

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЫЛЕВЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В АСПИРАЦИОННОМ УКРЫТИИ *

К.И. Логачев ¹⁾, О.А. Аверкова ¹⁾, В.Ю. Зоря ¹⁾

1) Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

С использованием разработанной на основе метода сингулярных интегральных уравнений компьютерной программы произведен расчет динамики пылевых аэрозолей в аспирируемом от укрытия воздухе. Выявлены закономерности изменения дисперсного состава пылевых аэрозолей в зависимости от исходного фракционного состава пыли в загрузочном желобе, конструкции укрытия, скоростных параметров и наличия вращающегося цилиндра или цилиндра-отсоса.

Ключевые слова: метод сингулярных интегральных уравнений, дисперсный состав пылевых аэрозолей, фракционный состав пыли, метод максимального диаметра, метод граничных траекторий, метод полифракционной совокупности, аспирационное укрытие.

ВВЕДЕНИЕ

Определение дисперсного состава пылевых аэрозолей необходимо для научно-обоснованного выбора эффективных пылеулавливающих аппаратов. Среди аналитических методов определения дисперсного состава можно выделить следующие методы: метод максимального диаметра [1], метод граничных траекторий [2-3], метод полифракционной совокупности [4-6].

Метод максимального диаметра состоит в определении максимального диаметра пылевых частиц, улавливаемых аспирационным патрубком, предположении о нормально-логарифмическом распределении пылевых аэрозолей в аспирируемом воздухе и определении угла наклона прямой в логарифмически вероятностной координатной сетке. Предполагалось, что эта прямая параллельна прямой, задающей гранулометрический состав материала, загружаемого в аспирационное укрытие.

Метод граничных траекторий состоит в определении траекторий пылевых частиц средних диаметров фракций и установлении их коэффициентов аспирации, как отношения площадей области аспирации и инерционного осуждения. Построение граничных траекторий в вихревых аэродинамических полях, тем более содержащих вращающиеся цилиндры-отсосы или цилиндры, затруднительно.

Метод полифракционной совокупности состоит в исследовании поведения группы пылевых частиц разных фракций, поступающих в аспирационное укрытие. Моделируется полет пылевых частиц до их полного осаждения и улавливания. Частицы пыли, улавливаемые аспирационным патрубком, «запоминаются». Процентный состав фракций определяется отношением количества частиц данной фракции к общему количеству частиц. Последний метод наиболее перспективен в настоящее время, поскольку позволяет исследовать изменение структуры аэрозольного потока в вихревых нестационарных аэродинамических полях при сложной конфигурации областей течения, которые могут содержать вращающиеся цилиндры.

Целью статьи является выявление закономерностей изменения дисперсного состава пылевых аэрозолей в зависимости от дисперсного состава пыли, поступающего в укрытие из загрузочного желоба, а также геометрии укрытия и скоростных параметров внутри него.

* Исследования выполнены при поддержке грантов Президента РФ МД-5015.2006.8 и РФФИ №05-08-01252а.

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Рассмотрим аспирационное укрытие, аэродинамика воздушных потоков которого изучалась в работе [3] экспериментальным путем (рис.1). Как показали исследования, характер распространения воздушных потоков внутри укрытия определяется взаимодействием приточной струи и всасывающим спектром воронки. Поле скоростей, построенное с помощью электротермоанемометра, и схема движения воздуха изображены на рис. 2а.

