

УДК 533.6:628.5

РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ И ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА КЛИНКЕРНОЙ ПЫЛИ В АСПИРАЦИОННОМ УКРЫТИИ

О. А. АВЕРКОВА
В. И. БЕЛЯЕВА
К. И. ЛОГАЧЕВ

*Белгородский
технологический
государственный университет
им. В.Г.Шухова*

e-mail: kilogachev@mail.ru

Проведены исследования по моделированию движения клинкерной пыли в аспирационном укрытии. Аэродинамическое поле внутри укрытия строилось методом дискретных вихрей, где моделировалось движение полифракционного пылевого облака на основании интегрирования уравнений движения для каждой пылевой частицы. Выполнено исследование влияния на дисперсный состав и концентрацию аспирируемой пылевой аэрозоли: количества пылевых частиц, поступающих в укрытие, геометрических размеров и скоростей в приточном и вытяжном отверстиях.

Ключевые слова: метод дискретных вихрей, пылевая аэрозоль, дисперсный состав, концентрация.

При обжиге цементного клинкера образуется и поступает в воздушную среду большое количество пыли, что приводит к значительному ухудшению условий труда. Пыль, близкая по составу к исходному сырью, выделяется из печи в холодном конце. В горячем конце печи, на холодильнике, и особенно в галерее клинкерных конвейеров, нередко выделяется клинкерная пыль. Она черного цвета, имеет высокую температуру, весьма абразивна. Согласно проектному решению, для обеспыливания узла перегрузки клинкера на конвейер имеется аспирационное укрытие и предусмотрено удаление аспирационного воздуха совместно с технологическим избыточным воздухом из холодильника, что крайне неэффективно, как указывалось в работе [1]. Поэтому необходимо разделять потоки аспирационного и избыточного воздуха из холодильника либо путем установки обводного газохода и дополнительного технологического шибера, либо устройством отдельной системы аспирации узла [1], что и выполняется на ряде заводов. Но, к сожалению, аспирационное укрытие и в целом система аспирации данного узла нередко выполняются «на глаз», т.е. без соответствующих расчетов и обоснования параметров.

Для научно обоснованного выбора пылеулавливающих аппаратов необходимы сведения о концентрации и дисперсном составе пыли в аспирируемом воздухе, которые могут быть получены методами полифракционной совокупности и дискретных вихрей [2-5].

Целью данной работы является моделирование динамики пылевых частиц в аспирационном укрытии узла перегрузки клинкера на конвейер для расчета концентрации и дисперсного состава пыли в аспирируемом воздухе.

Схема укрытия представлена на рис.1. При расчете использовали состав пыли, приведенный в [6].

Основные расчетные соотношения

Пусть дана плоская многосвязная область течения идеальной несжимаемой жидкости. На твердой стенке задано условие непроницаемости – нормальная составляющая скорости равна нулю. Во всасывающих проемах и приточных отверстиях скорости вдоль направления внешней нормали известны, при этом объем поступающего в помещение воздуха равен объему воздуха, удаляемого из него. Границу области дискретизируем контрольными точками и присоединенными вихрями. В контрольных точках выполняются граничные условия для нормальной составляющей скорости. Шаг дискретности – расстояние между соседними присоединенными вих-



рями или контрольными точками – приблизительно одинаков и равен h . На изломах границы области расположены присоединенные вихри. В рассматриваемых замкнутых областях количество присоединенных вихрей и расчетных точек одинаково.

В начальный момент времени воздух покоится во всем пространстве. В момент времени $t = +0$ «включаются» все приточные и вытяжные отверстия.

В момент времени $t = m \cdot \Delta t$ система для определения неизвестных циркуляций присоединенных вихрей будет иметь вид:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^n G^{pk} \Gamma^k + \Lambda = v^p - \sum_{\tau=1}^m G^{p\tau} \gamma^{\tau}, \\ \sum_{k=1}^n \Gamma^k + \sum_{\tau=1}^m \gamma^{\tau} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $p = 1, 2, \dots, n$, Γ^k – циркуляции присоединенных вихрей; n – их количество; v^p – скорость в направлении внешней нормали к границе области в p -й контрольной точке; Λ – регуляризирующая переменная. Функция G^{pk} ($G^{p\tau}$), выражающая влияние на p -ую контрольную точку с координатами (x_1, x_2) единичного вихря, расположенного в k -й точке (для $G^{p\tau}$ – точке расположения свободного вихря γ^{τ} , сошедшего с острой кромки в момент времени τ) с координатами (ξ_1, ξ_2) вдоль направления единичного вектора $\vec{n} = \{n_1, n_2\}$, вычисляется по формуле:

$$G^{pk} = \frac{n_2(x_1 - \xi_1) - n_1(x_2 - \xi_2)}{2\pi \cdot [(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2]}. \quad (2)$$

