

Роль инерционного механизма в процессе очистки воздуха в легких от аэрозольных частиц

ООО "НТМ-Защита": 115201, Москва, Каширское ш., 22, корп. 4, стр. 7

G.V.Fedorovich

A role of inertial mechanism for clearance of aerosol particle from the lung

Key words: lungs, flow turbulence, sedimentation of particles, airway deposition.

Ключевые слова: легкие, завихрение потоков, осаждение частиц, распределение в дыхательных путях.

Аэрозоли в легких — это задача, в результате решения которой возможно избежать многих проблем в самых различных областях. Например, в медицинских приложениях: терапия с использованием аэрозолей позволяет подавать лекарства прямо в те отделы легких, где оно должно действовать. В работе С.Ю.Федорова и др. [1] при решении проблемы оптимальной доставки аэрозольных препаратов в дистальные бронхи авторы опирались на математическую модель системы дыхания. Ингаляционные устройства представляются наиболее логичными и эффективными [2].

Осаждение ингалированных аэрозолей может быть также использовано как инструмент для неинвазивного определения изменений в дыхательных путях легких при различного рода патологиях — эмфиземе, астме, бронхите и др.

Выполнено много исследований (как экспериментальных, так и теоретических) осаждения частиц [3–5]. Основные механизмы осаждения — инерционное столкновение, седиментация (оседание) и диффузия [6]. На основании работ [7–9], в которых обнаружено явление завихрения ламинарных потоков в местах бифуркаций дыхательных путей трахеобронхиального дерева (ТБД), в данной статье основное внимание уделено инерционному механизму очистки воздуха. Вторичные завихренные потоки играют критическую, но не совсем понятную роль в фильтрации определенных частиц из вдыхаемого воздуха.

Рассмотрим подробнее, как работает инерционный механизм в завихрениях воздушного потока в дыхательных путях легких.

Характеристики завихренных потоков

Существуют многочисленные технические приложения (усиление тепло- и массообмена, работа измерительных приборов), в которых вихрь либо желателен, либо представляет собой помеху. Общие результаты, описывающие поведение вихрей в каналах с ламинарным потоком, приведены в работе

T.F.Ayinde [10]. Численно решались уравнения Навье–Стокса для стационарного 3-мерного осесимметричного течения. Вычислялось распределение завихренности вдоль оси канала. Распределение аксиальной скорости на входе можно принять равномерным. Найдено, что вниз по потоку у стенок образуется пограничный слой Прандтля, толщина которого постепенно нарастает и в достаточно длинных каналах на некотором расстоянии от входа пограничный слой заполняет все поперечное сечение. На расстоянии Le (его принято называть входной длиной) от входа в канал формируется течение Пуайзеля. Для Le справедлива оценка: $Le \approx 0,2 \times R \times Re$, где Re — число Рейнольдса, определенное через радиус R канала и скорость воздуха V_{in} на входе в канал: $Re = R \times V_{in} / \nu$, где ν — кинематическая вязкость.

Для дыхательных путей в легких характерно отношение длины Lc к радиусу, близкое к 6 [7]. Можно утверждать, что в верхних дыхательных путях, где $Re > 30$, течение Пуайзеля сформироваться не успеет.

Для случая небольшой (по сравнению с радиусом R канала) толщины пограничного слоя аксиальная скорость V_z в потоке описывается соотношением (решение Блазиуса):

$$V_z = V_{in} * f(\zeta), \quad (1)$$

где V_{in} — скорость вдали от стенки, ее можно приравнять к скорости на входе в канал; ζ — автомодельная переменная.

$$\zeta = (R - r) * [V_{in} / z * \nu]^{1/2}. \quad (2)$$

Функция $f(\zeta)$ представляет собой результат численного решения уравнения, следующего из уравнений непрерывности и Навье–Стокса при переходе к автомодельной переменной ζ . Для практических расчетов можно описывать ее поведение простой зависимостью ($\zeta_0 \approx 3$):

$$f(\zeta) \approx \zeta / (\zeta + \zeta_0), \quad (3)$$

сохраняющей особенности поведения $f(\zeta)$ и одновременно позволяющей проинтегрировать уравнение динамики элементарных объемов газа. Например, использование соотношений (1) и (3) дает возможность определить закон движения элементарного объема вдоль канала. Для этого целесообразно ввести безразмерные переменные:

$$x = z / R; y = r / R; \tau = t \cdot V_{in} / R. \quad (4)$$

Через эти переменные автомодельная переменная ζ будет выражена формулой:

$$\zeta = (1 - y) \cdot [Re / x]^{1/2}. \quad (5)$$

Уравнение движения частиц вдоль продольной оси канала описывается уравнением:

$$dx / d\tau = f(\zeta) \approx \zeta / (\zeta + \zeta_0). \quad (6)$$

Предполагая, что расстояние $y = y_1$ до оси канала остается неизменным при движении воздуха, получим:

$$\tau = x \cdot [1 + (2/3) \zeta_0 \cdot (x / Re)^{1/2} / (1 - y_1)]. \quad (7)$$

Это решение допускает простую интерпретацию. Если $\nu \rightarrow 0$, то $Re \rightarrow \infty$ и 2-й член в квадратных скобках мал. При этом $\tau \approx x$, т. е. независимо от начального радиуса входа элемента объема воздуха в канал, он выходит из канала (при $x = x_c \equiv Lc / R$) через время (безразмерное) $\tau_c \approx x_c$. Скорость (безразмерная) движения по каналу равна 1. Наличие пристеночного пограничного слоя сказывается на увеличении времени прохода. При приближении к стенке ζ можно считать малой (по сравнению с ζ_0), здесь для расчета траекторий можно пользоваться приближенным уравнением:

$$dx / d\tau \approx \zeta / \zeta_0, \quad (8)$$

решение которого имеет вид:

$$\tau = (2/3) \zeta_0 \cdot x^{3/2} / [Re^{1/2} (1 - y_1)], \quad (9)$$

т. е. поправка к решению $\tau \approx x$ для центральной области канала становится основной для близких к стенке траекторий.

Распределение азимутальной скорости V_φ по радиусу в сечении канала хорошо интерполируется функцией:

$$V_\varphi = \Gamma \cdot V_{in} \cdot (r/R) \cdot (1 - r/R). \quad (10)$$

Коэффициент Γ , определяющий амплитуду V_φ , убывает с расстоянием z вдоль потока по экспоненциальному закону с характерной длиной Le . Для затухания вихря справедливы те же утверждения, что и для формирования течения Пуайзеля: в верхних дыхательных путях затухание мало.

Траектории аэрозольных частиц в завихренных потоках в цилиндрических каналах

Движение аэрозольных частиц происходит под действием вязких сил. Характер движения определяется числом Стокса (Stk):

$$Stk = (1/18) \cdot (\rho_p / \rho_a) \cdot (d_p^2 / \nu) \cdot (V_{in} / R). \quad (11)$$

Здесь ρ_p и ρ_a — плотность частиц и воздуха соответственно, d_p — диаметр частиц. В дыхательных путях легких число Стокса для частиц микронного размера обычно невелико ($< 0,1$), что свидетельствует о вовлеченности их в движение воздуха. Например, аксиальная и азимутальная скорости воздуха и частиц одинаковы, радиальная скорость U_r частиц с массой m определяется уравнением:

$$m \cdot V_\varphi^2 / r = 3 \cdot \pi \cdot d_p \cdot \rho_a \cdot \nu \cdot U_r. \quad (12)$$

Использование для V_φ выражения (10) и введение согласно (4) безразмерной переменной y приводит к решению для U_r вида:

$$U_r = V_{in} \cdot \Gamma^2 \cdot Stk \cdot y \cdot (1 - y)^2. \quad (13)$$

Таким образом, решение задачи о распределении скоростей в закрученном потоке непосредственно определяет скорости аэрозольных частиц в этом потоке.

Эффект выноса аэрозолей на периферию потока приводит к эффективному механизму очистки воздуха за счет захвата частиц в бронхиолах ТБД. В пристеночном слое частицы двигаются медленнее основного потока, и когда этот эффект становится значительным, за время вдоха или выдоха частицы не успевают пройти ту ветвь ТБД, где они замедлились. В следующем цикле дыхания частицы будут вынесены еще ближе к стенке, их продольная скорость станет еще меньше и частицы останутся в захватившей их ветви сколь угодно долго, пока не произойдет их осаждение за счет механизма, возможно недостаточно эффективного для осаждения за 1 проход.