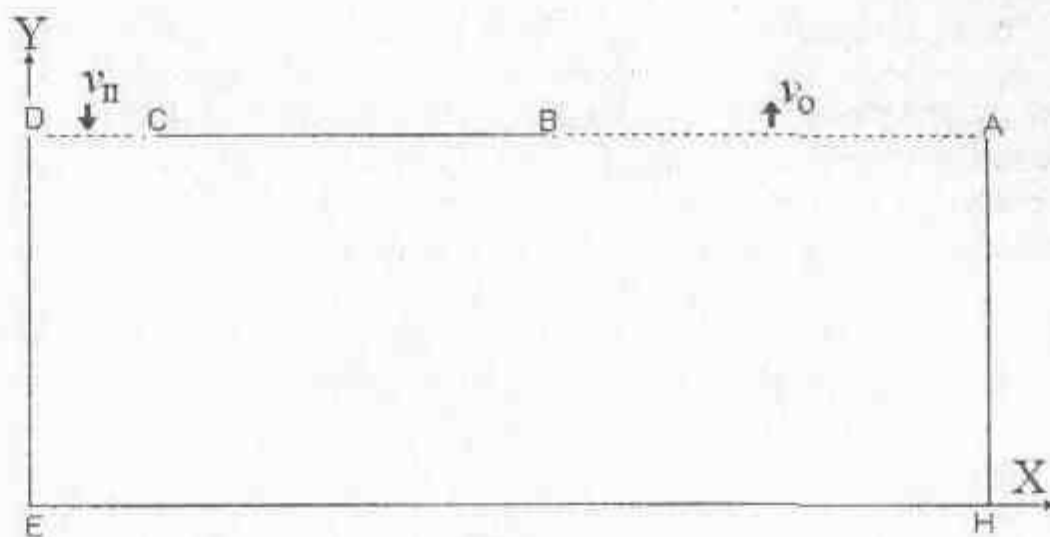


Рис. 1. Схема аспирационного укрытия
 $AB=0,70313\text{ м}$, $CD=0,1875\text{ м}$, $AH=0,6\text{ м}$, $HE=1,56063\text{ м}$,
 $v_0=1,04\text{ м/с}$, $v_{\text{п}}=3,9\text{ м/с}$

