис. 2, при любых допустимых значениях наклона разгонных трубок  $\alpha$  существует плоскость  $z = H_{\text{сп}}$ , на которой пятна взаимодействия противоположных струй совмещаются. Условием такого совмещения являются совпадения уравнений контуров пятен противоположных струй, которые получаются в результате подстановки в уравнения (9, 10) и уравнения (11, 12)  $z = H_{\text{сп}}$ .

Такие совпадения имеют место при выполнении условия:

$$(H_n - H_{\text{сп}}) \sin \alpha \cdot \cos \alpha (1 + \text{tg}^2 \gamma) = R_n (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \text{tg}^2 \gamma). \quad (13)$$

а также формула для угла наклона разгонных трубок  $\alpha_{\text{сп}}$ , обеспечивающего заданное положение совмещенного пятна взаимодействия струй с клинкерной засыпкой:

С приемлемой точностью совмещенное пятно взаимодействия всех четырех струй с клинкерным слоем можно считать квадратом

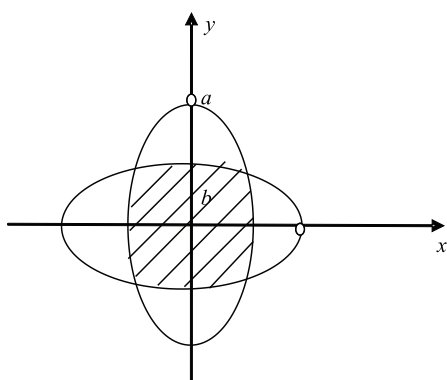


Рис. 5. Минимальное пятно взаимодействия газоматериальных струй со слоем клинкера

Из условия (13) следует соотношение, определяющее положение совмещенного пятна по вертикали:

$$H_{\text{сп}} = H_n - R_n \frac{\cos 2 \alpha + \cos 2 \gamma}{\sin 2 \alpha}, \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \left( \arcsin \frac{R_n}{\sqrt{R_n^2 + (H_n - H_{\text{сп}})^2}} + \arcsin \frac{R_n \cos 2 \gamma}{\sqrt{R_n^2 + (H_n - H_{\text{сп}})^2}} \right). \quad (15)$$

Уравнение контуров совмещенных пятен противоположных струй (рис. 5) имеют вид (11), где полуоси эллипсов определяют соотношениями:

$$\begin{aligned} a &= R_n \frac{\sin 2\gamma}{\sin 2\alpha}; \\ b &= a \frac{\sqrt{\cos(\alpha + \gamma)\cos(\alpha - \gamma)}}{\cos \gamma}. \end{aligned} \quad (16)$$

Подставив формулы (16) в (12), получим следующее выражение для площади результирующего совмещенного пятна взаимодействия струй с клинкерным слоем:

$$S = \frac{2R_n^2 (\cos 2\alpha + \cos 2\gamma)\sin^2 2\gamma}{(\cos 2\alpha - \sin^2 \gamma)\sin^2 2\alpha}. \quad (17)$$

Принимая во внимание высокую скорость газоматериальных струй и большую пористость клинкерной засыпки, можно предположить, что оптимальный уровень совмещенного пятна  $H_{\text{сп}}$  находится внутри клинкерного слоя. Тогда для объема зоны интенсивной механоактивации цемента можно принять следующую оценку:

$$V_a = Sd_{\text{кл}}, \quad (18)$$

где  $d_{\text{кл}}$  – средний размер зерна клинкерной засыпки.