Опишем эффект захвата частиц количественно.

Время пролета канала. Эффект захвата частиц в легких

Уже была проведена оценка времени прохода канала элементарным объемом воздуха и / или захваченной в поток частицей по траектории, проходящей на постоянном расстоянии (безразмерном) y_1 от центра канала. Учтем эффект выноса частиц к стенкам канала. Интересно движение в пограничном слое, поэтому для функции $x(\tau)$ будет использоваться уравнение (8). Для $y(\tau)$ уравнение следует из (13):

$$dy / d\tau = \Gamma^2 \cdot Stk \cdot y \cdot (1 - y)^2. \quad (14)$$

Система уравнений (8) и (14) определяет (r, z) -траектории [в безразмерных переменных (x, y) -траектории]. Полная траектория получится после закручивания (r, z) -траекторий вокруг оси канала в соответствии с вращением частиц с азимутальной скоростью V_φ вместе с потоком.

Решение $y(x)$ имеет следующий вид:

$$y(x) = y_1 / \{y_1 + (1 - y_1) \cdot \exp[-(2/3) \cdot \Gamma^2 \cdot Stk \cdot \zeta_0 \cdot x^{3/2} / Re^{1/2}]\}. \quad (15)$$

Оценку времени пролета можно получить, проинтегрировав (14):

$$\Gamma^2 \cdot \text{Stk} \cdot \tau = \ln [y \cdot (1 - y_1) / y_1 \cdot (1 - y)] + 1 / (1 - y) - 1 / (1 - y_1). \quad (16)$$

Если в (16) подставить $y_c = y(x = x_c)$, то получим оценку времени пролета канала с учетом выноса частицы в зону медленного пристеночного течения:

$$\tau_c = \{\lambda + [\exp(\lambda) - 1] \cdot y_1 / (1 - y_1)\} / \Gamma^2 \cdot \text{Stk}, \quad (17)$$

где: $\lambda = (2/3) \times \Gamma^2 \times \text{Stk} \times \xi_0 \times x_c^{3/2} / \text{Re}^{1/2}$. При $\lambda > 1$ время пролета растет экспоненциально и может достигнуть значений, больших, чем время (безразмерное) вдоха. Это можно считать эффектом захвата частицы в соответствующем канале. Как видно из (17), величина τ_c различна для частиц, входящих в канал на разных расстояниях y_1 от центра канала. Захватываются только те частицы, которые входят в канал на расстояниях больших, чем y_1 , определяемое из уравнения:

$$y_1 / (1 - y_1) = [\Gamma^2 \cdot \text{Stk} \cdot \tau_{\text{вд}} - \lambda] / [\exp(\lambda) - 1]. \quad (18)$$

Соответственно, вероятность захвата будет определяться формулой:

$$P = \frac{2\pi \int_{y_1}^1 y dy}{2\pi \int_0^1 y dy} = 1 - y_1^2. \quad (19)$$

Знаменатель $I(0)$ в этой формуле введен для нормировки вероятности на единицу. Соотношения (18) и (19) дают возможность вычислить вероятность захвата аэрозольных частиц в дыхательных путях различных генераций ТБД.

Иллюстрация работы механизма на модели ТБД

Для приложения полученных результатов к процессам в легких необходимо в соотношения (14–16) подставить значения чисел Рейнольдса и Стокса, характерные для потоков в дыхательных путях.

Здесь необходимо использовать подходящую модель реального ТБД. В настоящее время разработано и используется множество моделей ТБД [7], они различаются в зависимости от целей работы. Для наших целей подходит простая морфометрическая модель детерминированного симметричного дихотомического ветвления дыхательных путей с пропорциональным уменьшением их размеров, т. е. с сохранением подобия ветвей [11]. Номер i -генерации в этой модели указывает на параметры воздушного канала, а не на его место в иерархической структуре. Однако параметры модели по возможности выбраны так, что с ее помощью можно указать на реальную локализацию тех или иных процессов.