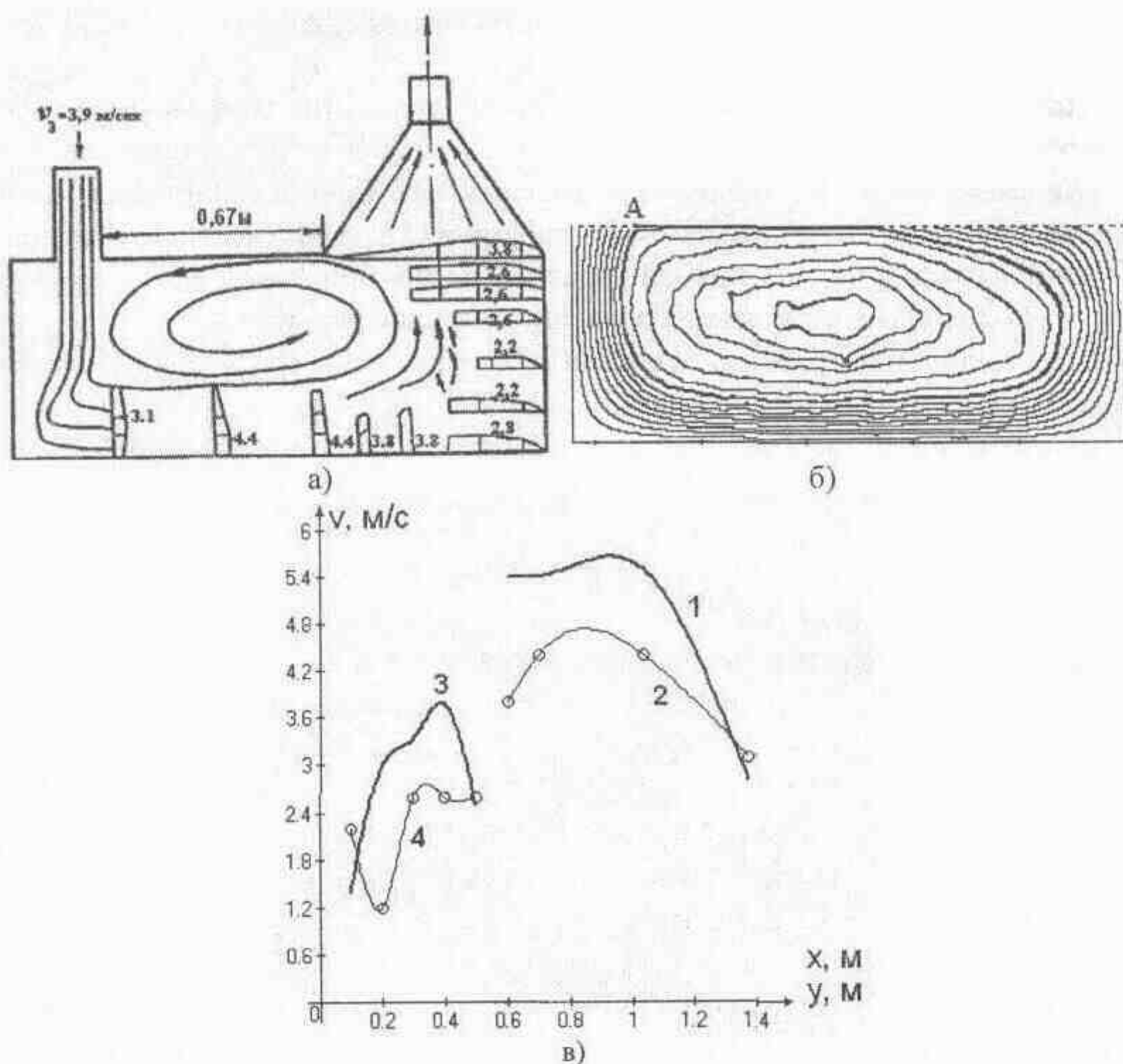


Рис.2. Схема движения и поля скоростей воздушных потоков внутри укрытий:
 а) экспериментальная картина; б) линии тока, построенные по программе и в) сравнение расчетных и экспериментальных величин (кружочки) скорости: 1-2 по горизонтали x по днищу укрытия; 3 – 4 по вертикали y у правой стенки укрытия



Предполагалось, что жидкость идеальна, несжимаема. На твердой стенке задано условие непротекания – нормальная составляющая скорости равна нулю. Во всасывающих проемах и приточных отверстиях скорости вдоль направления внешней нормали известны, при этом объем поступающего в укрытие воздуха равен объему воздуха, удаляемого из него. Моделирование аэродинамики внутри укрытия производилось методом дискретных вихрей (МДВ). Границу области дискретизируем контрольными точками и присоединенными вихрями. В контрольных точках выполняются граничные условия для нормальной составляющей скорости. Шаг дискретности – расстояние между соседними присоединенными вихрями или контрольными точками – приблизительно одинаков и равен $h=0,02\text{м}$. На изломах границы области расположены присоединенные вихри. В начальный момент времени воздух покоится во всем пространстве. В момент времени $t = +0$ «включаются» все приточные и вытяжные отверстия.

Подробное изложение алгоритмов численного расчета пыле- и аэродинамики внутри укрытия с использованием МДВ произведено в работах [3-6].

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 -ю 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 направлений 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 C приточного отверстия. При этом свободный вихрь, сошедший в момент времени t , имеет циркуляцию γ^t , равную циркуляции присоединенного вихря в t . C , 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, меньшее $h/2$, 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 .

Для вычисления концентрации пыли в вытяжном отверстии выбирается число l моментов времени поступления в область набора из s пылевых частиц. Осуществляется моделирование движения $l \cdot s$ частиц до тех пор, пока они все не осядут либо не будут уловлены отсосом. В процессе моделирования рассчитывается суммарная масса частиц, попавших в отсос. Выходная концентрация $C_{\text{вых}}$ при этом равна отношению этой массы к объему воздуха, который принес пылевые частицы в укрытие.

В каждый расчетный момент времени из приточного отверстия (загрузочного желоба) в укрытие поступало 10 пылевых частиц разных фракций. Таких моментов времени было 200, т.е. изучалось движение пылевого облака, состоящего из 2000 пылевых частиц.