Координаты полюса струи, истекающей из левой разгонной трубки ( $-R_{\text{П}}, H_{\text{П}}$ ), связаны с координатами соответствующего сопла ( $-R_c, H_c$ ) следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{R_c}{H_c - H_{\text{сп}}} &= \text{tg}\alpha; \\ \frac{H_n - H_c}{H_{\text{сп}} - H_c} &= \frac{R_c - R_n}{R_c}; \end{aligned} \quad (19)$$

$$(R_c - R_n)^2 + (H_c - H_n)^2 = (L_T - L_{\text{П}})^2,$$

где  $L_T$  – длина разгонной трубки  $L_{\text{П}} = 0,15d_T/a$  – расстояние от среза разгонной трубки до полюса струи;  $d_T$  – внутренний диаметр разгонной трубки  $a = 0,07-0,08$  – коэффициент турбулентности струи [1].

Из уравнений (19) следует:

$$\begin{aligned} R_{\text{П}} &= R_c - \frac{L_T - L_{\text{П}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{H_c - H_{\text{сп}}}{R_c}\right)^2}}; \\ H_{\text{П}} &= H_c - \frac{(L_T - L_{\text{П}})(H_c - H_{\text{сп}})}{R_c \sqrt{1 + \left(\frac{H_c - H_{\text{сп}}}{R_c}\right)^2}}. \end{aligned} \quad (20)$$

Основными конструктивными параметрами рабочей камеры активатора являются диаметры сопел  $d_c$  и разгонных трубок  $d_T$ , длина разгонных трубок  $L_T$ , угол их наклона  $\alpha$ , число разгонных трубок  $n_T$ . Через эти параметры выражаются геометрические размеры камеры. Экспериментально с помощью опытно-промышленной установки найдены рациональные значения конструктивных параметров:  $d_c = 4-8$  мм,  $d_T = 17-30$  мм,  $L_T = 170$  мм,  $\alpha = 16^\circ$ ,  $n_T = 4-6$ , а также соотношения, определяющие расположение сопел:

$$R_c = (1,3-1,8)L_T;$$

$$H_c = (5,5-6,5)L_T. \quad (21)$$

При заданных значениях  $\alpha$ ,  $R_c$  и  $H_c$  высота расположения пятна взаимодействия струй со слоем клинкера определяется соотношением:

$$H_{\text{сп}} = H_c - \frac{R_c}{\text{tg}\alpha}. \quad (22)$$

Для толщины слоя клинкера на дне камеры получим:

$$H_{\text{кл}} \geq H_{\text{сп}}. \quad (23)$$

Минимальная толщина слоя клинкера, футерующего корпус рабочей камеры, составляет  $(0,2-0,3)H_{\text{кл}}$ , поэтому для диаметра внешнего корпуса камеры получим:

$$D_2 = 2(R_c + (0,2...0,3)H_{\text{кл}}). \quad (24)$$

Высота корпуса камеры равна  $H_c$ , а диаметр и высота установки внутреннего корпуса определяется по формулам:

$$D_1 = 2(R_c - L_T \sin \alpha); \quad (25)$$

$$H_1 = H_c - L_T \cos \alpha.$$

Основными технологическими параметрами установок для пневматической механоактивации цемента являются: дисперсные характеристики исходного материала, производительность установки П, прирост удельной поверхности цемента за один цикл активации  $\Delta S_y$ , удельные энергозатраты на активацию  $\mathcal{E}_y$ , параметры сжатого воздуха: давление  $P_0$ , температура  $T_0$ , массовый расход  $G_{\text{св}}$ .

Расчет этих параметров ведется на основе определяющих характеристик процесса механоактивации цемента (1)–(5), значения которых найдены экспериментально: удельный расход сжатого воздуха  $u = 2$  кг/кг, плотность потока материала в разгонных трубках  $q = 3,6$  кг/с·м<sup>2</sup>, концентрация частиц в активационном объеме  $C_a = 55$  кг/(с·м<sup>3</sup>), энергонапряженность активационного объема  $\mathcal{E}_a = 100$  кВт/м<sup>3</sup>.



Порядок расчета установки для пневмоструйной механоактивации цемента может быть следующим:

1. По заданной производительности установки ( $\Pi \leq 500$  кг/ч) и рекомендуемому значению  $u$  с помощью формулы (1) определяется потребный расход сжатого воздуха  $G_{св}$ .

