Международная научная конференция по региональным проблемам гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды
2-4 октября 2012 г.,Казань,

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОБООТБОРА ДИСПЕРСНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

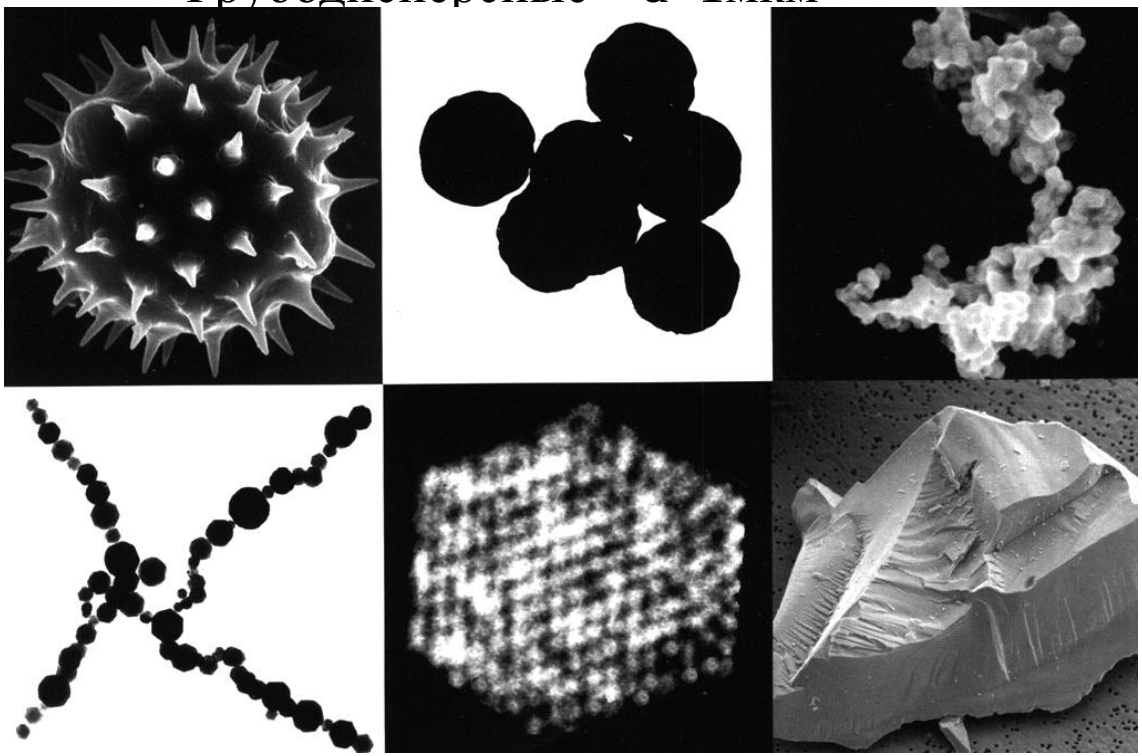
Зарипов Ш.Х.
Казанский федеральный университет, Институт экологии и географии, Россия

Аэрозоль – аэродисперсная система с твердыми или жидкими частицами

Диапазон изменения размеров частиц 1 нм -100 мкм

Высокодисперсные аэрозоли d<0.05-0.1мкм (50-100 нм)

Грубодисперсные – d>1мкм



J. of Aerosol Science

а) спора растений (биоаэрозоль); б) малый агрегат из семи первичных частиц конденсационного происхождения; в) крупный рыхлый агрегат первичных частиц; г) фрактальная структура вторичных частиц типа сажи; д) вирус (биоаэрозоль); е) крупная твердая частица неправильной формы диспергационного происхождения.

To help protect your privacy, PowerPoint prevented this external picture from being automatically downloaded. To download and display this picture, click Options in the Message Bar, and then click Enable external content.

Источники аэрозолей

Smoke from forest fires
Sheremetyevo 2010 08 07

sneeze = 100,000 particles
traveling at 200 mph

Задачи

1. Мониторинг
2. Воздухоочистка
3. Технологии

Грубодисперсные аэрозоли

Инерция

Сила тяжести

Высокодисперсные аэрозоли

Броуновское движение.

Форетические силы (термофорез, диффузиофорез, фотофорез)

Электрические силы.

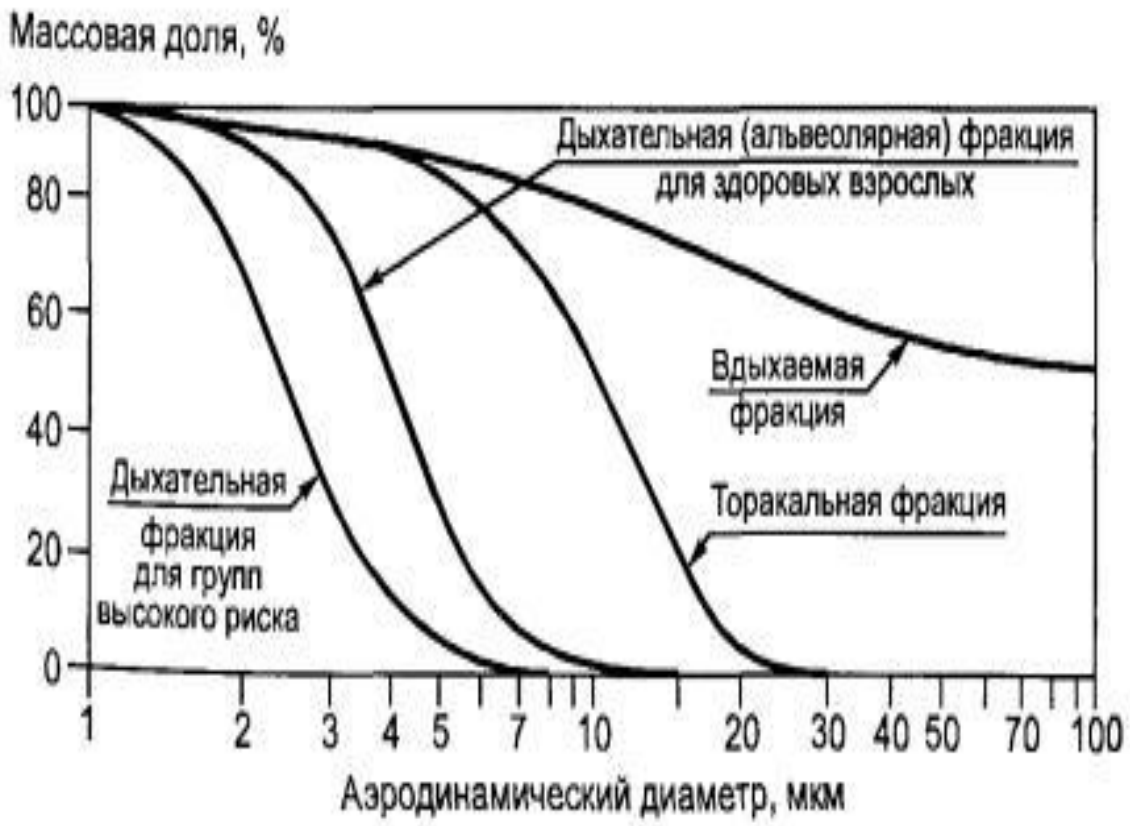
стандарт ИСО 7708:1995 - Качество воздуха. Распределение частиц по фракциям с учетом влияния на здоровье

ИСО- стандарты международной организации по стандартизации

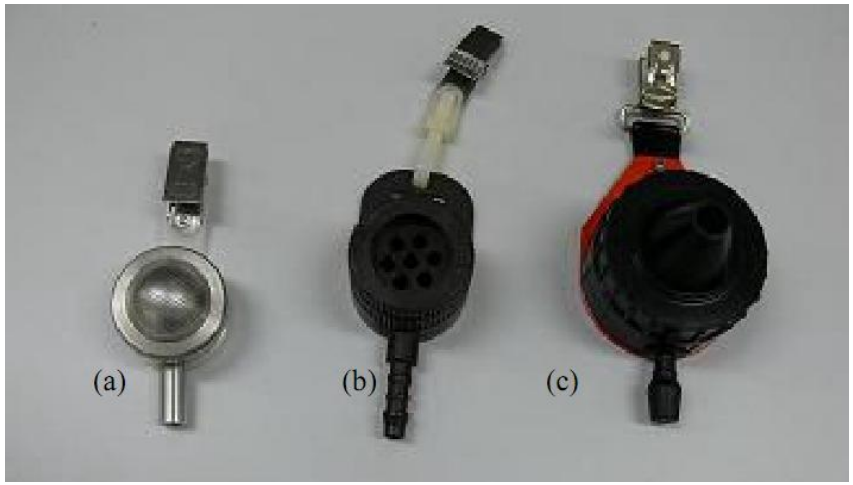
- **ВДЫХАЕМАЯ ФРАКЦИЯ (INHALABLE FRACTION)** - Массовая доля всех взвешенных в воздухе частиц, которые вдыхаются через нос и рот. Вдыхаемая фракция зависит от скорости и направления движения воздуха, интенсивности вдыхания и других факторов.

ТОРАКАЛЬНАЯ ФРАКЦИЯ (THORACIC FRACTION)
- Массовая доля вдыхаемых частиц, попадающих за пределы гортани.

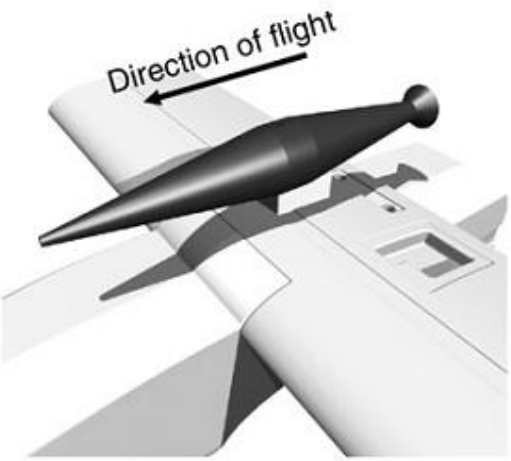
РЕСПИРАБЕЛЬНАЯ (ДЫХАТЕЛЬНАЯ) ФРАКЦИЯ (RESPIRABLE FRACTION) -
Массовая доля вдыхаемых частиц, попадающих в нижние дыхательные пути.



Кривые вдыхаемой, торакальной и дыхательной фракций по стандарту ИСО 7708:1995



Darrah K. Schmees , Yi-Hsuan Wu and James H. Vincent



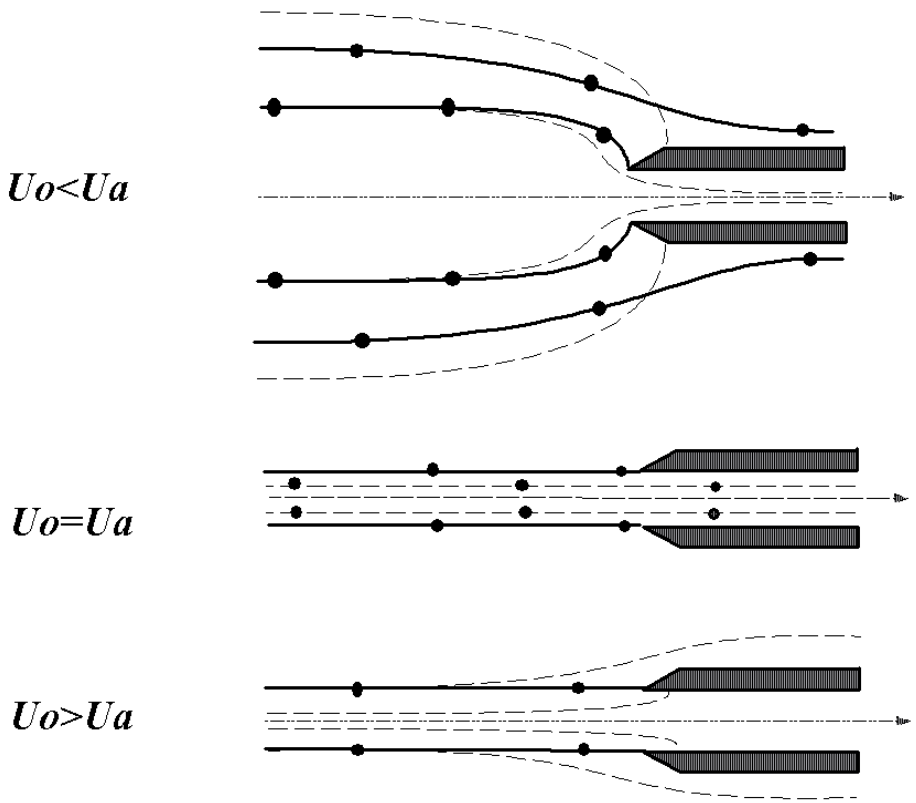
K. Peräjärvi[1,*], J. Lehtinen[2], R. Pöllänen[1] and H. Toivonen[1]

W. Koch et.al.

Задачи теории пробоотбора аэрозольных частиц

1.Пробоотбор в движущемся воздухе
2.Пробоотбор в малоподвижном и неподвижном воздухе
3. Различные типы пробоотборников:
тонкостенные, пробоотборник с затупленной головной частью.
4. Положение пробоотборника относительно направлений ветра и силы тяжести
5. Персональные пробоотборники
6. Нестационарная аспирация
7. Дыхание человека

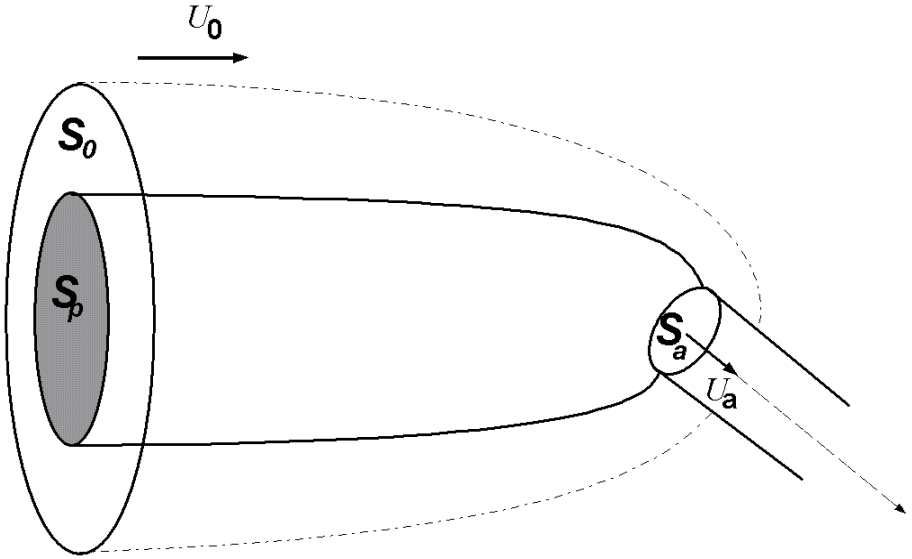
Аспирация аэрозоля в подвижном воздухе



$$R_a = U_0 / U_a$$

U_0 - скорость ветра, U_a - скорость аспирации

Аспирация аэрозоля в подвижном воздухе



$$A(t) = \frac{N_a(t+\Delta t)}{N_0(t)} = \frac{\int\limits_{S_a} c_a(x,y,t+\langle\Delta t\rangle) v_{pa}(x,y,t+\langle\Delta t\rangle)\,dydx}{\int\limits_{S_0} c_0(x,y,t) v_{p0}(x,y,t)\,dydx}$$

$$A(t) = \frac{\int\limits_{S_p} c_p(x,y,t) v_{pp}(x,y,t)\,dydx}{\int\limits_{S_0} c_0(x,y,t) v_{p0}(x,y,t)\,dydx}$$

$$A = \frac{S_p}{S_0}$$

Коэффициент аспирации

$$A = f(R_a, d_p, \rho_p, L_i, \mathrm{St}, v_s, \mathrm{Re}, B)$$

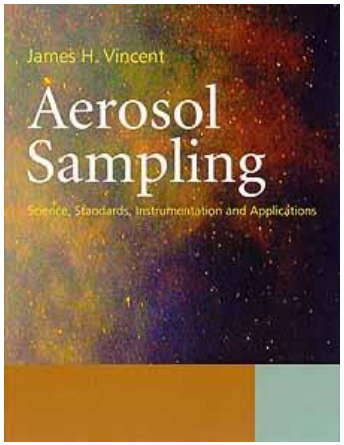
Левин Л.М., Беляев С.П., Кустов В.Т., Волощук В.М.,

Гриншпун С.А., Липатов Г.Н.,

Медведев А.А., Сутугин А.Г.

