

М. А. Тимошенко, Д. И. Чердиченко

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЧАСТИЦ СИГАРЕТНОГО ДЫМА НА ДЫХАТЕЛЬНЫЕ ПУТИ ЧЕЛОВЕКА

От болезней, связанных с курением, ежегодно умирают миллионы жителей планеты. Страдают не только курильщики, но и окружающие, так называемые пассивные курильщики. Актуальность этой проблемы очевидна, поэтому важно изучать влияние частиц сигаретного дыма на дыхательные пути человека.

Процесс дыхания человека имеет периодический характер, причем отношение длительностей вдоха и выдоха при нормальной проходимости для воздуха примерно 1:1,5. В покое человек вдыхает и выдыхает 6–10 л воздуха за минуту. Принято считать, что, с достоверностью 95 %, максимум скорости воздушного потока на входе соответствует утроенному значению вентиляции минутного объема дыхания, т.е. при легочной вентиляции в 10 л/мин, соответствующей дыханию в покое, максимальная скорость воздушного потока составляет 30 л/мин. Частицы дыма сигарет, вдыхаемые вместе с воздухом, движутся с той же скоростью, в силу того, что эти частицы очень маленькие (наноразмерные) и полностью увлекаются средой. Двигаясь в потоке вдыхаемого воздуха, наночастицы сигаретного дыма оседают на поверхности внутренних стенок дыхательных путей и частично поглощаются ими.

По законам гидродинамики, поток вдыхаемого воздуха образует пограничный слой относительно внутренних стенок дыхательных путей. Пограничный слой – область течения вязкой жидкости или газа, непосредственно примыкающая к поверхности обтекаемого тела. Тогда возможно решить задачу нахождения распределения частиц сигаретного дыма в пограничном слое. В медицине эта задача представляет интерес при разработке методов лечения заболеваний активных и пассивных курильщиков.

Рассмотрим процесс образования пограничного слоя в трахее, так как этот участок дыхательных путей человека непосредственно примыкает к легким и имеет постоянное сечение. Длина трахеи в среднем составляет 10 – 12 см, а ее диаметр примерно 2 см. По сравнению с размерами частиц табачного дыма (10 – 300 нм) радиус трахеи довольно большой, и можно рассмотреть участок трахеи как плоскость. Тогда решим задачу для случая двумерного стационарного движения (рис. 1). Метод решения изложен в [1]. Для решения задачи нахождения толщины пограничного слоя частиц, в качестве исходных уравнений возьмем уравнение непрерывности

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

и уравнение движения Навье–Стокса

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right). \quad (2)$$

Уравнение (2) является проекцией на ось X уравнения движения для случая двумерного стационарного течения.

Граничные условия задачи:

$$V_y = 0, \quad y = |R_0|, \quad x > 0;$$

$$V_x = V_{00}, \quad y = 0;$$

$$V_x = 0, \quad y = |R_0|, \quad \forall x \in x = 0$$

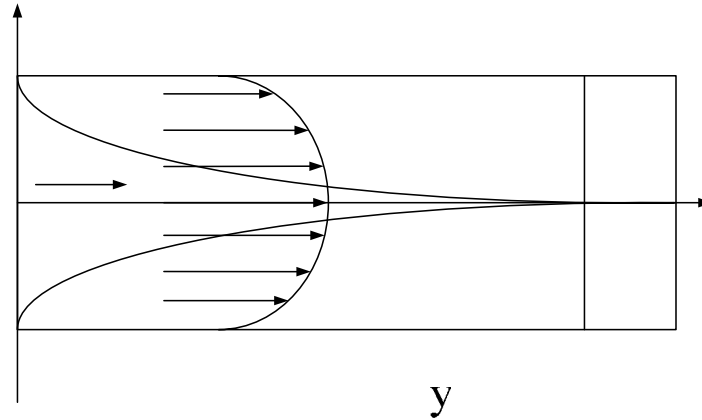


Рис. 1. Пограничный слой, развивающийся в трубе, для случая двумерного стационарного течения