2. С помощью соотношения

$$G_{св} = 0,026 d^2 c n_T P_0 / \sqrt{T_0}$$

подбирается диаметр сопел, число разгонных трубок и параметры сжатого воздуха [2, 3].

3. С помощью формулы (2) определяется площадь сечения разгонных трубок  $f_T$  и вычисляется их диаметр:

$$d_T = 2 \sqrt{\frac{f_T}{\pi}}$$

4. Геометрические размеры рабочей камеры установки определяются по формулам (3), (4), (18), (17), (16), (20)–(25).

5. По заданным дисперсным характеристикам исходного материала с помощью зависимости скорости столкновения  $v$  частиц с клинкером от размера частиц  $d$

$$v = f(d)$$

определяется прирост удельной поверхности цемента за один цикл активации  $\Delta S_1$ .

6. Степень активации цемента, которая характеризуется приращением его удельной поверхности  $\Delta S_y$ , оценивается по формуле:

$$\Delta S_y = \Delta S_1 n_{ц},$$

где  $n_{ц}$  – кратность циркуляции материала в активаторе, которая регулируется путем изменения частоты вращения ротора центробежного сепаратора.

7. Исходя из заданного расхода сжатого воздуха и аэродинамических параметров всех узлов установки, подбираем вентилятор.

Изложенная выше методика лишь косвенно и неполно учитывает влияние на работу активатора характеристик смеси-тельно-разгонного узла, сепаратора, циклона-разгрузителя и фильтра. Более точный расчет возможен лишь в рамках комплексного подхода, включающего в себя взаимосвязные исследования пылеаэродинамических свойств как отдельных частей, так и всего газового тракта установки в целом.

## Заключение

Результаты проведенных исследований пневмоструйной установки для механической активации цемента для производства сухих строительных смесей, железобетонных изделий и конструкций, учитывая полученные оптимальные параметры смеси-тельно-разгонного узла, которые зависят от потребного расхода сжатого воздуха  $G_{св}$ , диаметра сопел, числа разгонных трубок, диаметра разгонных трубок, геометрических размеров рабочей камеры установки, определяется прирост удельной поверхности цемента за один цикл активации  $\Delta S_1$ , из которого определяется степень активации.

## Список литературы

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. – М.: Наука, 1984. – 717с.
2. Акунов В.И. Струйные мельницы. – М.: Машиностроение, 1967. – 264 с.
3. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1975. – 323 с.
4. Патент РФ № 100431, 20.12.2010 / Овчинников Д.А., Уваров В.А., Уваров А.В. Установка для пневматической механоактивации цемента. Бюл. № 35.
5. Погорелов А.В. Геометрия. – М.: Наука, 1984. – 288 с.
6. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Физматгиз, 1972.

## References

1. Abramovich G.N. Theory of turbulent streams. M.: Science, 1984. 717 p.
2. Akunov V.I. Jet mills. M.: mashinostroyeny, 1967. 264 p.
3. Altsnul A.D. Kiselyov P. G. Hydraulics and aerodynamics. M.: Construction publisher, 1975. 323 p.
4. Patent Russian Federation no. 100431, 20.12.2010. Ovchinnikov D.A., Uvarov V.A., Uvarov A.V. Installation for pneumatic mechanoactivation of cement. Bulletin. no. 35.
5. Pogorelov A.V. Geometry. M.: Science, 1984. 288 p.
6. Similarity and dimensionality L.I. Metody's sets in mechanics. M.:Physical and mathematical, 1972.

## Рецензенты:

Шарапов Р.Р., д.т.н, профессор, зав. кафедрой подъемно-транспортных и дорожных машин, БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород;

Севостьянов В.С., д.т.н., профессор кафедры «Технологические комплексы машины и механизмы», БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород.

Работа поступила в редакцию 19.02.2013