В процессе моделирования ЭВМ запоминаются диаметры пылевых частиц, уловленных отсосом, и определяется процентный состав пылевых фракций в отсасываемом воздухе.

Моделирование движения пылевых частиц осуществляется на основании интегрирования уравнения их движения методом Рунге-Кутты.

Величины скорости по днищу укрытия (на расстоянии 0,05 м от него) и вблизи правой стенки (на расстоянии 0,1 м от нее), рассчитанные по компьютерной программе, отличаются от экспериментальных (рис.2б) в среднем на 27% (от 4% до 45%). Учитывая, что точность аэродинамического эксперимента составляет порядка 25%, можно говорить об удовлетворительном согласии расчета и эксперимента. Заметим, что расчет в каждой точке производился 5 раз, затем усреднялся, что связано с нестационарностью модели. Скорость в фиксированной точке пульсирует с течением времени. Например, в т. (0,1; 0,5) скорость изменялась от 2 до 3,1 м/с (система координат показана на рис.1). Вихревая структура течения, построенная по программе в фиксированный момент времени, когда свободные вихри полностью заполнили область (рис.2б), и полученная экспериментальным путем, идентичны.

Рассматривались модель построения поля скоростей внутри укрытия, когда свободные вихри полностью заполняют область течения, их положение фиксируется в определенный момент времени, т.е. имеем стационарное вихревое течение (рис.2 б), затем в область течения начинают поступать пылевые частицы.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассматривалось движение пылевых частиц 3500 кг/м^3 и разных динамических коэффициентов формы $\chi = 1$ (шарообразные частицы), $\chi = 3,5$ (острозернистые частицы), $\chi = 6,5$ (частицы пластинчатой формы).

Пыль движется поступательно вниз по безвихревой области течения, не поступая в область центрального вихря: вдоль низа укрытия и затем вверх у правой боковой стенки (рис. 3). Заметим, что возникающий «хвостик» за основным потоком частиц скользит по границе центрального вихря.

При задании дисперсного состава пылевых аэрозолей в загружаемом желобе по нормально-логарифмическому закону такому же закону будет подчинен дисперсный

состав пыли в аспирационном канале (табл.1). Нарушение этой закономерности при начальных и конечных фракциях наблюдается при полидисперсных материалах ($\alpha = 30^\circ - 40^\circ$). Здесь α – угол между прямой распределения пылевых частиц, построенных логарифмически вероятностной координатной сетке. Угловый коэффициент этой прямой равен [7]:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{1}{\lg\sigma},$$

где $\lg\sigma$ – стандартное (среднеквадратичное) отклонение логарифмов диаметров от их среднего значения.

Чем более однородна пылевая аэрозоль ($\alpha > 45^\circ$), тем больше проявляется данная закономерность. Во всасывающем канале пылевая аэрозоль более однородна, чем в загружаемом желобе. Однако при увеличении α это различие уменьшается, состав поступающей и отсасываемой аэрозоли практически совпадает. При увеличении коэффициента динамической формы пылевых частиц χ эти составы еще более приближаются.