Davies C.N., Vincent J.H., Dunnett S.,

Ingham D.B., Wen X., Willeke K.



Математическая постановка

Допущения

Малая концентрация дисперсной фазы – нет влияния дисперсной фазы на течение газа

Течение несущей среды –вязкое течение несжимаемого газа

1. **Определение поля скоростей течения несущей среды**
2. **Расчет траекторий аэрозольных частиц**

Скорость течения газовой среды

$$\bar{u} = \bar{u}(\bar{r}), \bar{u} = \{u_x, u_y, u_z\}, \bar{r} = \{x, y, z\}$$

Модели течения несущей среды
(приближение несжимаемого газа)

1. Потенциальное течение

a. Аналитические модели:
модели одиночного точечного стока и многоточечного стока (идеализированные модели);
плоские задачи -ТФКП (щелевой пробоотборник)

b. Численные модели
метод граничных элементов

2. Модели вязких течений:
численное решение уравнений Навье-Стокса (CFD программы)

Уравнения движения аэрозольных частиц (лагранжев подход)

$$m\frac{d\bar{v}}{dt} = m\beta\left(\bar{u} - \bar{v}\right) + m\bar{g}$$

аэродинамическое сопротивление

сила тяжести

$\beta = 3\pi\mu d / m$

$\bar{v} = \bar{v}(x, y, z)$ **скорость частицы**

$\bar{u} = \bar{u}(x, y, z)$ **скорость газа**

μ **динамический коэффициент вязкости**

d **диаметр частицы**

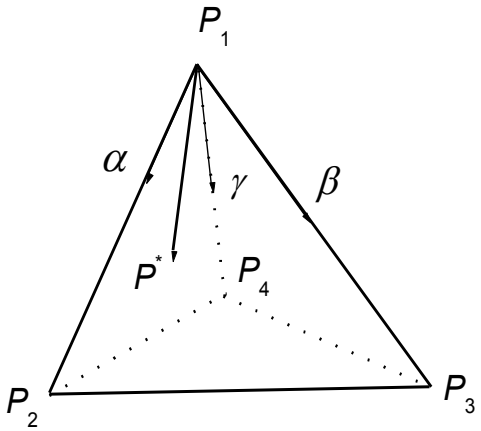
m **масса частицы**

Методы численного интегрирования уравнений движения частиц

Метод Рунге-Кутта четвертого порядка
Неявный метод Гира четвертого порядка точности

Интерполяция значений скорости газа в поле скоростей $\bar{u} = \bar{u}(x, y, z)$, найденном из решения уравнений Навье-Стокса в программе Fluent

$P^*(x^*, y^*, z^*)$ **- текущая точка траектории частицы**



$$\overline{P_1P^*} = \alpha\,\overline{P_1P_2} + \beta\,\overline{P_1P_3} + \gamma\,\overline{P_1P_4}$$

Система уравнения для коэффициентов α, β, γ

$$x^* - x_1 = \alpha\left(x_2 - x_1\right) + \beta\left(x_3 - x_1\right) + \gamma\left(x_4 - x_1\right),$$

$$y^* - y_1 = \alpha\left(y_2 - y_1\right) + \beta\left(y_3 - y_1\right) + \gamma\left(y_4 - y_1\right),$$

$$z^* - z_1 = \alpha\left(z_2 - z_1\right) + \beta\left(z_3 - z_1\right) + \gamma\left(z_4 - z_1\right),$$

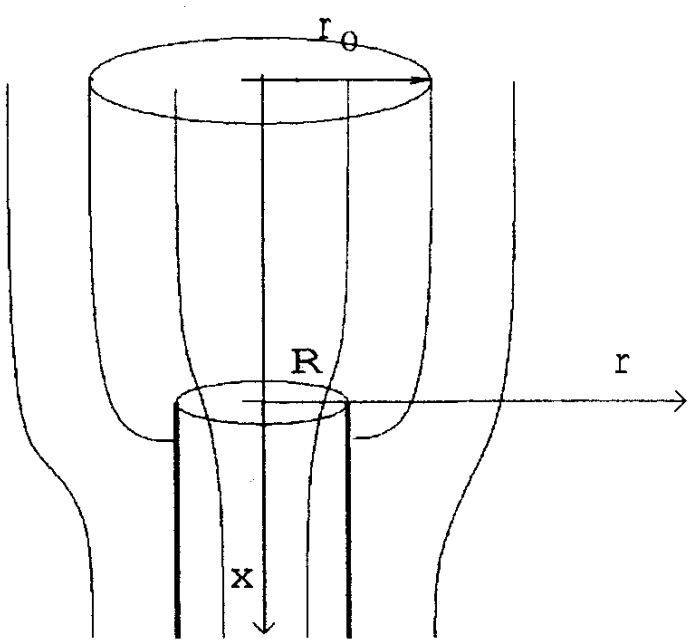
Условие нахождения в текущем конечном объеме

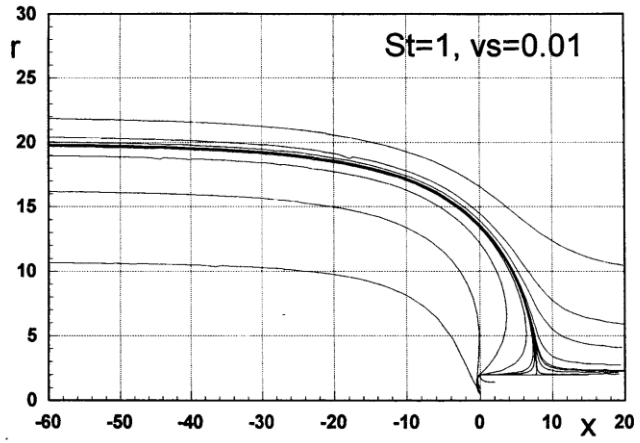
$$\alpha \geq 0, \beta \geq 0, \gamma \geq 0, \alpha + \beta + \gamma \leq 1$$

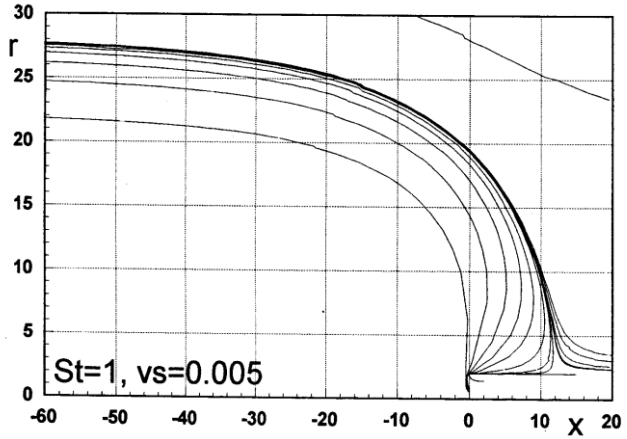
Вычисление значений составляющих скорости газа в текущей точке траектории частицы по значениям в вершинах текущего конечного объема

$$u(x^*, y^*, z^*) = u_1 + \alpha\left(u_2 - u_1\right) + \beta\left(u_3 - u_1\right) + \gamma\left(u_4 - u_1\right),$$

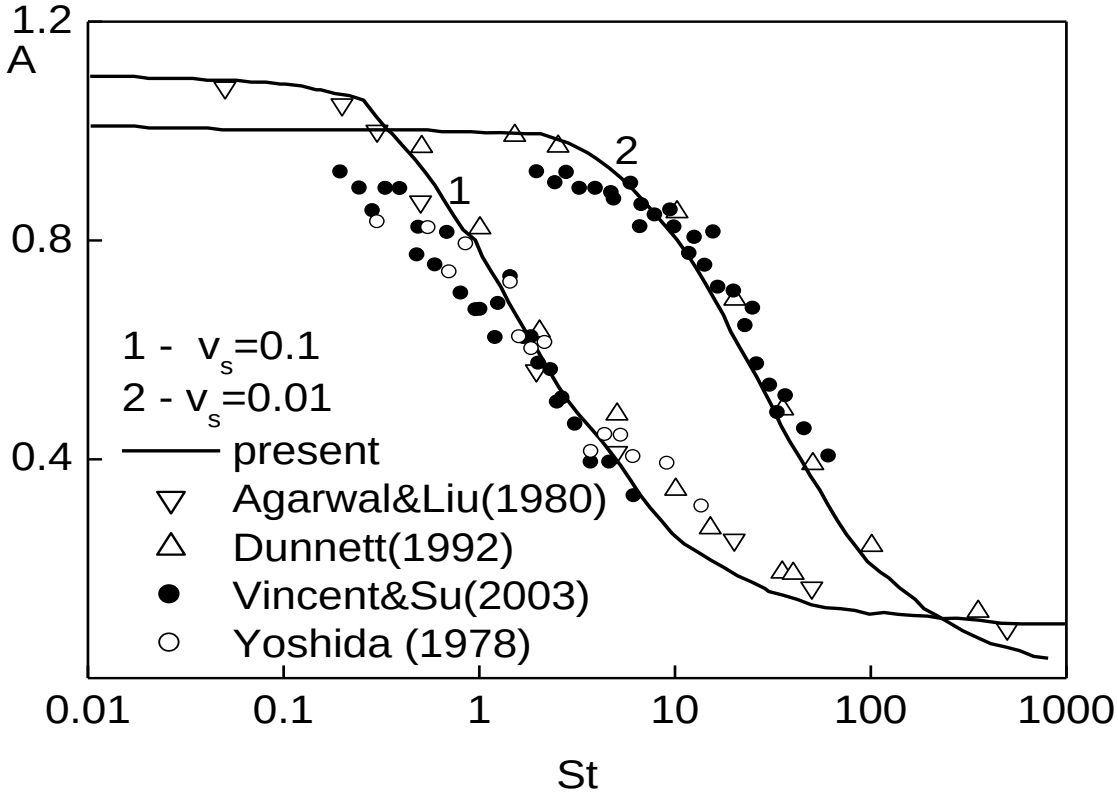
Пробоотбор в трубку из неподвижного воздуха







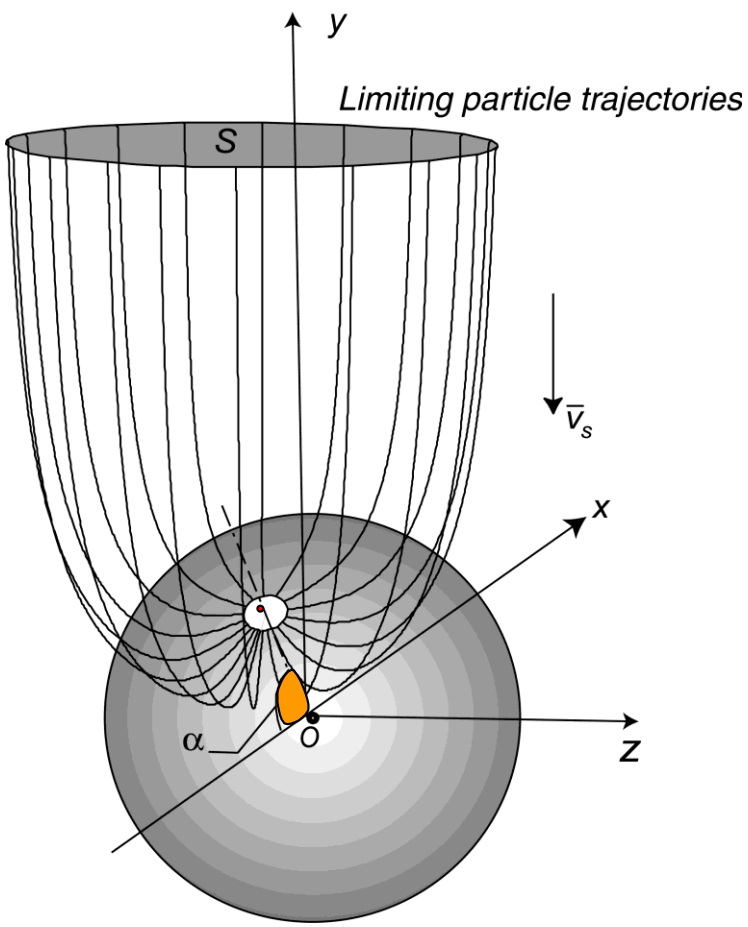
$$A = \frac{c_a}{c_0} = \frac{r_0^2 V_S}{R^2 U_a}$$