Количество $N(i)$ ветвей i -генерации, диаметр $d(i)$ и скорости воздуха $v(i)$ в них задаются формулами:

$$N(i) = 2^i; d(i) = d(0) \cdot 2^{-i/3}; v(i) = v(0) \cdot 2^{-4/3}. \quad (20)$$

Нулевая ветвь – трахея [$d(0) = 1,44$ см; $v(0) = 290$ см / с], уровню $i = 18$ соответствуют терминальные

bronхиолы. Длина I -каналов предполагается втрое большей, чем диаметр для всех генераций. В табл. 1 приведены числа Рейнольдса, характеризующие потоки воздуха в дыхательных путях.

Таблица 1
Числа Рейнольдса в ветвях ТБД

| i | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
|-----|--------|-------|-------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Re | 1392,0 | 552,4 | 219,2 | 87,0 | 34,5 | 13,7 | 5,4 | 2,2 | 0,9 | 0,3 | 0,1 |

Видно, что практически во всех ветвях ТБД течение ламинарное, однако с $\text{Re} > 1$. В принятой модели время t_c прохождения воздушного канала одинаково для всех генераций:

$$t_c = l(i) / v(i) = 3 \cdot d(i) / v(i) = 3 \cdot d(0) / v(0). \quad (21)$$

Подставляя сюда значения $d(0)$ и $v(0)$, получим время: $t_c = 0,005$ с. Можно сопоставить это время с характерным временем вдоха $t_{\text{вд}} = 1,25$ с (считаем, что периодичность дыхания 12 мин^{-1} и на каждый период приходится 4 одинаковой длительности фазы: вдох, пауза, выдох, пауза). Отношение этих величин $t_{\text{вд}} / t_c = 250$ можно рассматривать как возможное количество генераций ТБД, которое воздух мог бы пройти за время вдоха. Как и следовало ожидать, это количество значительно больше полного числа генераций (≈ 25) ТБД, т. е. прохождение дыхательных путей до уровня альвеол занимает не более 10 % всего времени вдоха.

В принятой модели ТБД отношение скорости воздуха к диаметру одинаково для всех генераций, поэтому число Стокса одинаково во всех ветвях, оно меняется в зависимости от диаметра частиц. Соответствующие результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2
Числа Стокса для частиц различных диаметров

| d_p , мкм | 1 | 2 | 4 | 6 | 10 | 20 | 40 |
|-------------|--------|--------|-------|-------|-------|------|------|
| Stk | 0,0015 | 0,0060 | 0,024 | 0,054 | 0,149 | 0,60 | 2,39 |

В соответствии с полученными результатами частицы с диаметром до 20 мкм ($\text{Stk} < 1$) вовлекаются в движение воздуха. Только частицы с большим диаметром могут "оторваться" от потока и, например, осесть на стенку непосредственно за счет инерционного механизма.

Перенос результатов по захвату аэрозолей на дыхательные пути ТБД осуществляется подстановкой в выражения чисел Рейнольдса из табл. 1, соответствующих i -генерации ТБД. При этом параметр λ становится функцией номера i -генерации. В соответствии с (18) функцией номера становится и радиус входа захватываемых частиц, и вероятность захвата P , вычисляемая по (19). Диаметр частицы определяет число Стокса.

Результаты расчета вероятности захвата частиц различных диаметров в генерациях дыхательных путей ТБД представлены на рис. 1.

Видно, что механизм очистки воздуха за счет захвата аэрозолей в дыхательных путях достаточно эф-

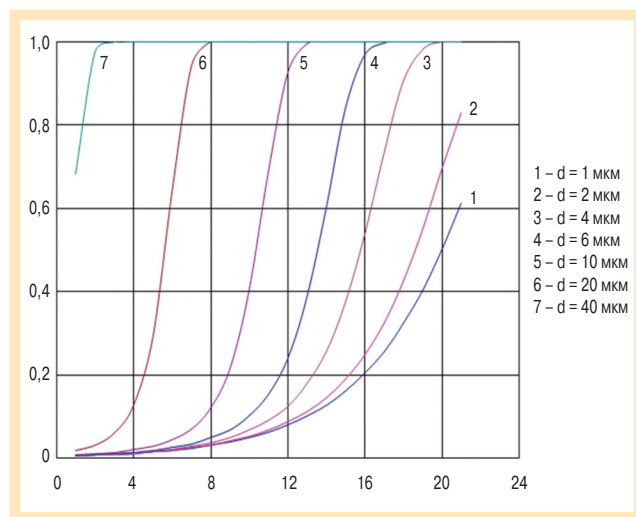


Рис. 1. Зависимость вероятности захвата частицы диаметром d в дыхательных путях i -генерации ТБД

фактивен даже для частиц с диаметром 1–2 мкм. Частицы диаметром ≥ 4 мкм практически достоверно захватываются в каналах с номером генерации < 19 , т. е. до респираторного отдела. Частицы больших диаметров (> 10 мкм) захватываются в верхних дыхательных путях — трахее, зональных внелегочных бронхах, внутрилегочных субсегментарных бронхах.