Так как $\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2}$ мало, им пренебрегаем. Тогда (2) ~~вы~~ **В**иде V_x ~~вы~~ **В**иде V_x ~~вы~~ **В**иде V_x

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}. \tag{3}$$

Для всех x больше нуля профили скоростей подобны (условия подобия) между собой, тогда примем V_{00}

$$\frac{V_x}{V_{00}} = \varphi(n), \tag{4}$$

где $n = y/\delta(x)$ – безразмерная переменная (при $y = \delta(x), \Rightarrow n = 1$), а $\delta(x)$ – искомая толщина пограничного слоя на расстоянии $x=x_3$; x_3 – расстояние от входа в трубу, где $\delta(x) = |R_0|$. Кроме того, будем учитывать, что вне пограничного слоя ($y > \delta(x)$), $V_x = V_{00}$.

Вычислим производные $\frac{\partial V_x}{\partial x}$; $\frac{\partial V_x}{\partial y}$; $\frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}$ и подставим их и (4) в уравнение движения (3), затем проинтегрируем по n в пределах пограничного ~~слоя~~ **-R₀** ~~слоя~~ **-R₀** ~~слоя~~ **-R₀**

$$\delta' \delta \left[\varphi \varphi'(-n) + \varphi' \left(- \int_0^n \varphi'(-n) \right) \right] = \frac{\nu}{V_{00}} \varphi'' \tag{5}$$

В выражении (5) сделаем следующие обозначения:

$$\int_0^1 \varphi' \left(\int_0^n \varphi' n dn \right) dn = B; \quad \int_0^1 \varphi \varphi' n dn = A; \quad \int_0^1 \varphi'' dn = C. \tag{6}$$

Таким образом, получаем

$$(B - A) \delta \delta' = \frac{\nu}{V_{00}} C. \tag{7}$$

Решая уравнение (9), получаем

$$\delta = \sqrt{\frac{2x\nu C}{V_{00}(B-A)}}. \quad (8)$$

При интегрировании учитывалось, что $x = 0, \delta(x) = 0$. Исходя из того, что при $n = 1$ ($y = \delta(x)$), $V_x = V_{00}$ ($V_x = V_{00}\varphi(n)$), выберем в качестве профиля скорости функцию:

$$\varphi(n) = \frac{3}{2}n - \frac{1}{2}n^3 \quad (9)$$

Теперь дифференцируя (9) по n и подставляя производные в формулы (6), находим значения A, B и C , тогда $A=9/35$; $B=33/280$; $C=-3/2$. Отсюда толщина пограничного слоя будет равной:

$$\delta(x) = 4,64 \sqrt{\frac{\nu x}{V_{00}}}. \quad (10)$$

Из формулы (5) выразим скорость в пределах пограничного слоя:

$$V_x = V_{00} \left(\frac{3}{2} \frac{y}{\delta(x)} - \frac{1}{2} \frac{y^3}{\delta(x)^3} \right). \quad (11)$$

В цилиндре пограничный слой захлопнется, когда $\delta(x) = |R_0|$, отсюда находим расстояние, на котором слой захлопнется:

$$x_s = \left(\frac{R_0}{4,64} \right)^2 \frac{V_{00}}{\nu}. \quad (12)$$

Оценим, как формируется пограничный слой, образуемый вдыхаемым воздухом с взвешенными в нем частицами сигаретного дыма (рис. 2), при этом учтем приведенные выше условия:

$$(1 - V_{00} = 0,5 \text{ л/с}; 2 - V_{00} = 0,2 \text{ л/с}; \rho = 1,3 \text{ кг/м}^3; \eta = 18,5 \cdot 10^{-6} \text{ кг/(м} \cdot \text{с)}).$$