A

Зависимость коэффициента аспирации
от числа Стокса

Сферический пробоотборник в неподвижном воздухе



Коэффициент аспирации

$$A = \frac{Sv_s}{Q} = \frac{4S\,V_s}{\pi\delta^2 U_s}$$

$$B = \frac{D}{\delta}, \quad H = B^{-1}$$

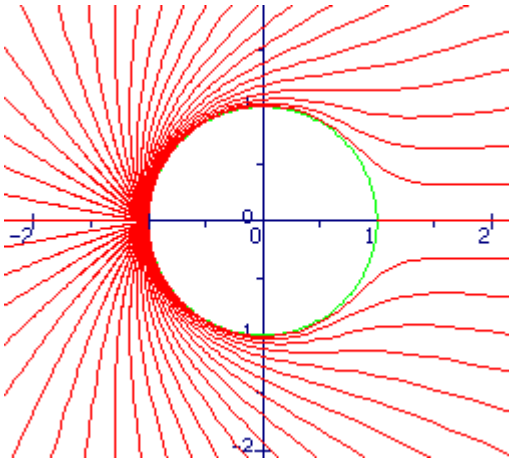
Модели течений несжимаемой жидкости:

I. Потенциальное течение

1. Модель точечного стока
2. Модель многоточечного стока - Galeev and Zaripov (2003)
3. Метод граничных элементов - Dunnett and Wen (2002)

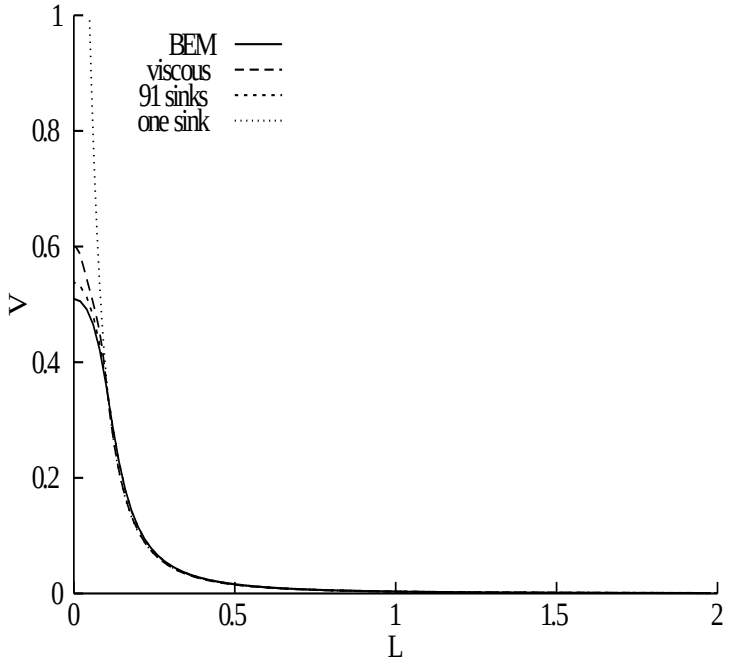
II. Вязкое течение –Dunnett, Zaripov et.al.(2006)

Линии тока

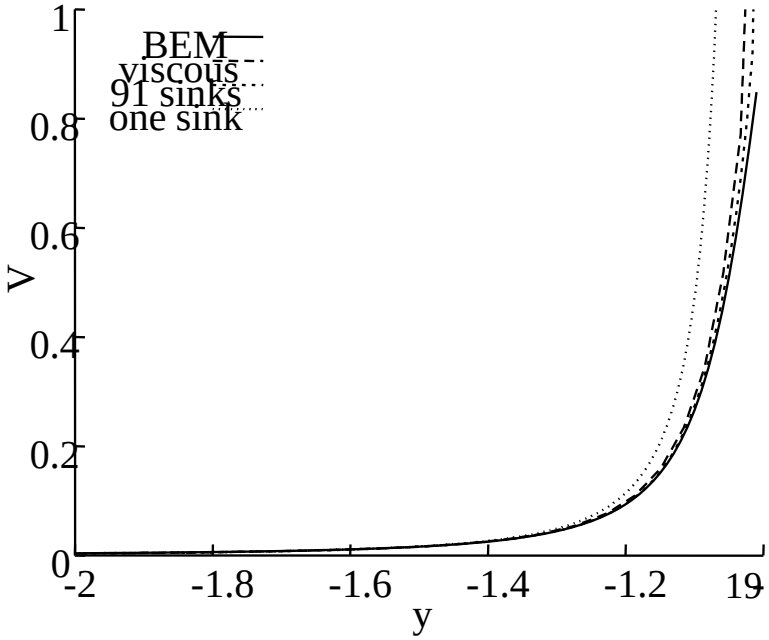


Распределение скорости газа для B=10

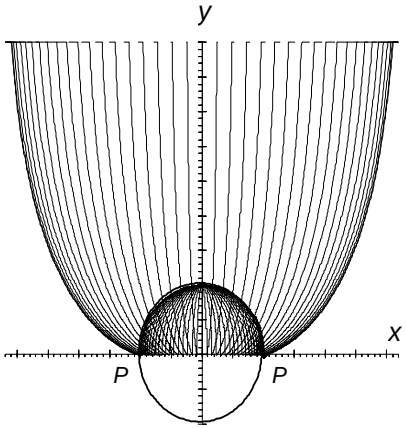
На линии перпендикулярной оси симметрии при y=1.05.