Рассчитанная по формуле (19) вероятность захвата определяет долю захваченных частиц от числа частиц, вошедших в рассматриваемый канал. Можно определить вероятность $P_a(i)$ достижения дыхательных путей i -генерации как долю частиц, попавших в них от числа частиц, вошедших в нулевую генерацию (трахею) ТБД. Очевидно:

$$P_a(i) = \prod_{k=0}^{i-1} [1 - P(k)]. \quad (22)$$

Здесь произведение вычисляется для всех сомножителей от $k = 0$ до $k = i - 1$. Функция $P_a(i)$ для аэрозольных частиц разных диаметров приведена на рис. 2.

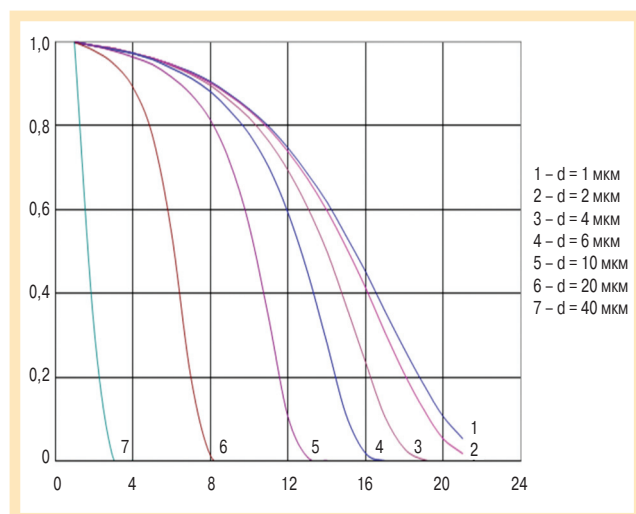


Рис. 2. Вероятность для аэрозольных частиц достичь дыхательных путей i -генерации ТБД

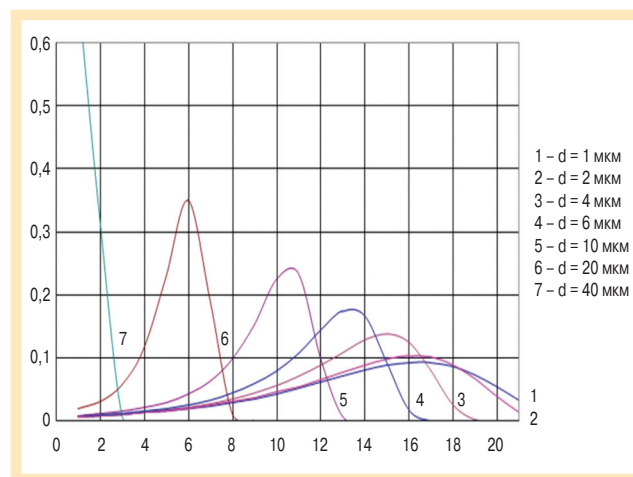


Рис. 3. Распределение осевших частиц по номерам генерации ТБД

Видно, что вероятность достичь глубоких отделов легких практически равна нулю для частиц размерами > 10 мкм. Частицы с размерами 4–6 мкм могут проникнуть в легкие только до терминальных бронхиол. Только частицы размером < 2 мкм могут проникать в респираторные отделы легких, но коэффициент очистки для них составляет порядок и более. Эти данные также свидетельствуют о высокой эффективности захвата частиц как механизма очистки воздуха от аэрозолей.

Приведем данные о вероятности захвата частиц в дыхательных путях ТБД, отнесенной к частицам, вошедшим в трахею. Обозначая эту величину как $P_c(i)$, можем рассчитать ее по очевидной формуле:

$$P_c(i) = P_a(i) \cdot P(i). \quad (23)$$

Результаты расчета величины $P_c(i)$ приведены на рис. 3.