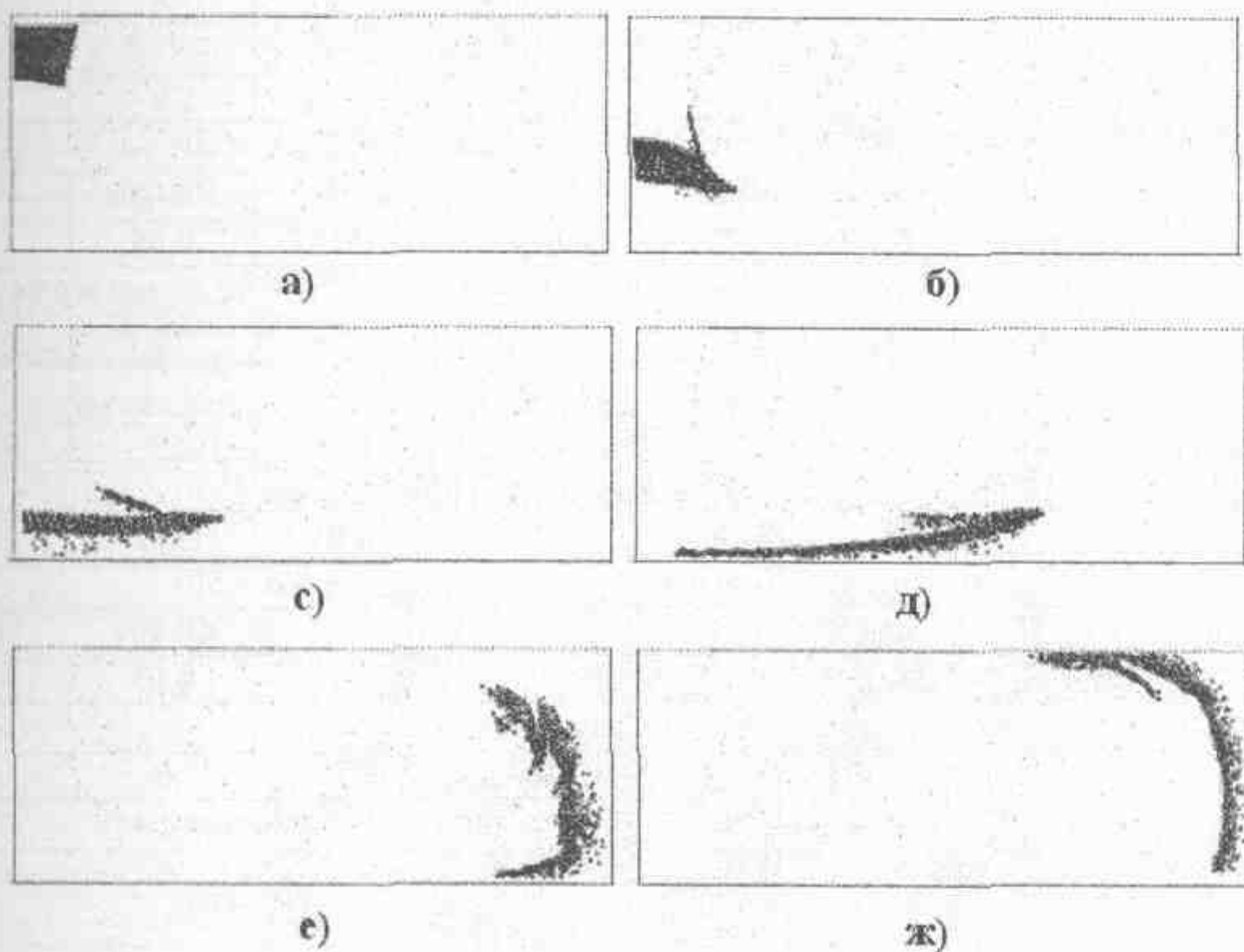


Рис. 3. Движение пылевого облака ($s = 20, l = 100$)

(точки – свободные вихри, кружочки – пылинки) с течением времени: а) – ж)

При изменении геометрических параметров укрытия и скоростей приточного и всасываемого воздуха дисперсный состав пылевых аэрозолей изменяется несущественно (табл. 2), что позволяет распространить полученные результаты и на укрытия других типоразмеров. При размещении вращающихся внутри укрытия цилиндра или цилиндра-отсоса состав всасываемой пылевой аэрозоли не подчиняется нормально-логарифмическому распределению. Для цилиндра-отсоса характерно существенное смещение дисперсного состава пылевых частиц к мелким фракциям. В табл. 2 указываются только измененные параметры, все остальные остаются такими же, как на рис. 1. При размещении внутри укрытия цилиндра-отсоса всасывающее отверстие АВ «отключено».



При задании равномерного состава пылевых частиц (табл. 3) дисперсный состав пыли во всасываемом воздухе не подчинен нормально-логарифмическому распределению.

Полученные результаты могут быть использованы для научно-обоснованного выбора пылеулавливающих аппаратов систем аспирации при перегрузках сыпучих материалов.