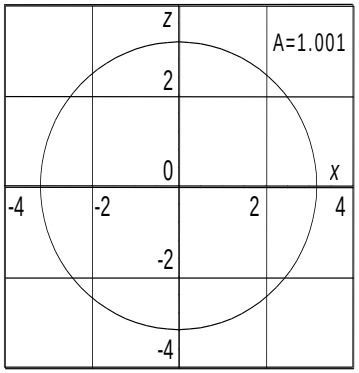


Вдоль оси симметрии

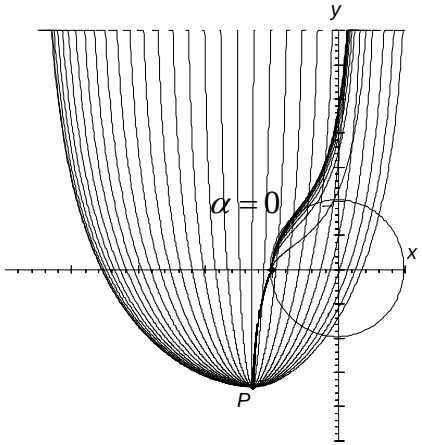


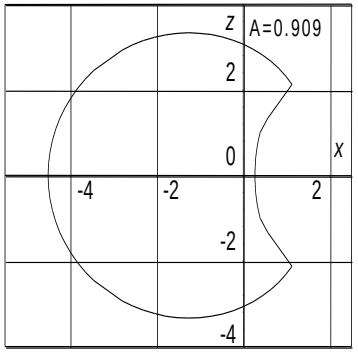
$\alpha=\pi/2$



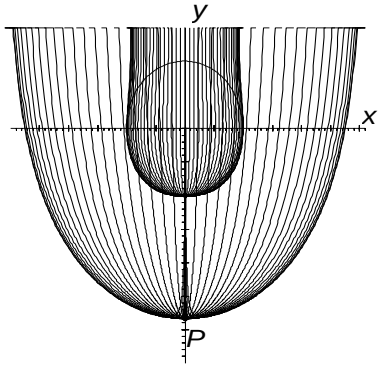


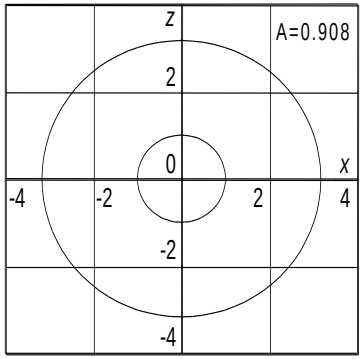
$\alpha=0$



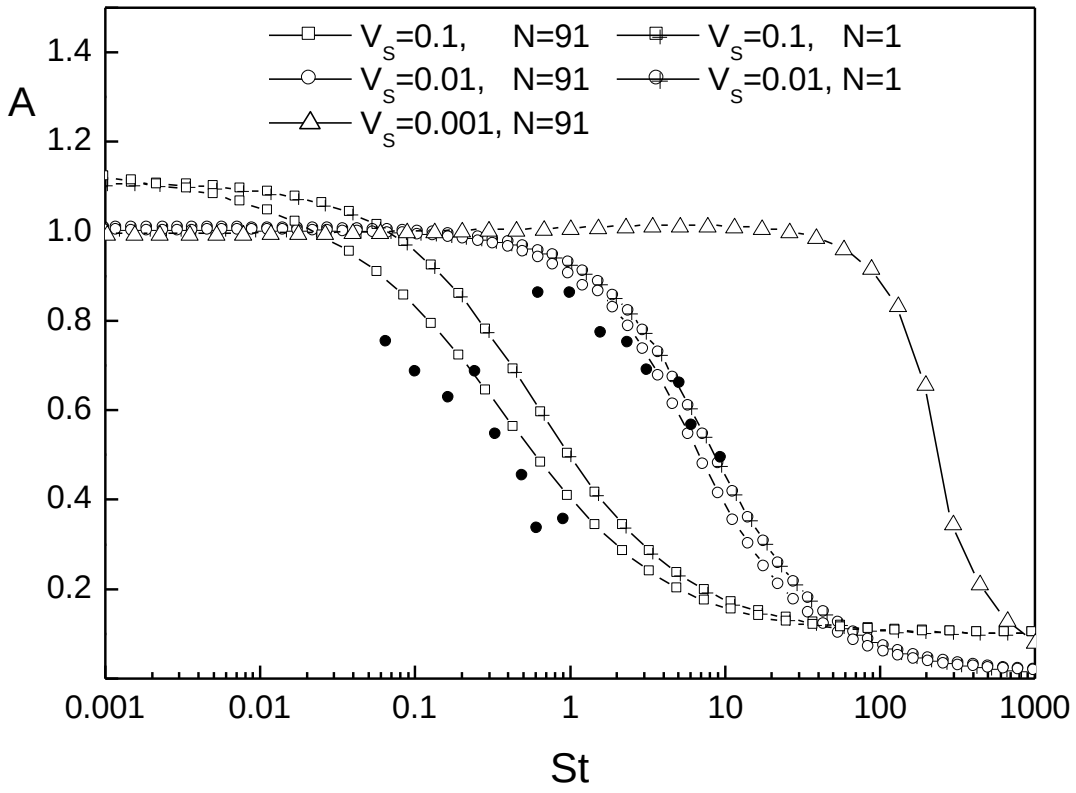


$\alpha=-\pi/2$

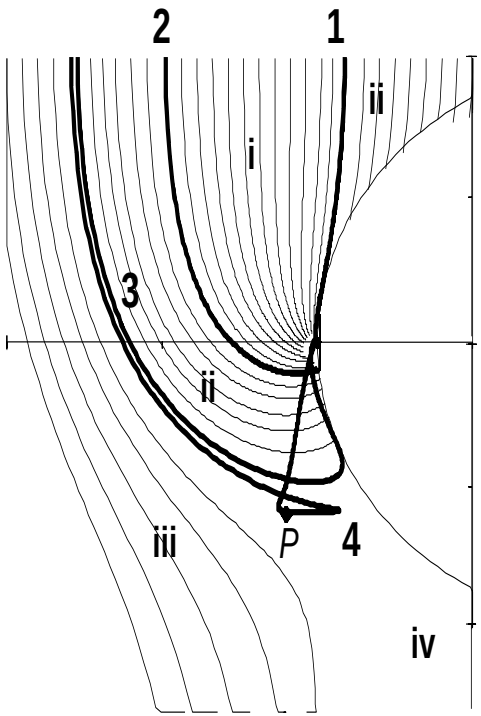


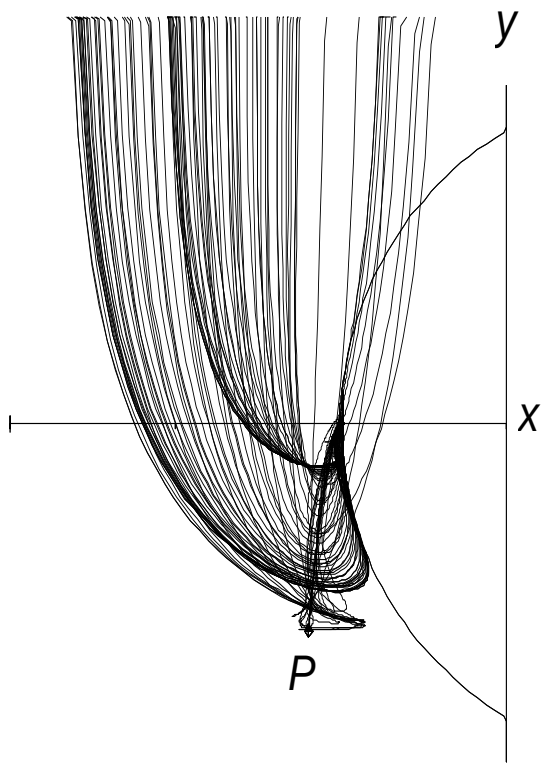


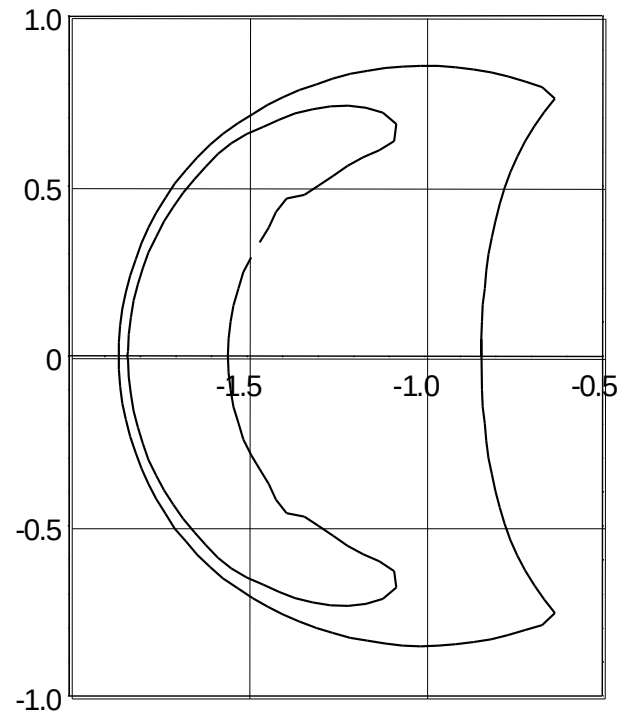
$\alpha=\pi/2$



$A(St_C)$ для Vs=0.1 и 0.01

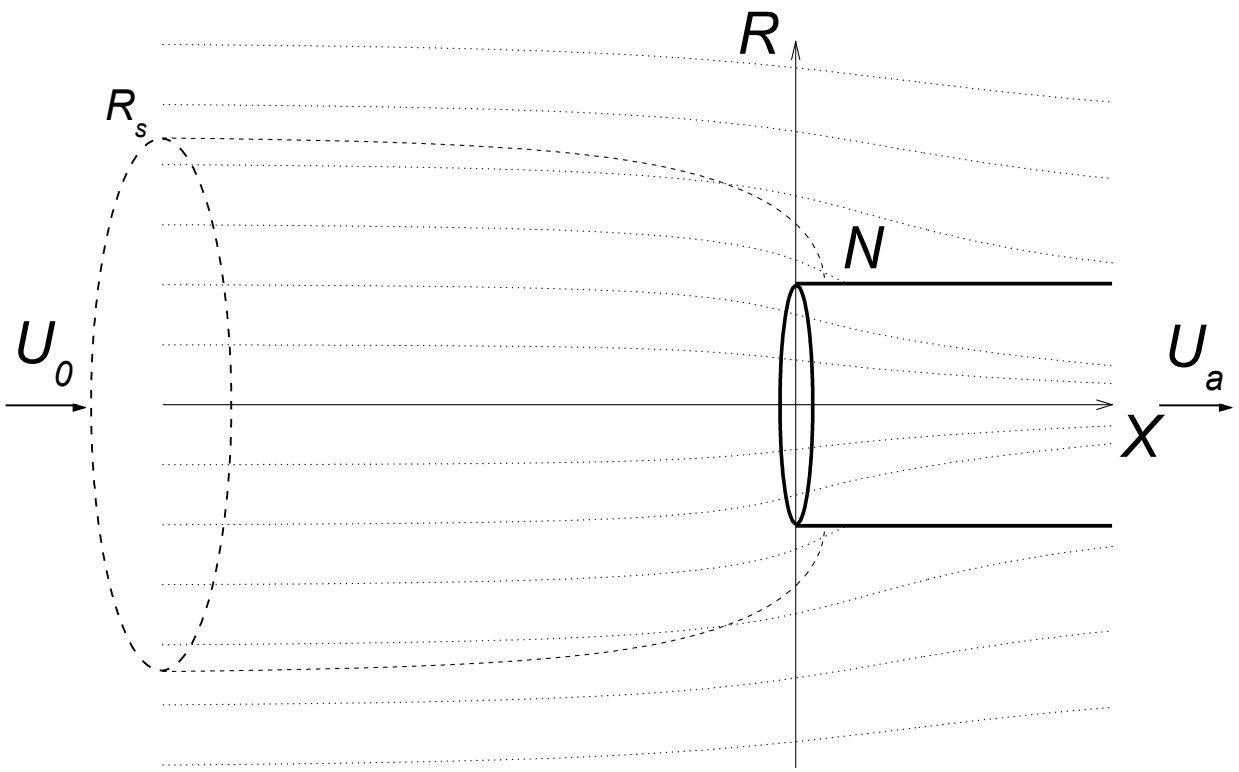

2
1
ii
i
3
ii
iii
P
4
iv


y
x
P


1.0
0.5
0
-0.5
-1.0
-1.5
-1.0
-0.5

Исследование коэффициента аспирации аэрозольных частиц для тонкостенной трубки в расширенном диапазоне отношения скоростей ветра и аспирации

$R_a<1$



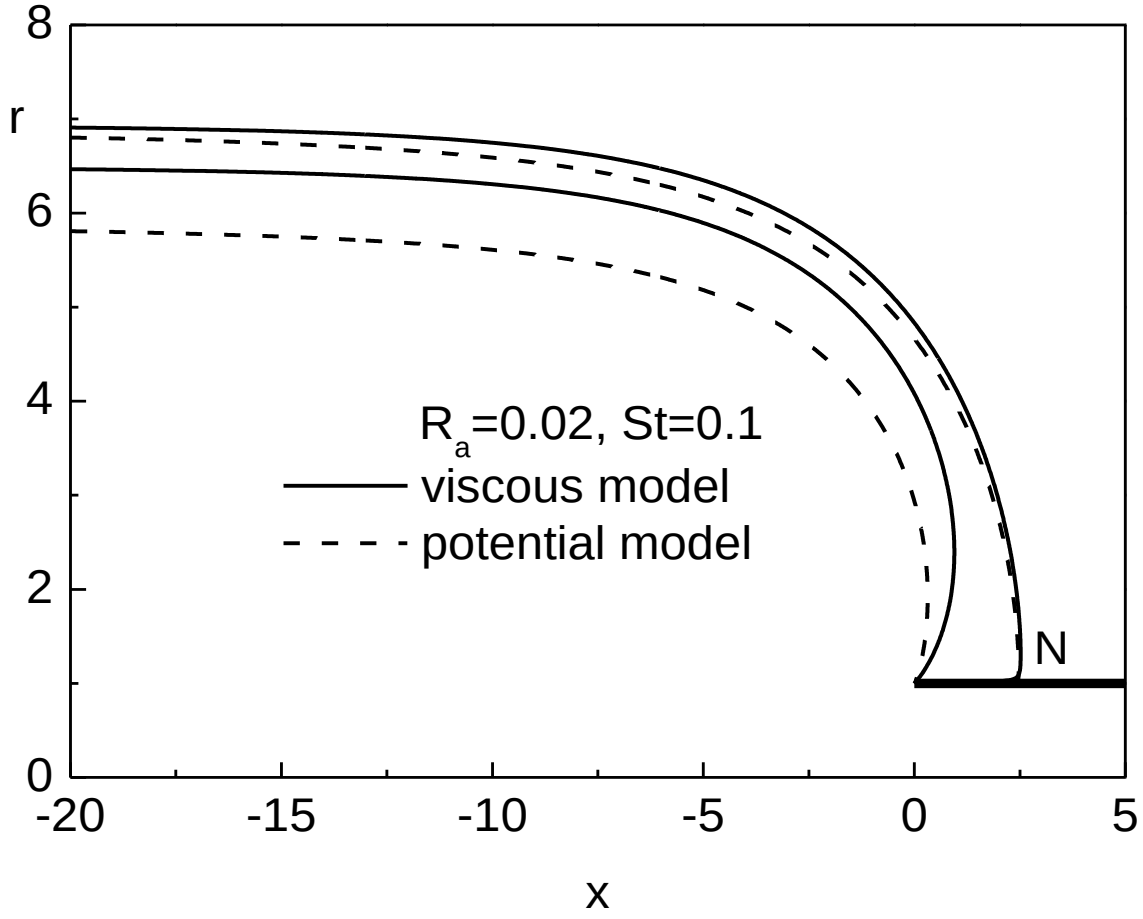
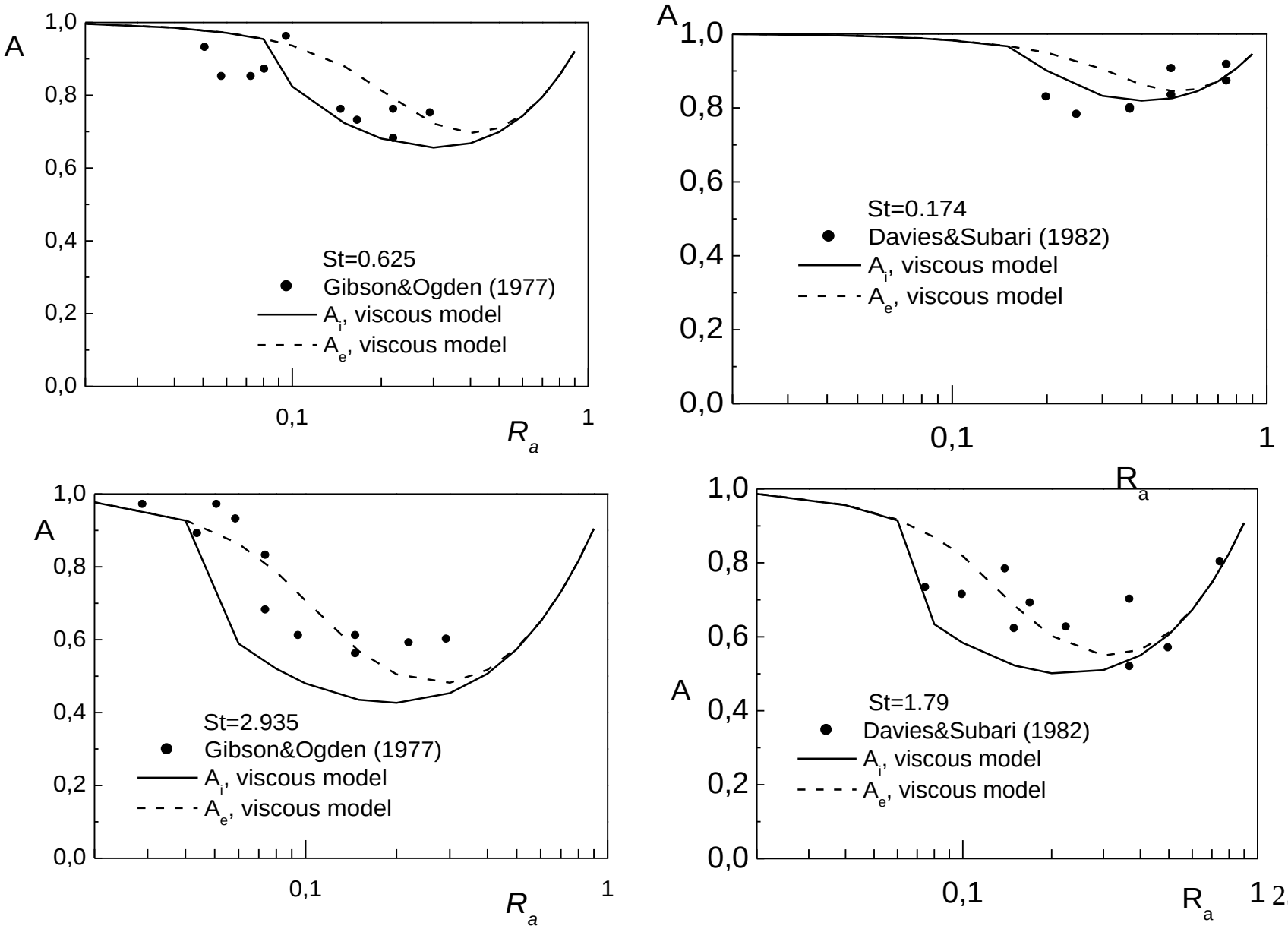


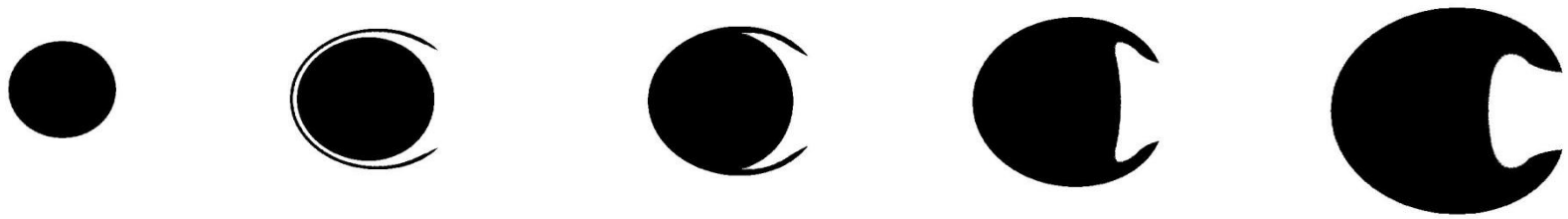
Рис.5 Предельные траектории для *Ra*=0.02 и St=0.1

Сравнение зависимостей *Ai(Ra)* и *Ae(Ra)* и экспериментальных данных из работ Gibson&Ogden (1977) и Davies&Subari (1982)

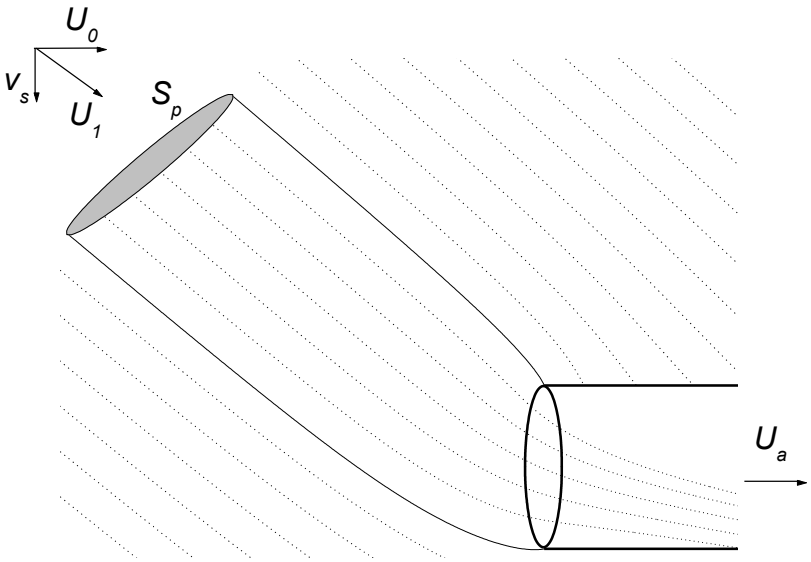


Влияние силы тяжести

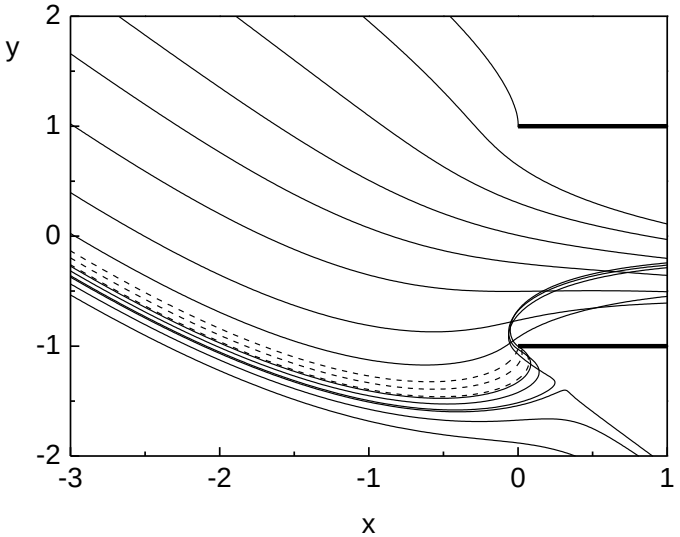
Область захвата аэрозольных частиц при малых *Ra* при St=1.



R_a=0.2 R_a=0.1 R_a=0.08 R_a=0.04 R_a=0.