Решив систему линейных алгебраических уравнений (1) методом Гаусса с выбором главных элементов и определив неизвестные циркуляции, можно определить скорость течения в любой точке рассматриваемой области вдоль любого заданного единичного направления $\vec{n} = \{n_1, n_2\}$ по формуле:

$$v_n(x) = \sum_{k=1}^n \Gamma^k G^{xk} + \sum_{\tau=1}^m G^{x\tau} \gamma^{\tau}, \quad (3)$$

где функции G^{xk} , $G^{x\tau}$ вычисляются по той же формуле (2), но вместо (x_1, x_2) подставляются координаты интересующей нас точки x .

Отрыв свободных вихрей осуществлялся с острой кромки приточного отверстия. При этом свободный вихрь, сошедший в момент времени τ , имеет циркуляцию γ^{τ} , равную циркуляции присоединенного вихря в точке срыва, найденной в предыдущий момент времени. В дальнейшем свободные вихри движутся при неизменной циркуляции по траекториям жидких частиц. Если вихрь в определенный момент времени приближается к твердой стенке на расстояние меньше $h/2$, то он отодвигается от нее по нормали так, чтобы расстояние до границы течения стало равно $h/2$. Если то же самое происходит с вихрем и всасывающим отверстием, то вихрь исчезает. Отрыв свободных вихрей осуществлялся, когда расстояние между оторвавшимся вихрем и следующим равнялось h .

Моделирование динамики пылевых частиц строилось на основании интегрирования методом Рунге-Кутты уравнения их движения:

$$\rho_1 \frac{\pi d_s^3}{6} \cdot \frac{d\vec{v}_1}{dt} = -\psi \cdot \frac{|\vec{v}_1 - \vec{v}|(\vec{v}_1 - \vec{v})}{2} \rho \chi S_m + \rho_1 \frac{\pi d_s^3}{6} \vec{g}, \quad (4)$$

где ρ_1 , ρ – плотности пылевой частицы и среды соответственно; \vec{v}_1 – вектор скорости частицы; \vec{v} – скорость воздуха, вычисляемая по формуле (3); d_s – эквивалентный диаметр; $S_m = \pi d_s^2/4$ – площадь миделевого сечения; χ – коэффициент динамической

формы частицы; \bar{g} – ускорение свободного падения; ψ – коэффициент сопротивления среды, вычисляемые по формуле

$$\psi = \begin{cases} 24/Re & \text{при } Re < 1 \text{ (ф-ла Стокса),} \\ 24(1+1/6 \cdot Re^{2/3})/Re & \text{при } 1 \leq Re < 10^3 \text{ (ф-ла Клячко),} \\ 24/Re \cdot (1+0,065 Re^{2/3})^{1,5} & \text{при } Re \geq 10^3 \text{ (ф-ла Адамова).} \end{cases} \quad (5)$$

При столкновении частицы с твердой стенкой тангенциальная $v_{2\tau}$ и нормальная v_{2n} скорости вычислялись по формулам

$$v_{2n} = -k \cdot v_{0n}, \quad v_{2\tau} = v_{0\tau} + \eta \cdot f \cdot (1+k) \cdot v_{0n}, \quad (6)$$

где

$$\eta = \min \left\{ -\frac{2v_{0\tau}}{7f(1+k)v_{0n}}, 1 \right\};$$

k – коэффициент восстановления при ударе. Приточное отверстие разбивали на k одинаковых частей и в каждый момент времени генерировали k случайных чисел (диаметров). В каждый модельный момент времени в укрытие поступало k пылевых частиц.