Таблица 1

Дисперсный состав пыли при различной полидисперсности материала

Дисперсный состав пыли в загрузочном желобе при $\alpha = 30^\circ$, мкм и доли							
2-5	5-10	10-20	20-40	40-60	60-100	100-300	>300
0,0425	0,0575	0,1	0,16	0,14	0,13	0,24	0,13
Дисперсный состав пыли в аспирационном канале при $\chi = 1, \alpha = 47,7^\circ, \text{tg}\alpha = 1,1$							
0,176	0,189	0,354	0,281	0	0	0	0
$\chi = 3,5, \alpha = 42^\circ, \text{tg}\alpha = 0,9$							
0,106	0,114	0,239	0,321	0,211	0,009	0	0
$\chi = 6,5, \alpha = 39,7^\circ, \text{tg}\alpha = 0,83$							
0,092	0,098	0,207	0,288	0,238	0,076	0	0
Дисперсный состав пыли в загрузочном желобе при $\alpha = 40^\circ$							
2-5	5-10	10-20	20-40	40-60	60-100	100-200	>200
0,07	0,15	0,23	0,25	0,12	0,1	0,06	0,02
Дисперсный состав пыли в аспирационном канале при $\chi = 1, \alpha = 50,2^\circ, \text{tg}\alpha = 0,84$							
0,128	0,287	0,383	0,203	0	0	0	0
$\chi = 3,5, \alpha = 45,8^\circ, \text{tg}\alpha = 1,029$							
0,096	0,212	0,301	0,299	0,09	0,001	0	0
$\chi = 6,5, \alpha = 44,8^\circ, \text{tg}\alpha = 0,992$							
0,088	0,196	0,288	0,284	0,114	0,031	0	0
Дисперсный состав пыли в загрузочном желобе при $\alpha = 50^\circ$							
2-5	5-10	10-20	20-40	40-60	60-600		
0,13	0,29	0,34	0,18	0,03	0,03		
$\chi = 1, \alpha = 53,6^\circ, \text{tg}\alpha = 1,357$							
0,164	0,372	0,379	0,086	0	0		
$\chi = 3,5, \alpha = 51,6^\circ, \text{tg}\alpha = 1,26$							
0,141	0,33	0,35	0,162	0,017	0		
$\chi = 6,5, \alpha = 50,9^\circ, \text{tg}\alpha = 1,23$							
Дисперсный состав пыли в загрузочном желобе при $\alpha = 60^\circ$							
2-5	5-10	10-20	20-200				
0,3	0,5	0,19	0,01				
$\chi = 1, \alpha = 61,14^\circ, \text{tg}\alpha = 1,814$							
0,326	0,505	0,167	0,002				
$\chi = 3,5, \alpha = 60,15^\circ, \text{tg}\alpha = 1,743$							
0,315	0,499	0,183	0,003				
$\chi = 6,5, \alpha = 60,15^\circ, \text{tg}\alpha = 1,743$							
0,313	0,497	0,185	0,005				



Таблица 2

Дисперсный состав пыли при изменении геометрических и кинематических параметров аспирационного укрытия