U_0



$R_a<1$

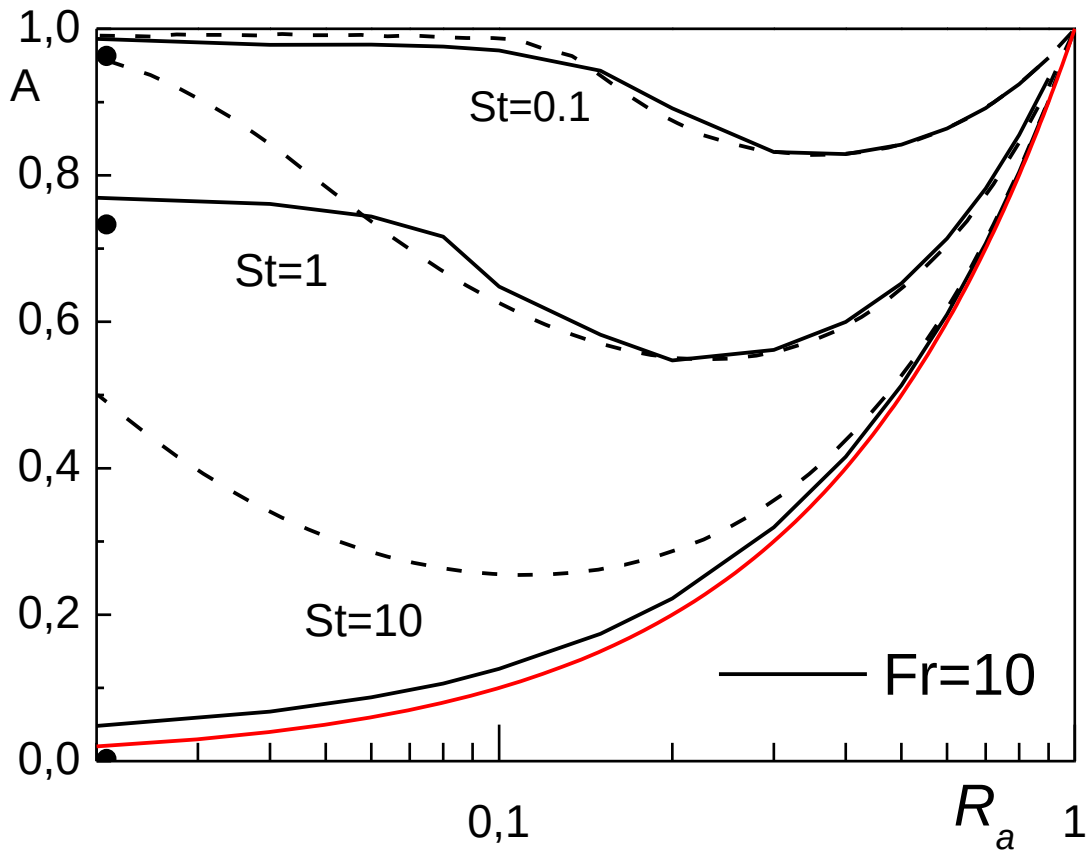
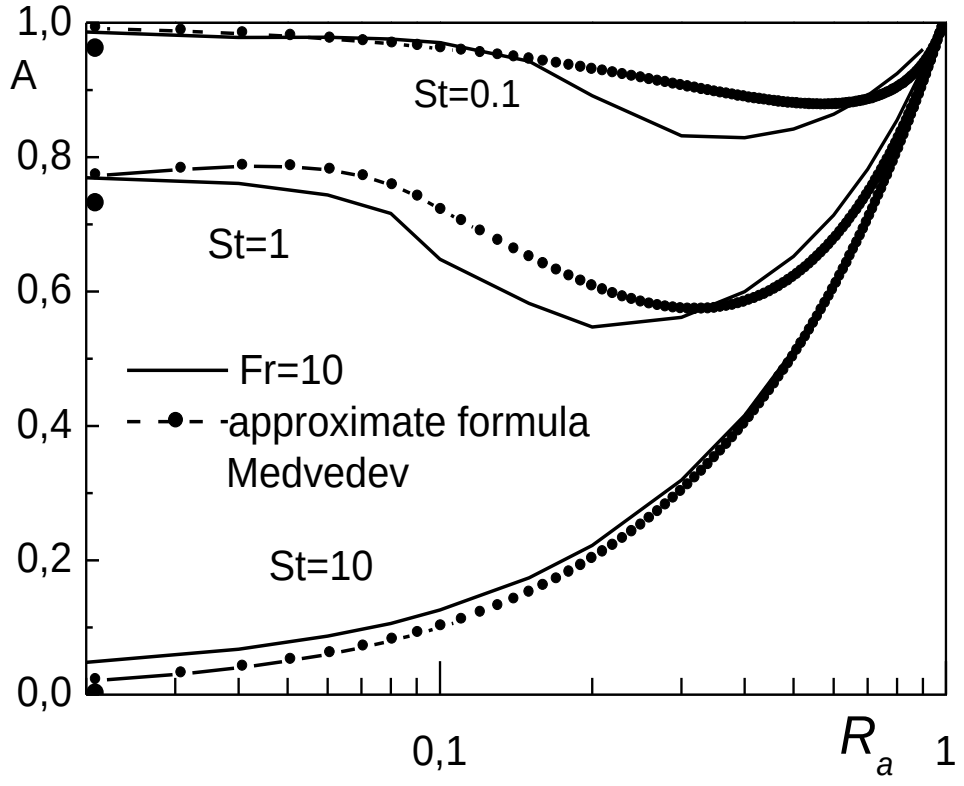


Рис.9. Зависимость коэффициента аспирации от Ra с учетом и без учета влияния силы тяжести

Комбинированная формула для коэффициента аспирации в низкоскоростном потоке

$$A = \begin{cases} A_0 + R_a (A_{mc} - A_0) / R_c, & R_a < R_c \\ A = A_m, & R_a > R_c \end{cases}$$



Персональные пробоотборники

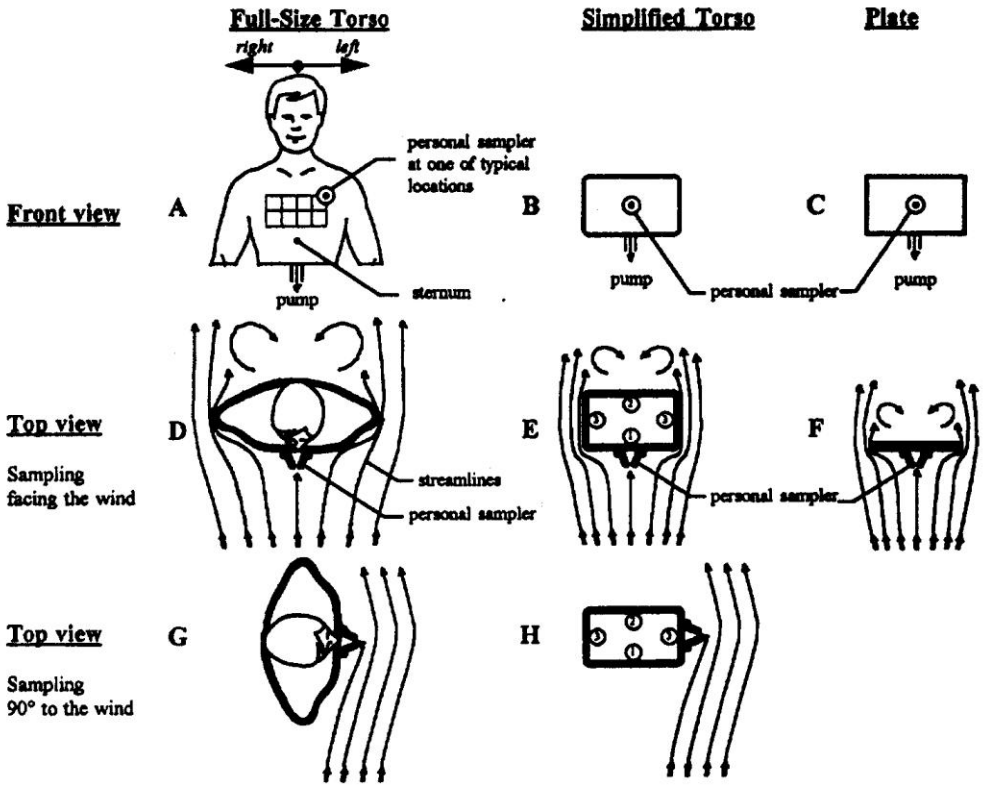
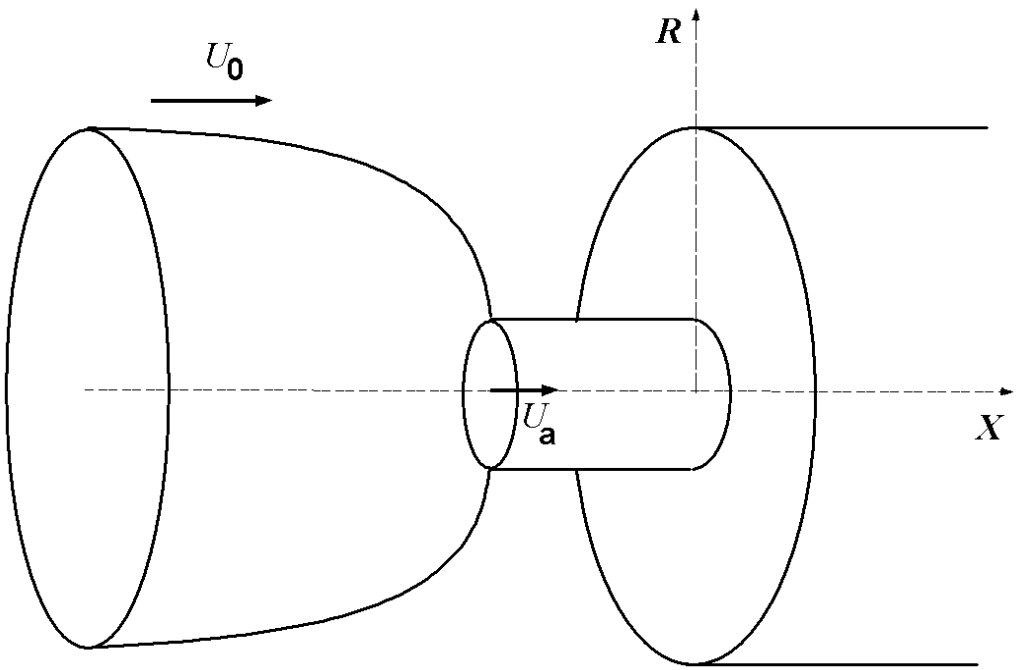


Fig. 1. Test bodies, sampling locations and flow patterns for typical body orientations.

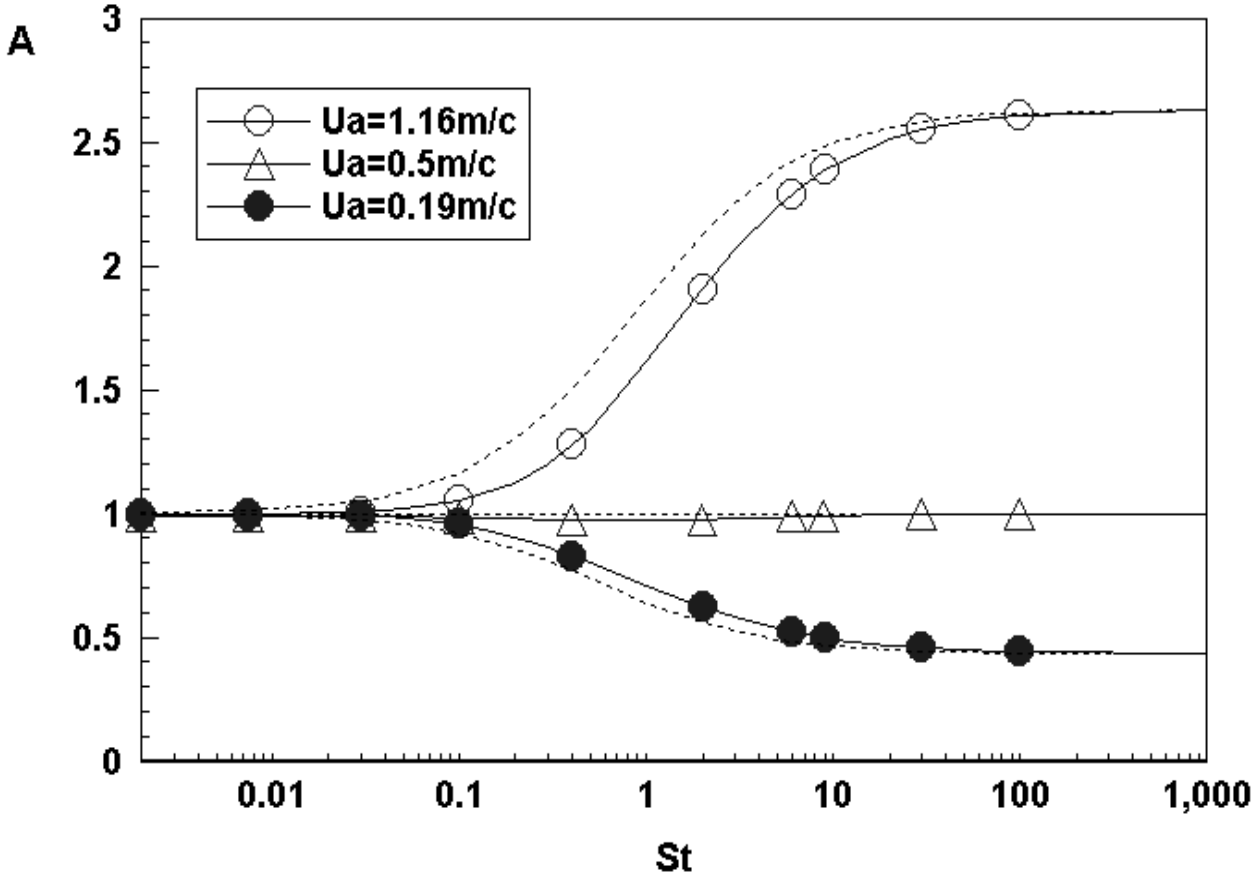
Darrah K. Schmees ,James H. Vincent , 2008