Масса пыли, поступившей в рассматриваемую область за время Δt :

$$C_{\Delta t} = km_{cp} = Cv_n a \Delta t,$$

где средняя масса пылевой частицы:

$$m_{cp} = \sum_{i=1}^n \int_{d_{in}}^{d_{is}} \frac{\pi x^3 l_i}{6(d_{is} - d_{in})} \rho dx = \frac{\pi \rho}{24} \sum_{i=1}^n l_i (d_{is} + d_{in}) (d_{is}^2 + d_{in}^2),$$

шаг по времени:

$$\Delta t = \frac{\pi k \rho}{24 Cv_n a} \sum_{i=1}^n l_i (d_{is} + d_{in}) (d_{is}^2 + d_{in}^2).$$

Для вычисления концентрации пыли в вытяжном отверстии выбиралось число n моментов времени поступления в область набора из k пылевых частиц. Осуществлялось моделирование движения $n \cdot k$ частиц до тех пор, пока они все не осядут, либо не будут уловлены отсосом. В процессе моделирования рассчитывалась m_o – суммарная масса частиц, попавших в отсос. Выходная концентрация при этом: $C_o = \frac{m_o}{V}$, где

$$V = v_n \cdot a \cdot \Delta t \cdot n.$$

В процессе моделирования запоминались диаметры пылевых частиц, уловленных отсосом, и определялся процентный состав пылевых фракций в отсасываемом воздухе.

Реальная получающаяся концентрация пыли в приточном воздухе отличалась от заданной вследствие дискретности модели. Для определения реальной входной концентрации C_r вычисляется m_r – суммарная масса $n \cdot k$ частиц, поступивших в укрытие из приточного отверстия и соответственно $C_r = m_r / V$. При увеличении количества частиц $n \cdot k$ концентрация C_r приближается к C с любой заданной точностью.

Результаты расчета и их обсуждение

Динамика полифракционного пылевого облака, состоящего из 30 000 пылевых частиц, исходный дисперсный состав которого указан в табл. 1, приведен на рис. 2. Отметим, что вначале производился расчет аэродинамики внутри укрытия (рис. 1). После того, как свободные вихри полностью заполняли расчетную область, и вихревая структура течения во времени изменялась не существенно, свободные вихри останавливались, т.е. течение воздуха становилось стационарным. Тогда из приточного отверстия в область укрытия начинали поступать пылевые частицы. Как видно (рис. 2), пылевые частицы огибают область центрального вихря.

Очевидно, что от количества пылевых частиц, запускаемых из приточного отверстия в аспирационное укрытие, могут зависеть искомые параметры аэрозольного потока (дисперсный состав и концентрация). Поэтому были проведены методические исследования зависимости количества пылинок на искомые параметры.

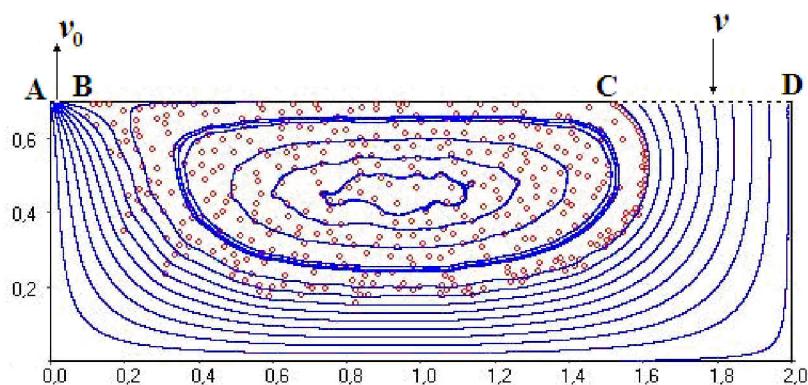


Рис. 1. Линии тока и вихревая структура течения в аспирационном укрытии

Таблица 1

Изменение дисперсного состава и концентрации пылевого облака в зависимости от количества частиц, его составляющих

Дисперсный состав пыли в приточном отверстии			
5-6 мкм	6-10 мкм	10-20 мкм	20-40 мкм
0,1	0,3	0,25	0,35
Дисперсный состав пыли в вытяжном отверстии. При моделировании 60 пылевых частиц ($N = 60$)			
Отношение концентраций в приточном и вытяжном отверстиях: $C_{II} / C_B = 1,492$			
0,097	0,194	0,290	0,419
$N = 300, C_{II} / C_B = 1,552$			
0,081	0,256	0,219	0,444
$N = 3000, C_{II} / C_B = 1,591$			
0,082	0,278	0,225	0,415
$N = 9000, C_{II} / C_B = 1,595$			
0,080	0,270	0,234	0,416
$N = 30000, C_{II} / C_B = 1,572$			
0,082	0,259	0,230	0,428
$N = 60000, C_{II} / C_B = 1,575$			
0,083	0,260	0,233	0,424

Исходные данные для расчета: плотность частицы $\rho = 3050 \text{ кг/м}^3$; коэффициент динамической формы частицы $\chi = 1,8$; скорость воздуха в приточном отверстии $v = 1 \text{ м/с}$, в вытяжном отверстии – $v_0 = 15,3 \text{ м/с}$; ширина приточного отверстия $AB = 0,0314 \text{ м}$; $CD = 0,48 \text{ м}$.