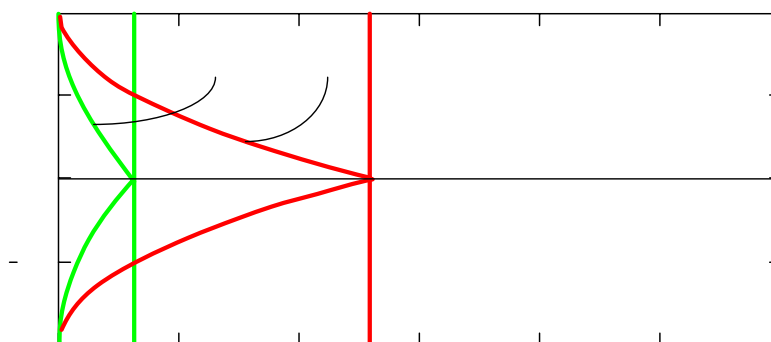


Рис. 2. Конфигурация пограничного слоя в трахее человека

В гидродинамическом пограничном слое скорость увеличивается в e^x раз. На расстоянии x_s толщина пограничного слоя замкнется, далее имеет место вихревое течение. Из рис. 2. видно, что частицы сигаретного дыма оседают на стенках дыхательного тракта и, тем самым, засоряют дыхательные пути, отчего возникает кашель и другие заболевания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Р. Берд, В. Стьюарт, Е. Лайтфут. Явления переноса. Пер. с англ. – М.: Химия, 1974. – 687 с.

УДК 534.29:551.594.25

М.А. Тимошенко, Н.Н. Чернов

ДИСПЕРСНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОЗОЛЬНЫХ НАНОЧАСТИЦ СИГАРЕТНОГО ДЫМА ПРИ КУРЕНИИ

При активном и пассивном курении в организм человека поступают наноразмерные аэрозольные частицы. Для исследования влияния этих частиц на здоровье человека необходимо знать их дисперсное распределение. Нами исследовано дисперсное распределение аэрозольных частиц четырех сортов сигарет: Marlboro, Bond, Наша Марка и махорка. Методика взятия проб и исследование частиц с помощью наномикроскопа опубликованы в [1].

Исследования наночастиц сигаретного дыма с помощью атомно-силовой микроскопии позволили установить первоначальную форму и дисперсный состав частичек. Было установлено, что частицы сигаретного дыма имеют округлую продолговатую форму, способны образовывать нитевидные агрегаты в статических условиях. Размеры частиц находятся в достаточно широком диапазоне: от единиц – десятков нанометров до десятков микрон.

Дисперсное распределение рассматриваемых частиц подчиняется нормально-логарифмическому закону. Оно представлено в виде интегральных кривых в вероятностно-логарифмической сетке, когда по вертикальной оси откладывается процентное содержание частиц, имеющих размер меньше данной величины $D_p=2R$ (используя табличные значения интеграла Лапласа), т.е. кумулятивная функция распределения [2]:

$$\Phi(D_p) = 0,5 \pm \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz, \quad (1)$$

$$Z = \frac{\log D_p - \log D_M}{\sigma \log D_p}, \quad D_M = 2R_M,$$

где $\sigma \log D_p$ – среднеквадратичное отклонение логарифмов диаметров; D_M – медианный диаметр частиц, а по горизонтальной оси – $\log D_p$. В вероятностно-логарифмической сетке распределение аэрозольных частиц по размерам имеет форму прямых линий. В этом случае значение размера для $\Phi(D_p)=0,5$ (50 %) соответствует медианному размеру частиц, а угол наклона прямой определяется дисперсией распределения:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{\sigma \log D_p}. \quad (2)$$

Для расчета использовались результаты исследований наночастиц сигаретного дыма, полученные в виде фотографий методом атомно-силовой микроскопии. По фотографиям были оценены размеры частиц и получено дисперсное распределение. На рис. 1 приведены микрофотографии частиц дыма известных марок сигарет.