Witschger et.al.,1998

Аспирация аэрозоля в трубку на торце цилиндра

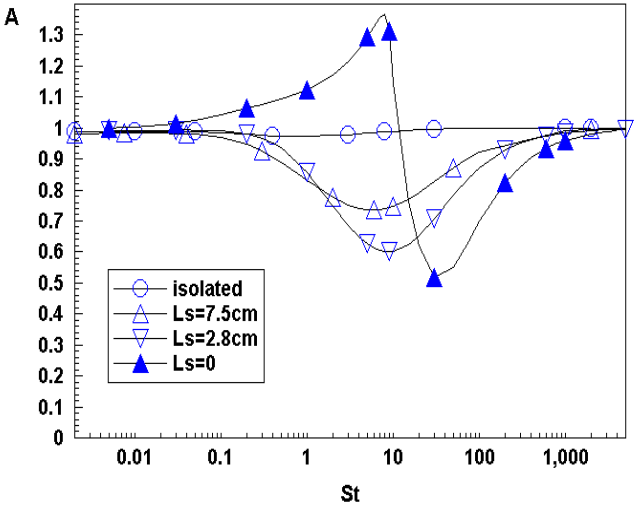


Сравнение с формулой Беляева-Левина

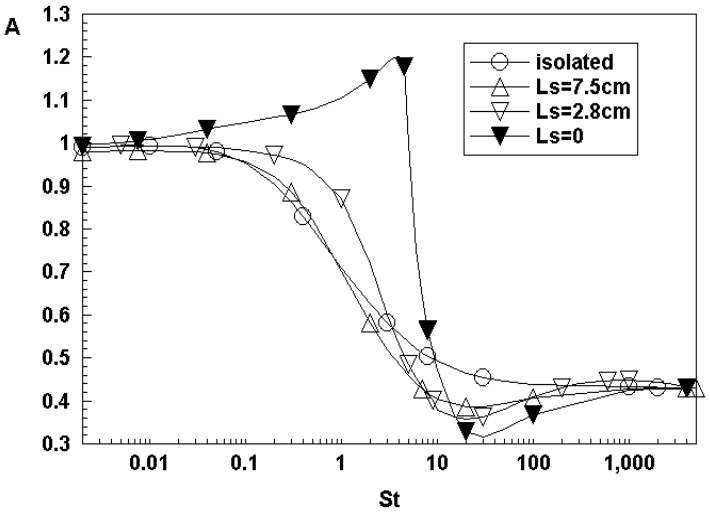


U_0=0.5м/с

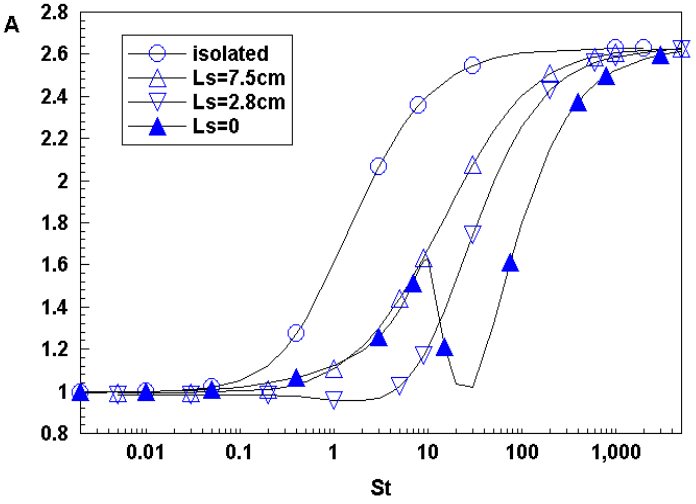
$U_0 = U_a = 0.5$м/с



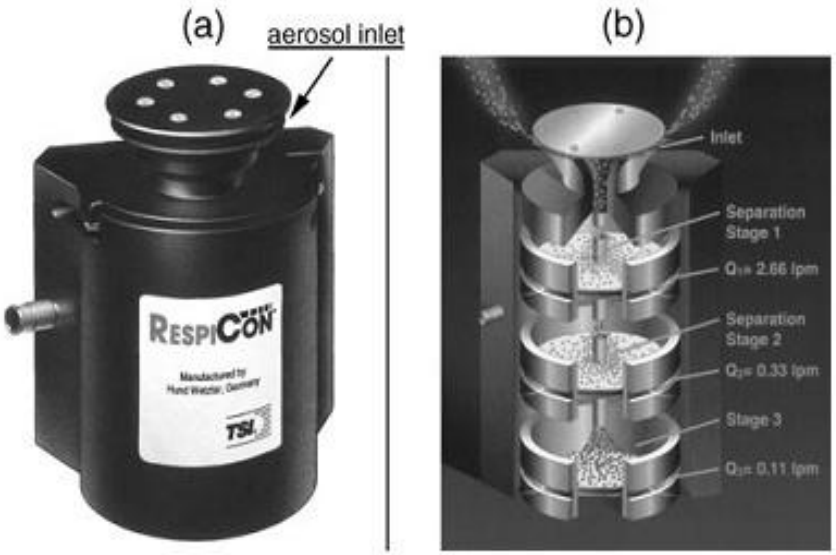
$U_0 = 0.5$м/с и $U_a = 0.19$ м/с

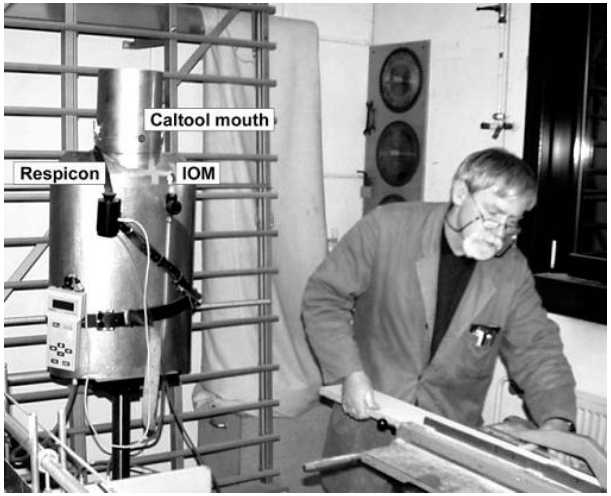


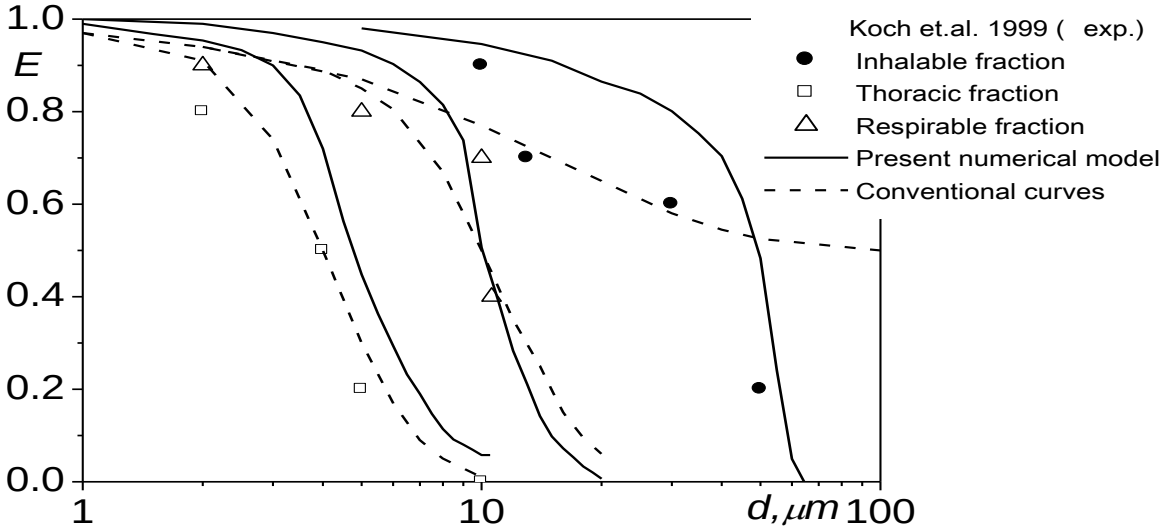
$U_0 = 0.5$м/с и $U_a = 1.16$ м/с



Respicon







FRAUNHOFER INSTITUTE TOXIKOLOGIE UND EXPERIMENTELLE MEDIZIN, HANNOVER

Исследование функции – вдыхаемая фракция

(a) (b)

Darrah K. Schmees , Yi-Hsuan Wu and James H. Vincent

Experimental methods to determine inhalability and personal sampler performance for aerosols in ultra-low windspeed environments

J. Environ. Monit., 2008

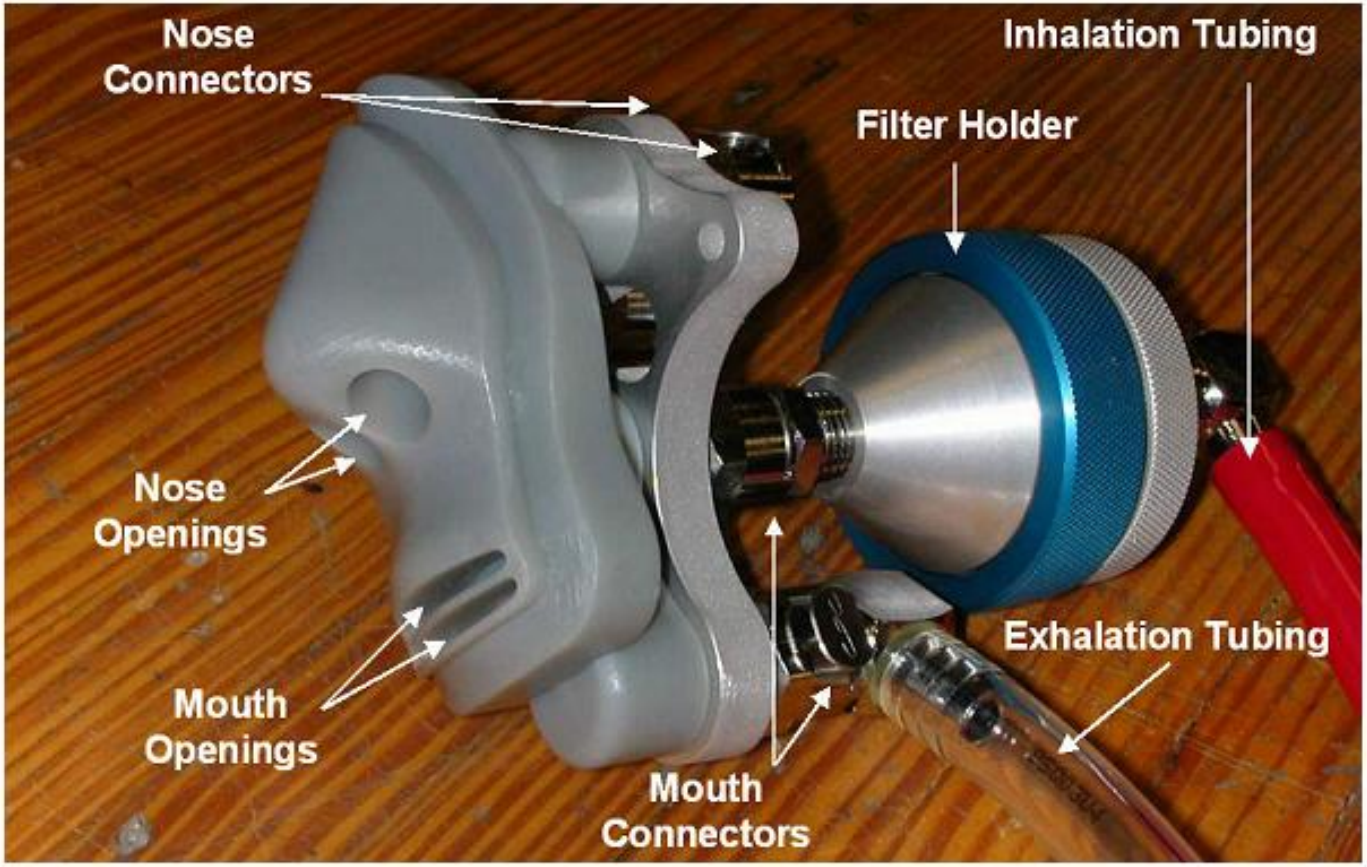


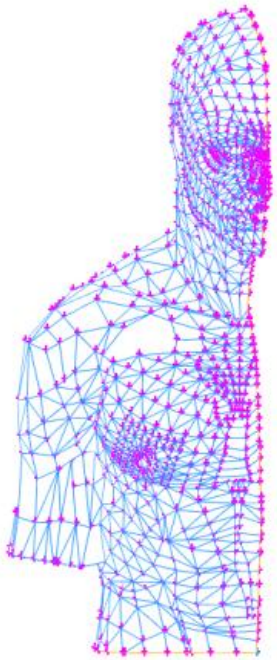
Figure 6.11 Mannequin breathing manifold with attached filter holder, indicating the various nose and mouth orifices as well as the separate internal tubing connections.

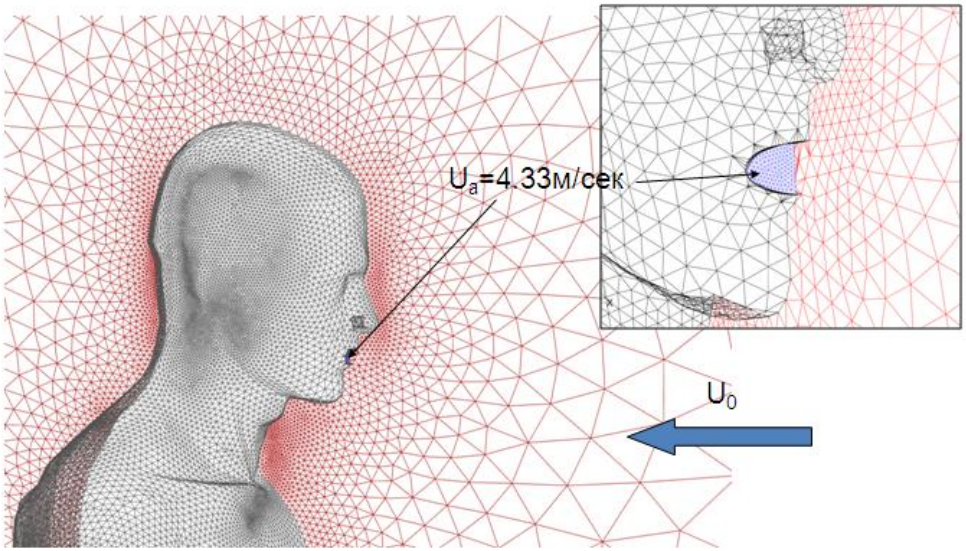
Darrah K. Schmees , Yi-Hsuan Wu and James H. Vincent

Figure 6.2 Fully constructed ultra-lowspeed wind tunnel facility with heated, breathing mannequin installed.