Шаг по времени для расчета движения пылевых частиц $0,0002961 \text{ с}$, количество свободных вихрей 424. В каждый момент времени в область укрытия поступает 30 пылевых частиц разных размеров.

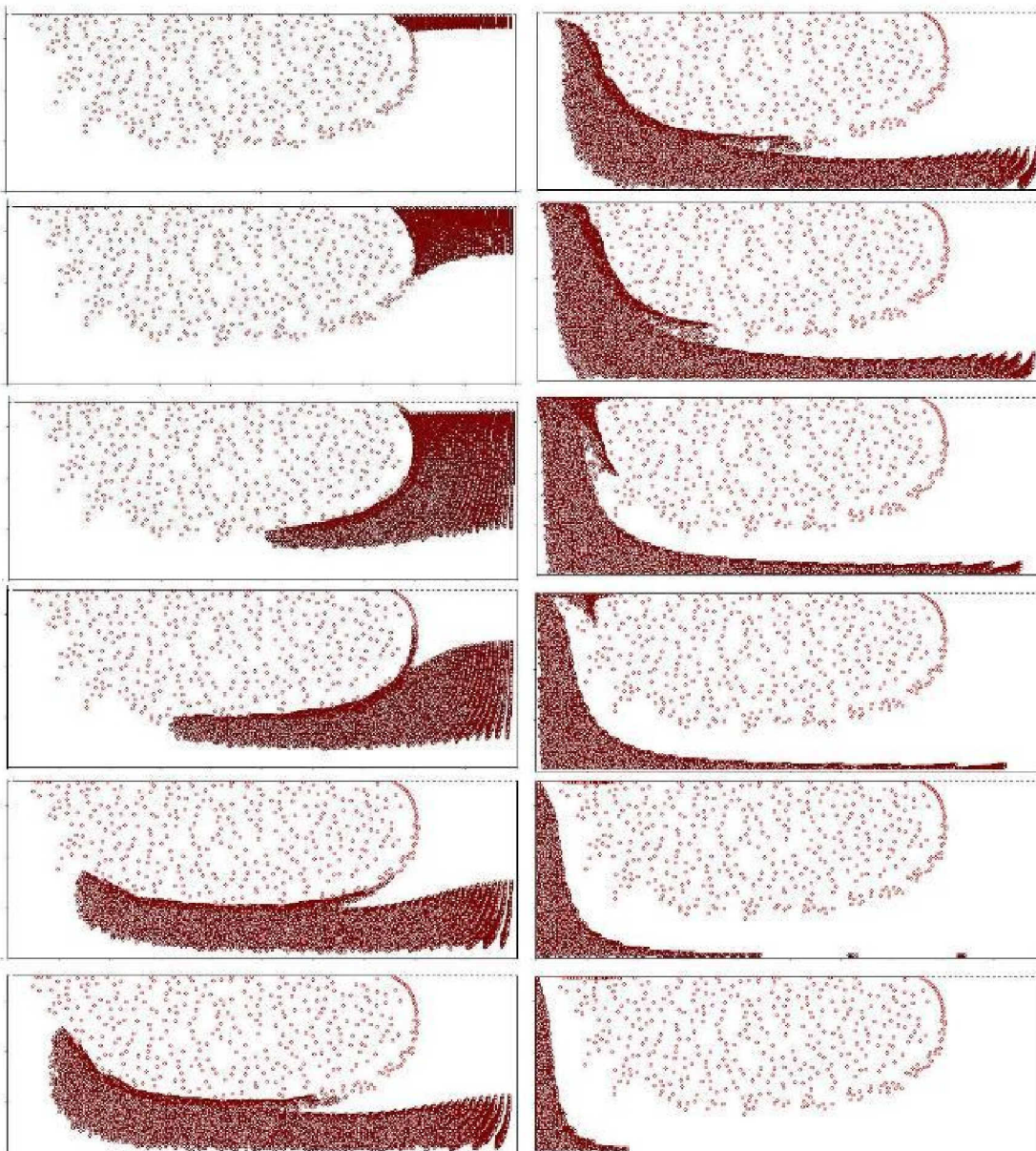


Рис. 2. Динамика пылевого полифракционного облака из 30 000 пылевых частиц (сверху вниз с течением времени)