Последний результат дает наглядное представление о том, в каких областях легких происходит захват аэрозольных частиц различных диаметров. Видно, что даже самые мелкие частицы в основном захватываются в бронхиолах до респираторного отдела. Крупные частицы (диаметром ≥ 6 мкм) вообще не проникают до терминальных бронхиол.

Заключение

Появившиеся недавно работы, в которых обнаружено явление завихрения ламинарных потоков в местах бифуркаций дыхательных путей ТБД, послужили основанием для уточнения инерционного механизма очистки воздуха в легких от аэрозольных частиц. Для описания вихрей в каналах с ламинарным потоком, использовались известные результаты, полученные методами вычислительной газодинамики.

В работе рассчитаны вероятность захвата за счет инерционного механизма в отдельном воздушном канале и вероятность захвата, отнесенная ко всем частицам, попавшим в трахею, и далее — в дыхательные пути ТБД.

Обнаружено, что механизм очистки воздуха за счет захвата аэрозолей в дыхательных путях достаточно

эффективен даже для частиц диаметром 1–2 мкм. Частицы диаметром ≥ 4 мкм практически достоверно захватываются в каналах с номером генерации < 19 , т. е. до респираторного отдела. Частицы больших диаметров (> 10 мкм) захватываются в верхних дыхательных путях – трахее, зональных внелегочных бронхах, внутрилегочных субсегментарных бронхах. Только частицы с размером < 2 мкм могут проникать в респираторные отделы легких, но коэффициент очистки для них составляет порядок и более. Эти данные свидетельствуют о высокой эффективности захвата частиц как механизма очистки воздуха от аэрозолей.

Литература

1. Федоров С.Ю., Никаноров Б.А., Хадарцев А.А. и др. К математическому и физическому моделированию процесса ингаляции в системе ингалятор-респираторный тракт. Пульмонология 1995; 3: 20–27.
2. Авдеев С.Н. Устройство доставки ингаляционных препаратов, используемые при терапии заболеваний дыхательных путей. Рус. мед. журн. Пульмонология. Аллергология 2002; 10 (5): 255–261.
3. Hofmann W., Mainelis G., Mohamed A. et al. Modeling approaches in current lung dosimetry models. Environ. Int. 1996; 22 (Suppl. 1): S965–S976.
4. Musante C.J., Martonen T.B. Computer simulations of particle deposition in the developing human lung. J. Air Waste Manag Assoc. 2000; 50: 1426–1432.
5. James A.C. Lung dosimetry. In: Nazaroff W.W., Nero A.V., eds. Radon and its decay products in indoor air. New York: Wiley-Interscience; 1988. 259–309.
6. Swift D.L. Aerosol characteristics and generation. In: Moren F., Dolovich M.B., Newhouse M.T. et al., eds. Aerosols in medicine: Principles, diagnosis and therapy. New York: Elsevier Science (Biomedical Division); 1985. 53–76.
7. Gemci T., Ponyavin V., Chen Y. et al. Computational model of airflow in upper 17 generations of human respiratory tract. J. Biomech. 2008; 41: 2047–2054.
8. Kabilan S., Lin C.-L., Hoffman E.A. Characteristics of airflow in a CT-based ovine lung: A numerical study. J. Appl. Physiol. 2007; 102: 1469–1482.
9. Lee J.W., Goo J.H., Chung M.K. Characteristics of inertial deposition in a double bifurcation. J. Aerosol Sci. 1996; 27: 119–138.
10. Ayinde T.F. A generalized relationship for swirl decay in laminar pipe flow. Sadhana 2010; 35 (2): 129–137.
11. Yeh H.C., Schum G.M. Models of human lung airways and their applications to inhaled particle deposition. Bull. Math. Biol. 1980; 42: 461–480.

Информация об авторе

Федорович Геннадий Викторович – д. ф.-м. н., технический директор ООО "НТМ-Защита"; тел.: (495) 500-03-00; факс: (495) 500-03-00; e-mail: fedorgv@gmail.com

Поступила 29.07.10
© Федорович Г.В., 2013
УДК 612.216.014.46