Дисперсный состав пыли в загрузочном желобе при $\alpha = 45^\circ$						
2-5	5-10	10-20	20-40	40-60	60-100	100-600
0,1	0,23	0,31	0,24	0,07	0,04	0,01
Дисперсный состав пыли в аспирационном канале при $\chi = 1, \alpha = 52^\circ, \text{tg}\alpha = 1,28$						
0,137	0,333	0,373	0,157	0	0	0
BC = 0,2						
0,133	0,327	0,364	0,176	0	0	0
BC = 0,4						
0,134	0,328	0,366	0,172	0	0	0
h = 0,4						
0,135	0,329	0,369	0,166	0	0	0
h = 0,2						
0,132	0,327	0,394	0,147	0	0	0
$v_0 = 2,08, v_n = 7,8$						
0,151	0,354	0,399	0,095	0	0	0
$v_0 = 0,52, v_n = 1,95$						
0,142	0,331	0,377	0,15	0	0	0
С вращением цилиндра радиусом 0,1 м с центром в т. (0,34;0,27) и скоростью вращения 5 м/с против часовой стрелки						
0,141	0,35	0,409	0,1	0	0	0
С вращением цилиндра-отсоса радиусом 0,1 м, шириной всасывающего отверстия 0,1 м, с центром в т.(0,3;0,31) и скоростью вращения 5 м/с против часовой стрелки						
0,514	0,243	0,135	0,108	0	0	0
$\chi = 3,5, \alpha = 46^\circ, \text{tg}\alpha = 1,043$						
0,111	0,272	0,325	0,238	0,053	0,001	0
$\chi = 6,5, \alpha = 46^\circ, \text{tg}\alpha = 1,043$						
0,107	0,262	0,321	0,233	0,065	0,012	0

Таблица 3

Дисперсный состав пыли при равномерном распределении пылевых частиц по фракциям

Дисперсный состав пыли в загрузочном желобе при $\chi = 1$									
2-12	12-22	22-32	32-42	42-52	52-62	62-72	72-82	82-92	92-102
мкм	мкм	мкм	мкм	мкм	мкм	мкм	мкм	мкм	мкм
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Дисперсный состав пыли в аспирационном канале									
0,368	0,358	0,255	0,019	0	0	0	0	0	0

Литература

1. Минко В.А. Обеспыливание технологических процессов производства строительных материалов / В.А. Минко. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1981. – 176 с.
2. Логачев И.Н. О прогнозировании дисперсного состава и концентрации грубодисперсных аэрозолей в местных отсосах систем аспирации / И.Н. Логачев, К.И. Логачев // Известия вузов. Строительство. – 2002. – №9. – С. 85–90.
3. Логачев И.Н. Аэродинамические основы аспирации / И.Н. Логачев, К.И. Логачев. – СПб.: Химиздат, 2005. – 659 с.
4. Логачев К.И. Численное исследование поведения пылевой аэрозоли в аспирационном укрытии / И.Н. Логачев, К.И. Логачев, А.И. Пузанок // Известия вузов. Строительство. – 2006. – №5. – С. 73–78.



5. Численное исследование пылединамики в аспирационном укрытии / К.И. Логачев, И.Н. Логачев, А.И. Пузанок, В.Н. Посохин // Национальная конференция по теплоэнергетике НКТЭ-2006; Казань, Россия, 4-8 сентября 2006. – Казань, 2006. – Т. 2. – С. 293-296.

6. 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. – Разд. 1. – С. 195-201 (<http://www.srcc.msu.su/num-meth>).

7. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П.А. Коузов. – Ленинград: Химия, 1974. – 280 с.

8. О зависимости дисперсного состава аспирируемой пыли и гранулометрического состава перерабатываемого материала / В.А. Минко, В.М. Киреев, А.И. Алифанова и др. // Сб. докладов Всерос. науч.-практ. конф. «Современные проблемы технического, естественнонаучного и гуманитарного знания». – Губкин, 2007. – С. 113-117.

COMPUTER DESIGN OF DISTRIBUTION OF DUSTBORNE AEROSOLS IS IN ASPIRATION SHELTER

K.I. Logachev¹⁾, O.A. Averkova¹⁾, Star of V.Yu.¹⁾

1) Belgorod state technological university the name of V.G.Shukhova

With the use of developed on the basis of method of singularic integral equalizations of the computer program, the calculation of dynamics of dustborne aerosols is made in aspirated from shelter air. Conformities to the law of change of dispersible composition of dustborne aerosols are exposed depending on initial factious composition of dust in a load chamber, construction of shelter, speed parameters and presence of the revolved cylinder or cylinder-sucking.

Keywords: method of singular integral equalizations, dispersible composition of dustborne aerosols, factious composition of dust, method of maximal diameter, method of scope trajectories, method of polyfraction aggregate, aspiration shelter.