Darrah K. Schmees , Yi-Hsuan Wu and James H. Vincent

Расчет функции – вдыхаемая фракция –

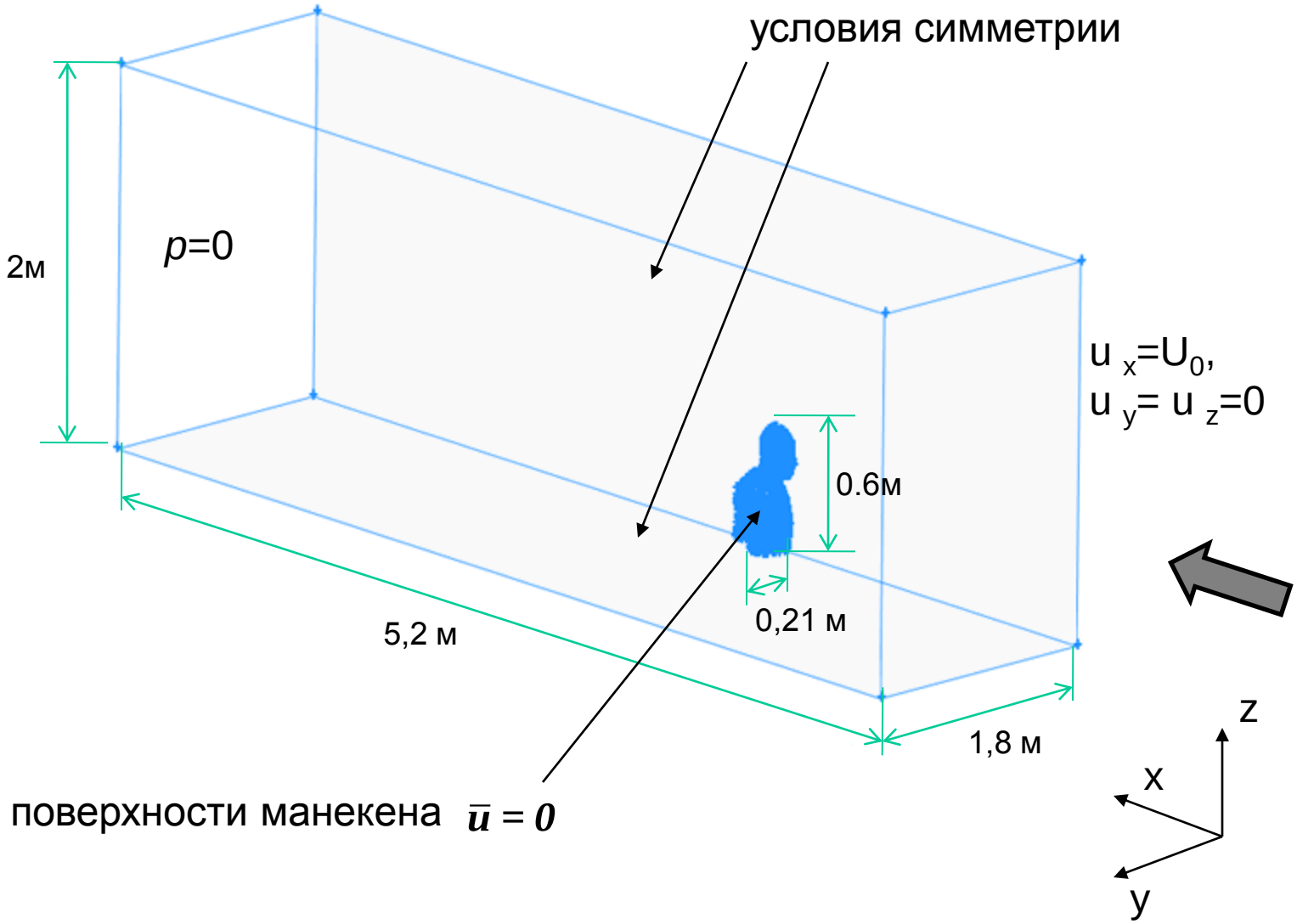




Цифровая модель манекена человека

Расчет функции – вдыхаемая фракция –

Расчетная область и граничные условия



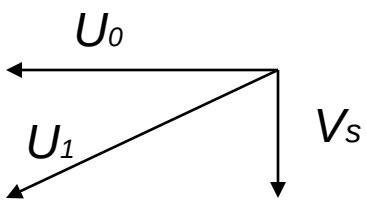
На поверхности манекена $\bar{u} = 0$

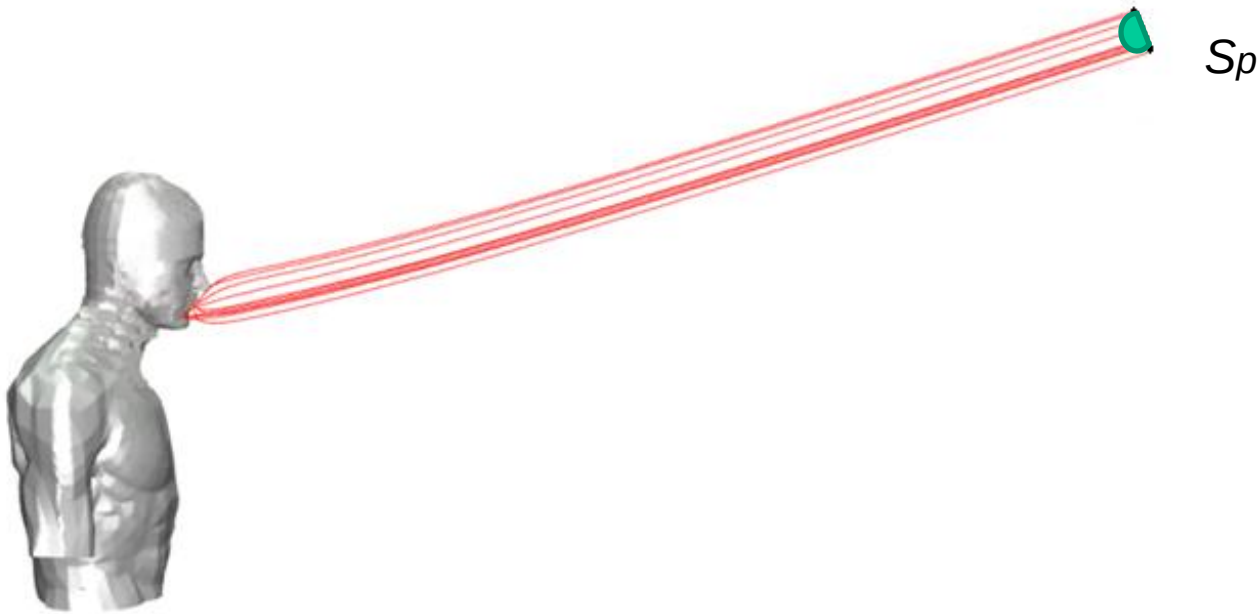
.

Определение коэффициента аспирации А

$$A = \frac{C}{C_0} \quad (1)$$

$$A = \frac{U_1 S_p}{Q} = \frac{U_1 S_p}{U_a S_a} \quad (2)$$





Трубка предельных траекторий с поперечным сечением площади S_p

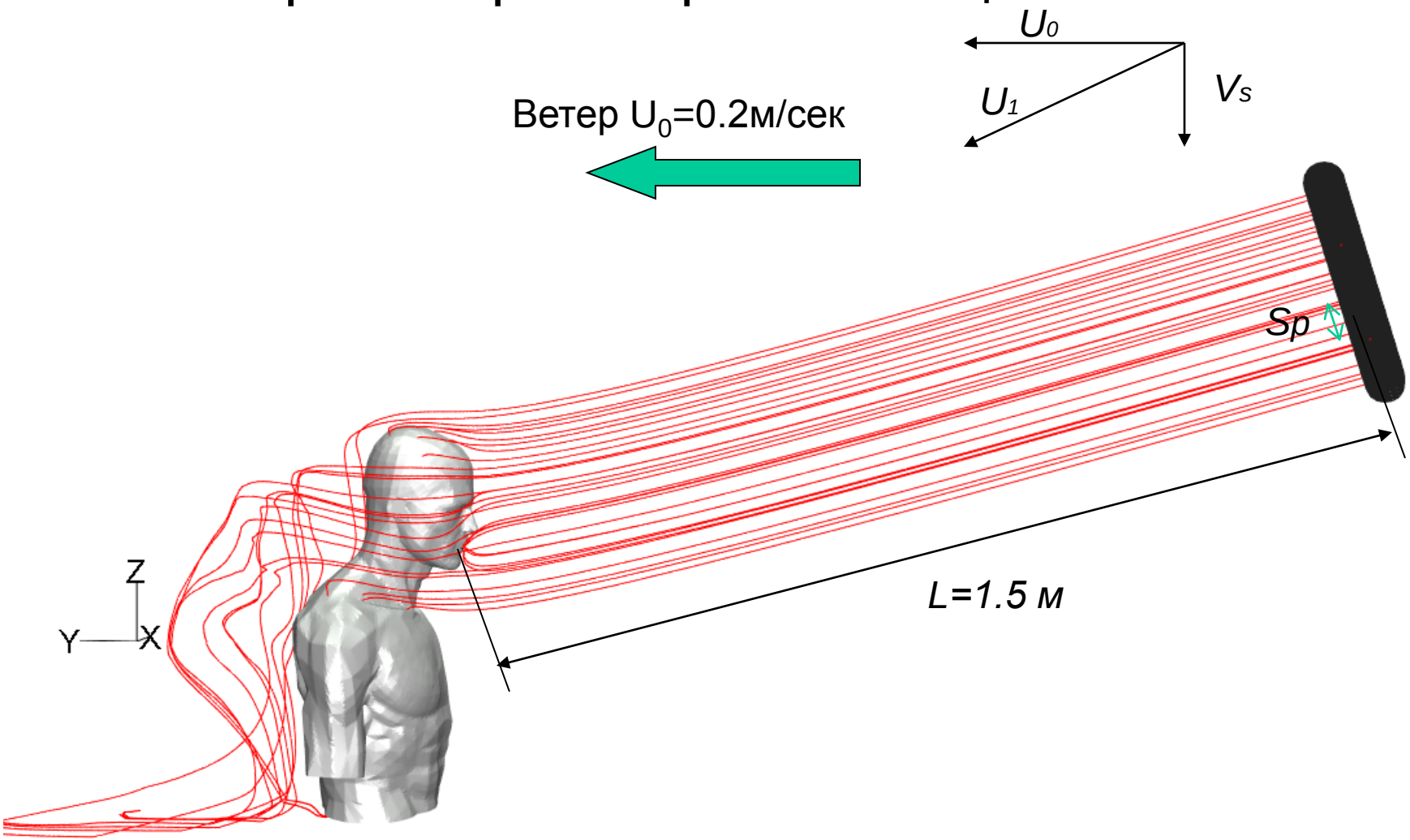
U_1 – результирующий вектор скорости частицы

S_p – площадь аспирируемых частиц

U_a – скорость дыхания

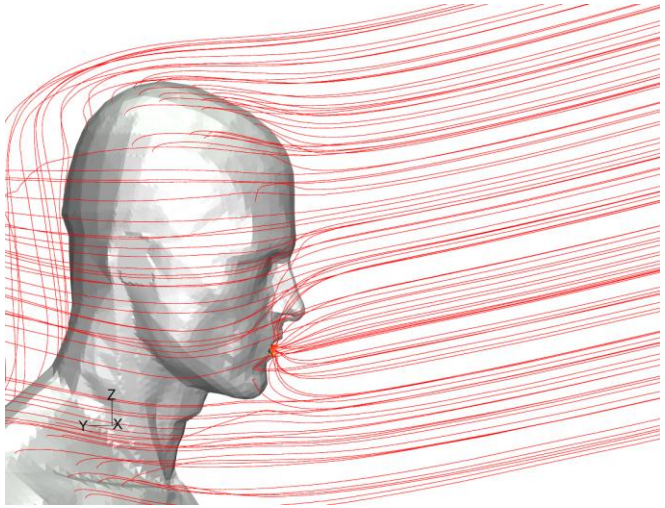
S_a – площадь ротового отверстия

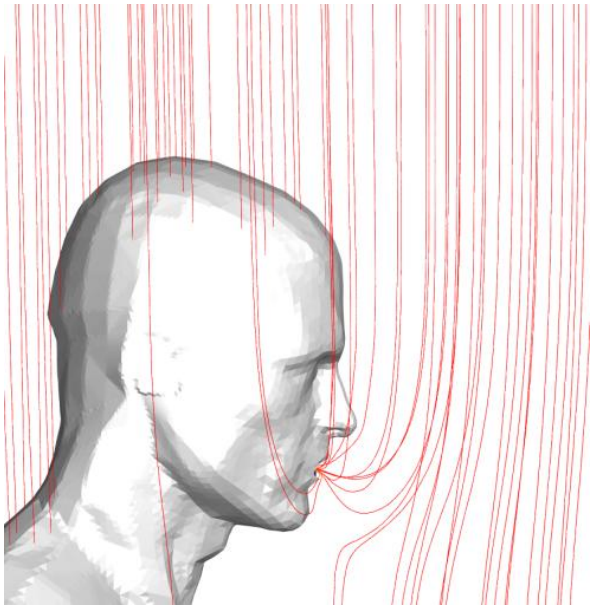
Картина траекторий частиц d=37 мкм

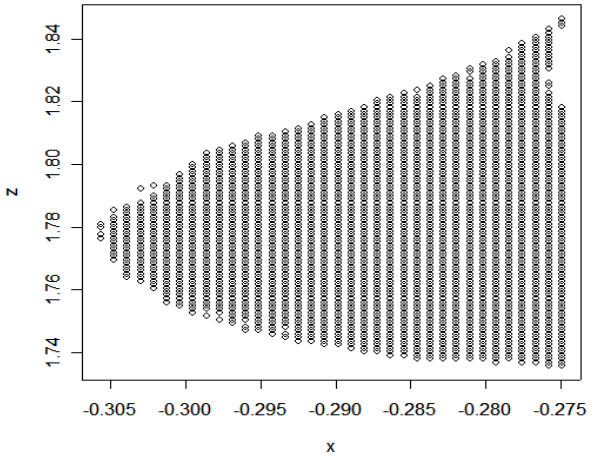


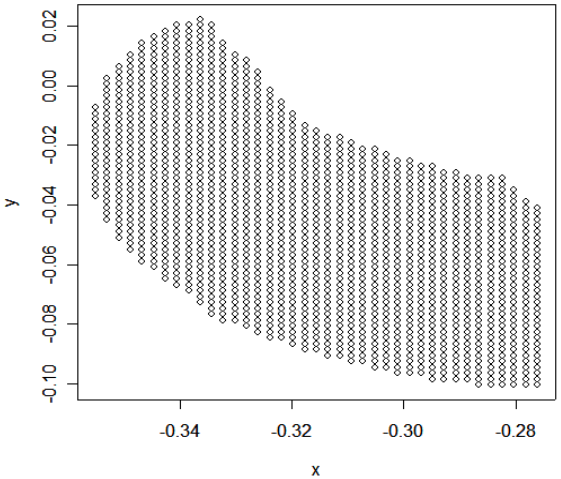
L – расстояние от манекена до плоскости старта частиц