Как видно из табл. 1, с увеличением количества пылинок дисперсный состав и отношение концентраций в приточном и вытяжном воздухе стабилизируется. Вполне достаточно исследовать полет 3000 пылевых частиц. Представляет интерес исследовать, насколько изменяются параметры аэрозольного аспирируемого потока при изменении геометрических и кинематических характеристик укрытия.

При увеличении скоростей внутри укрытия появляется небольшое количество пылевых частиц, вовлекаемых в циркуляционное течение воздуха. Они не улавливаются в отсос и не осаждаются. Изменение дисперсного состава и концентрации здесь не существенно (табл. 2).

При увеличении ширины вытяжного отверстия и уменьшении ширины приточного отверстия область центрального вихря увеличивается в размерах. Пылевое облако движется между границами укрытия и центрального вихря. Поэтому доля



осаждающихся частиц повышается. При $AB = 0,4$ м; $CD = 0,0314$ м пыль полностью осаждается на дно укрытия. При фиксированных значениях приточного и вытяжного отверстия с уменьшением высоты укрытия дисперсный состав и концентрация аспирируемых пылевых аэрозолей практически не изменяется. Доля частиц фракции 20-40 мкм уменьшается незначительно.

Таблица 2

Изменение дисперсного состава и концентрации пылевого облака из 3000 частиц в зависимости от изменения скорости притока и геометрических размеров укрытия

Дисперсный состав пыли в приточном отверстии			
5-6 мкм	6-10 мкм	10-20 мкм	20-40 мкм
0,1	0,3	0,25	0,35
Дисперсный состав пыли в приточном отверстии. Скорость в приточном отверстии $1,5 V$; шаг по времени для моделирования динамики частиц $\Delta t_{\text{ч}} = 0,0001974\text{с}$; шаг по времени для воздуха $\Delta t_{\text{в}} = 0,0065\text{с}$; $C_{\text{п}}/C_{\text{в}} = 1,407$			
0,075	0,257	0,230	0,438
$2 V$; $\Delta t_{\text{ч}} = 0,0001481\text{с}$; $\Delta t_{\text{в}} = 0,005\text{с}$; $C_{\text{п}}/C_{\text{в}} = 1,295$			
0,075	0,244	0,228	0,453
$2,5 V$; $\Delta t_{\text{ч}} = 0,0001184\text{с}$; $\Delta t_{\text{в}} = 0,004\text{с}$; $C_{\text{п}}/C_{\text{в}} = 1,492$			
0,076	0,264	0,247	0,413
$3 V$; $\Delta t_{\text{ч}} = 0,0001974\text{с}$; $\Delta t_{\text{в}} = 0,003\text{с}$; $C_{\text{п}}/C_{\text{в}} = 1,435$; $C_{\text{п}} = 0,000002$			
0,075	0,256	0,256	0,413
Изменение размеров приточного и вытяжного отверстий при $v = 1$			
$AB=0,1$; $CD=0,3314$; $C_{\text{п}}/C_{\text{в}} = 1,542$; $\Delta t_{\text{ч}} = 0,0002887\text{с}$; $\Delta t_{\text{в}} = 0,01$; $C_{\text{п}} = 0,000002$			
0,102	0,318	0,271	0,310
$AB=0,2$; $CD=0,2314$; $\Delta t_{\text{ч}} = 0,0002515\text{с}$; $\Delta t_{\text{в}} = 0,01\text{с}$; $C_{\text{п}}/C_{\text{в}} = 2,05$; $C_{\text{п}} = 0,00001$			
0,111	0,366	0,279	0,243
$AB=0,3$; $CD=0,1314$; $\Delta t_{\text{ч}} = 0,0002294\text{с}$; $\Delta t_{\text{в}} = 0,01\text{с}$; $C_{\text{п}}/C_{\text{в}} = 6,42$; $C_{\text{п}} = 0,00002$			
0,144	0,433	0,311	0,112
$AB=0,4$; $CD=0,0314$; $\Delta t_{\text{ч}} = 0,0003266\text{с}$; $\Delta t_{\text{в}} = 0,01\text{с}$; $C_{\text{п}} = 0,00008$			
0	0	0	0
Изменение высоты укрытия h при $AB=0,0314$; $CD=0,48$; $v = 1$			
$\Delta t_{\text{ч}} = 0,0002961\text{с}$; $\Delta t_{\text{в}} = 0,01\text{с}$; $C_{\text{п}} = 0,00004$; $h = 0,6$; $C_{\text{п}}/C_{\text{в}} = 1,6$			
0,083	0,269	0,229	0,419
$\Delta t_{\text{ч}} = 0,0002961\text{с}$; $\Delta t_{\text{в}} = 0,01\text{с}$; $C_{\text{п}} = 0,00004$; высота $0,5$; $C_{\text{п}}/C_{\text{в}} = 1,59$			
0,082	0,271	0,231	0,416
$\Delta t_{\text{ч}} = 0,0002961\text{с}$; $\Delta t_{\text{в}} = 0,01\text{с}$; $C_{\text{п}} = 0,00004$; высота $0,4$; $C_{\text{п}}/C_{\text{в}} = 1,6$			
0,084	0,280	0,232	0,404