Расчет функции – вдыхаемая фракция – дыхание через рот

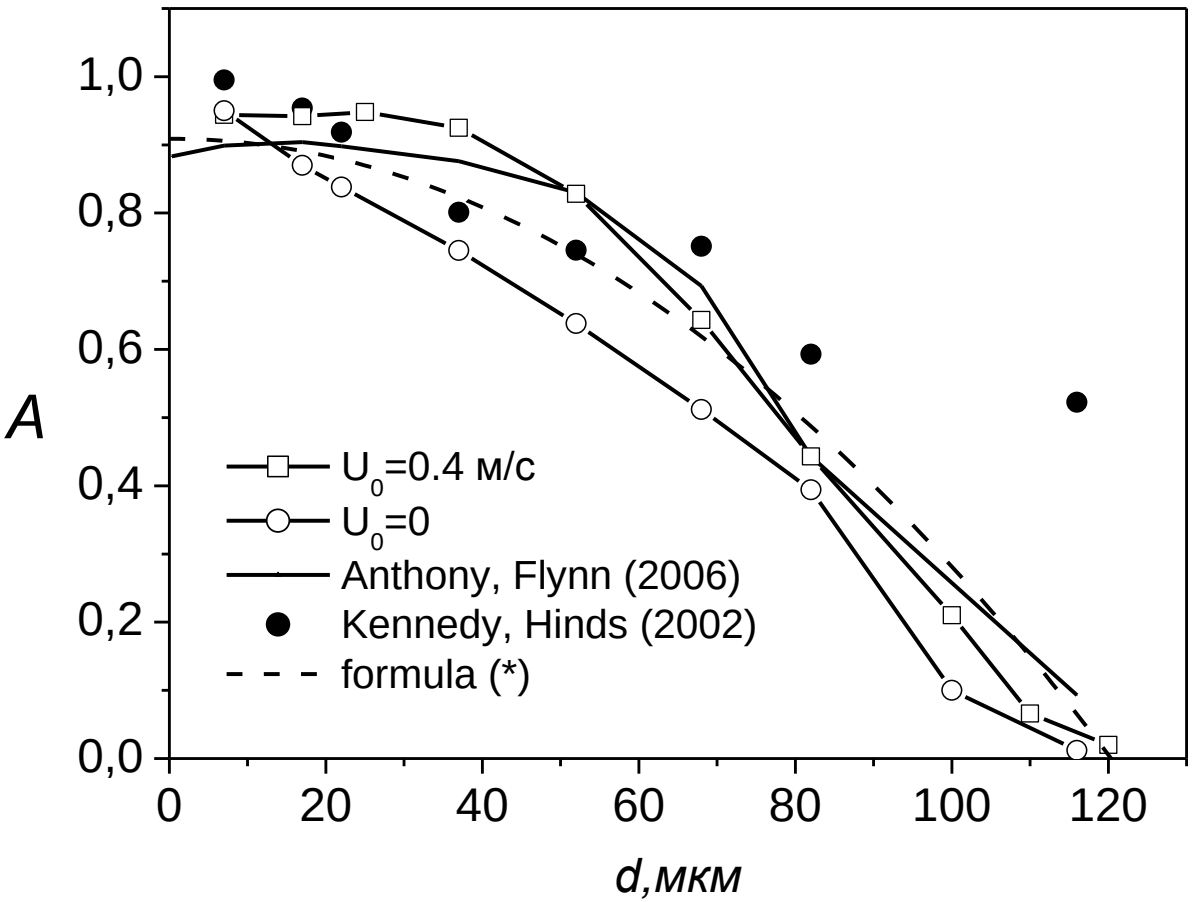








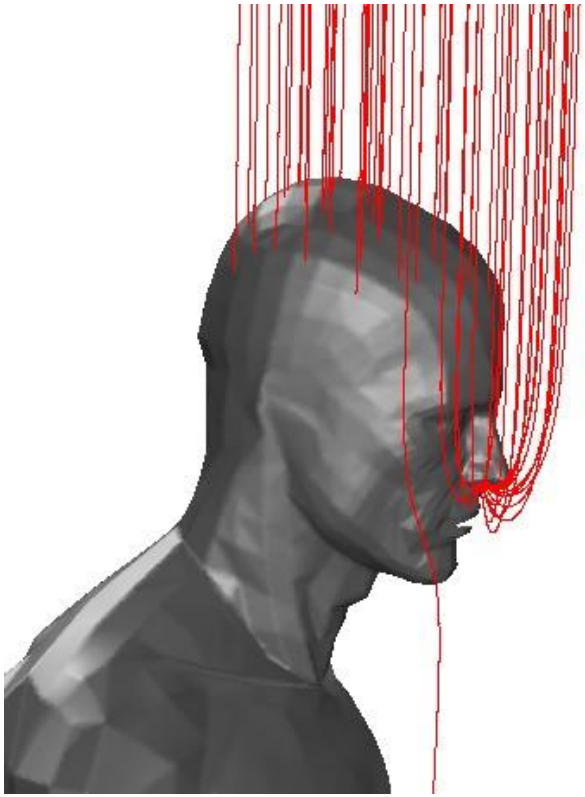
Вдыхаемая фракция

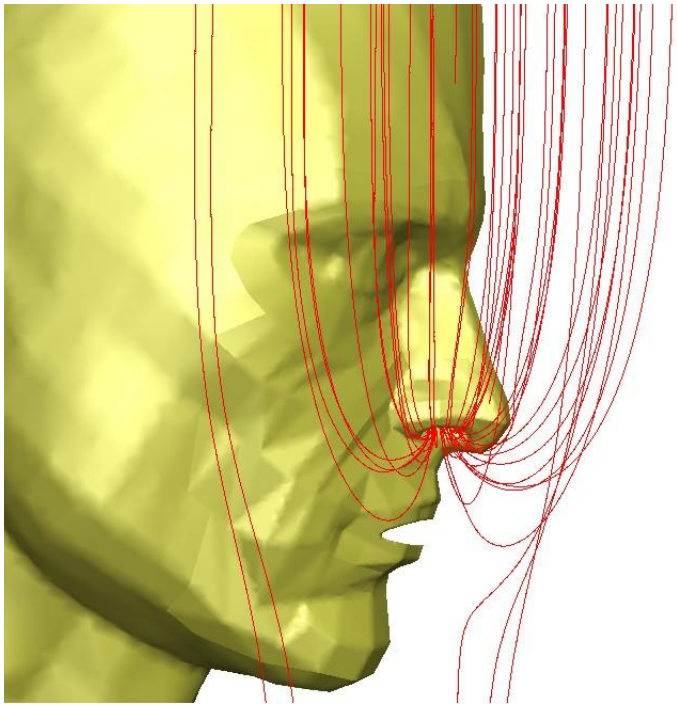


$$A = 0.8209 - 6.275 * 10^{-5} d^2 + 0.0205 U_a$$

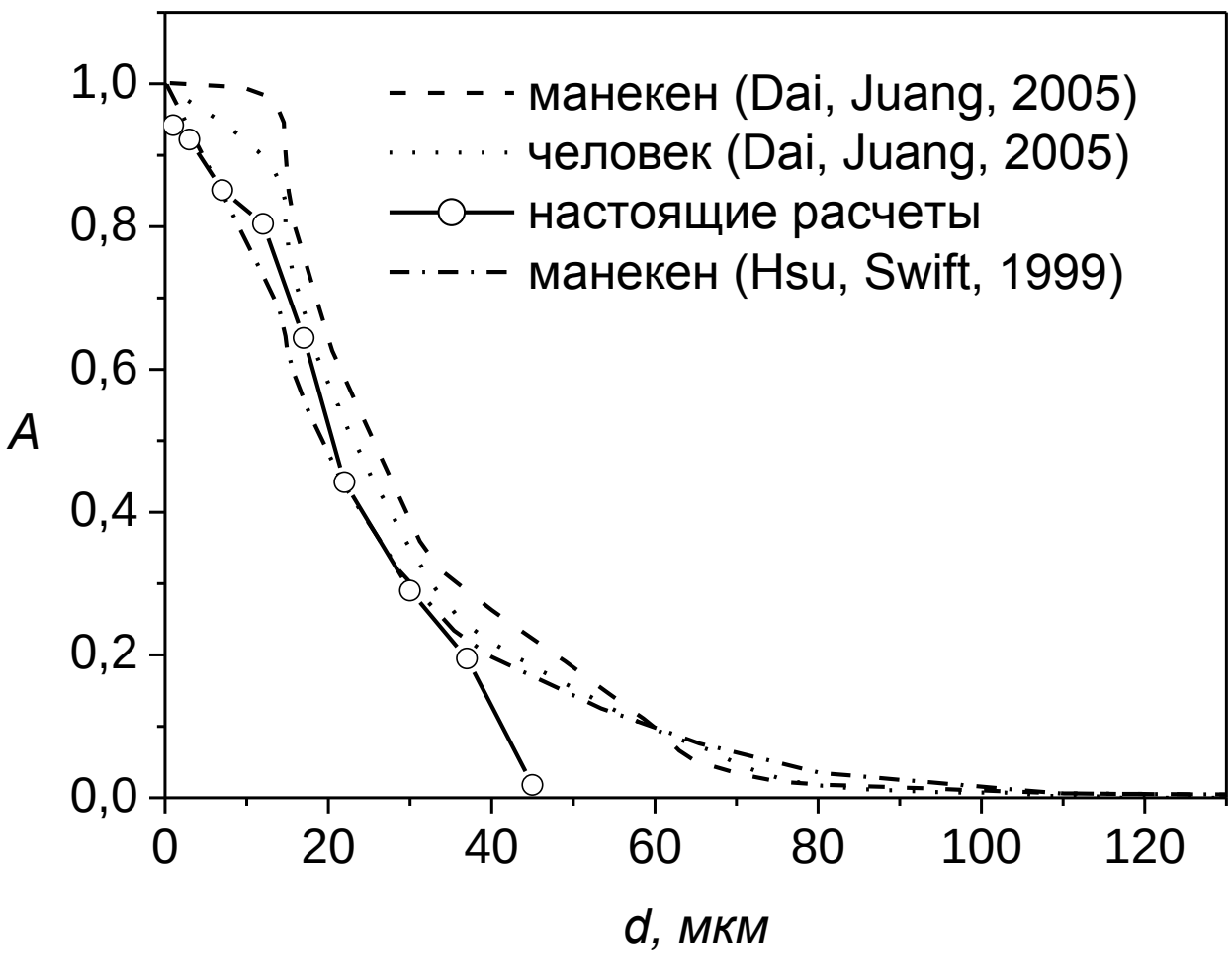
- Anthony T.R. Ann.Occup.Hyg., 2010, 54, N6, P.710-725.

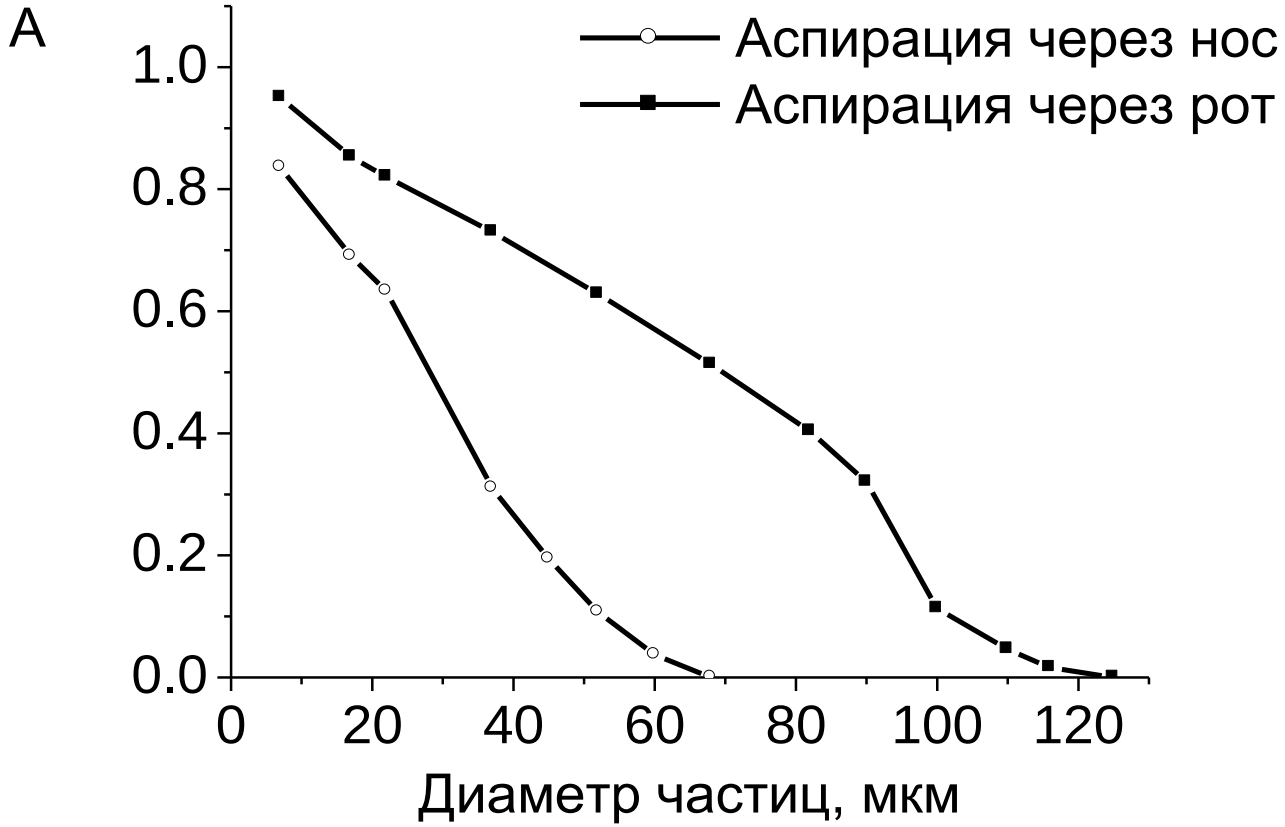
Расчет функции – вдыхаемая фракция – дыхание через нос





Вдыхаемая фракция – дыхание через нос




A
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
20
40
60
80
100
120
Диаметр частиц, мкм
Аспирация через нос
Аспирация через рот

04/22/2008 14:15