Выводы

Разработана математическая модель и ее компьютерная реализация динамики полифракционного пылевого облака внутри аспирационного укрытия. Проведенные методические исследования показали, что для определения дисперсного состава и концентрации пыли в аспирируемом воздухе достаточно изучать движение 3000 пылевых частиц. Определены дисперсный состав и концентрация аспирируемой пылевой аэрозоли при разных геометрических размерах и скоростных режимах укрытия. Высота укрытия и увеличение скорости в приточном отверстии не влияет на структуру аэрозольного потока во всасывающем патрубке. Снижение концентрации пылевой аэрозоли и смещение дисперсного состава пыли в сторону мелких фракций наблюдается при уменьшении приточного отверстия и увеличении вытяжного отверстия, что

связано с ростом центрального вихря в аспирационном укрытии. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования эффективных аспирационных укрытий и научно-обоснованного выбора пылеулавливающих аппаратов.

Литература

1. Классен, В.К. Улучшение условий труда на участках охлаждения и транспортировки цементного клинкера / В.К. Классен, В.И. Беляева // Безопасность жизнедеятельности. – 2006. – № 3. – С. 31 – 33.
2. Логачев, К.И. Компьютерное моделирование пылегазовых потоков в пульсирующих аэродинамических полях / К.И. Логачев, А.И. Пузанок, В.Ю. Зоря // Вычислительные методы и программирование. – 2006. – Т. 7, № 2. – С. 65-71.
3. Анжеуров, Н.М. Комплекс компьютерных программ для расчета пылевоздушных течений в системах аспирации / Анжеуров Н.М., Аверкова О.А. // Новые огнеупоры. – 2008. – №5. – С. 53-58.
4. Аверкова, О.А. Особенности поведения пылевых аэрозолей в аспирационном укрытии стандартной конструкции / О.А. Аверкова, В.Ю. Зоря, К.И. Логачев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2007. – №11. – С.34-36.
5. Логачев, К.И. Закономерности изменения дисперсного состава пылевых аэрозолей в аспирационном укрытии / К.И. Логачев, О.А. Аверкова, В.Ю. Зоря // Известия вузов. Строительство. – 2007. – №9. – С. 46-52.
6. Банит, Ф.Г. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов / Ф.Г. Банит, А.Д. Мальгин. – М.: Стройиздат. – 1979. – 351 с.

CALCULATION OF CONCENTRATION AND POWDER OF CLINKER DUST IN THE ASPIRATION SHELTER

O. A. AVERKOVA
V. I. BELYAeva
K. I. LOGACHEV

*Belgorod Shukhov State
Technological University*

e-mail: kilogachev@mail.ru

We carried out research on the simulating of the clinker dust movement in the aspiration shelter. Aerodynamic field inside the shelter was built using the method of dispersed vortexes where we simulated the movement of the polyfractional dust cloud on the basis of the integration of motion equation for each dust particle. We also carried out research of the influence of such factors as a quantity of dust particles in the shelter, size and speed in air supply outlet and louver on the dust aerosol's powder and concentration.

Key words: method of dispersed vortexes, dust aerosol, powder, concentration.