

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЕ КАПЕЛЬ АЭРОЗОЛЯ В БРОНХИАЛЬНОМ ДЕРЕВЕ ЧЕЛОВЕКА

А.Е. Медведев, П.С. Гафурова

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
630090, Новосибирск, Россия  
Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, Россия*

Работа посвящена математическому построению бронхиального дерева человека, расчету течения газа в легких и моделированию осаждения капель лекарственных аэрозолей в бронхиальном дереве человека. Аналитически построено симметричное бронхиальное дерево человека. Для расчета течения газа в легких и осаждения аэрозолей используется методика поэтапного расчета течения в одной ветки бронхиального дерева. Проведены численные расчеты течения воздуха и аэрозольных капель в легких человека.

Для лечения широкого спектра болезней человека в настоящее время все шире применяется ингаляционный (аэрозольный) способ введения лекарственных препаратов. Этот метод лечения имеет ряд серьезные преимущества над другими способами введения лекарств, так как действует непосредственно в самом месте патологии (для лечения легочных заболеваний) или доставляет лекарство непосредственно в кровь, через легочные альвеолы. Знание о том, как и где капли или частицы лекарства осаждаются в дыхательной системе имеет основополагающее значение правильной дозировки лекарственных средств.

Дыхательная система человека состоит из верхних (нос, носоглотка, гортань) и нижних (трахея, бронхиальное дерево и альвеолы) дыхательных путей. Бронхиальное дерево человека имеет сложную древовидную структуру. От трахеи до альвеол бронхиальное дерево насчитывает 24 ветвление (бифуркации). Отдельные бронхи в сечении не являются, вообще говоря, окружностями. При патологии (например, при астме) происходит сужение бронхов и изменении формы проходного сечения бронхов.

Сложность численного моделирования течения в бронхиальном дереве определяется геометрическим ростом расчетной области с уменьшением размера бронхов (количество бронхов увеличивается в два раза после каждого ветвления). Существующие численные модели ограничены 7-ю генерациями для несимметричного бронхиального дерева и 16-ю для симметричного дерева, тогда как полное бронхиальное дерево человека состоит из 23 генераций. Для моделирования течения в последующих генерациях (в более мелких бронхах) используют одномерные модели течения. Существующие методы построения бронхиального дерева носят эмпирический характер и привязаны к возможностям построения сложной геометрии конкретным коммерческим пакетом CFD моделирования. Существующие модели бронхиального дерева не описывают “звездчатое” внутреннее строение бронхиол и, таким образом, не описывают легкие в норме и особенно при патологии

Для компьютерного моделирования течения воздуха и осаждения капель аэрозоли в бронхиальном дереве человека необходимо построить трехмерную модель бронхов с бифуркациями. Качество построенного бронхиального дерева влияет на точность и скорость вычисления. Ситуация усугубляется разным масштабом верхних и нижних бронхов, что в совокупности приводит к потере точности численных расчетов. Учет нецилиндричности бронхов еще больше усложняет построение трехмерной модели бронхиального дерева. Аналитическое представление позволяет построить бронхиальное дерево

вплоть до альвеол. Для численных расчетов аналитические формулы позволяют построить сетку любой сложности вплоть до самых мелких бифуркаций и бронхов. О построение аналитической модели бронхиального дерева человека подробнее рассказано в работах [1, 2]. Примеры аналитического построения бронхиального дерева человека показаны на рис. 1.

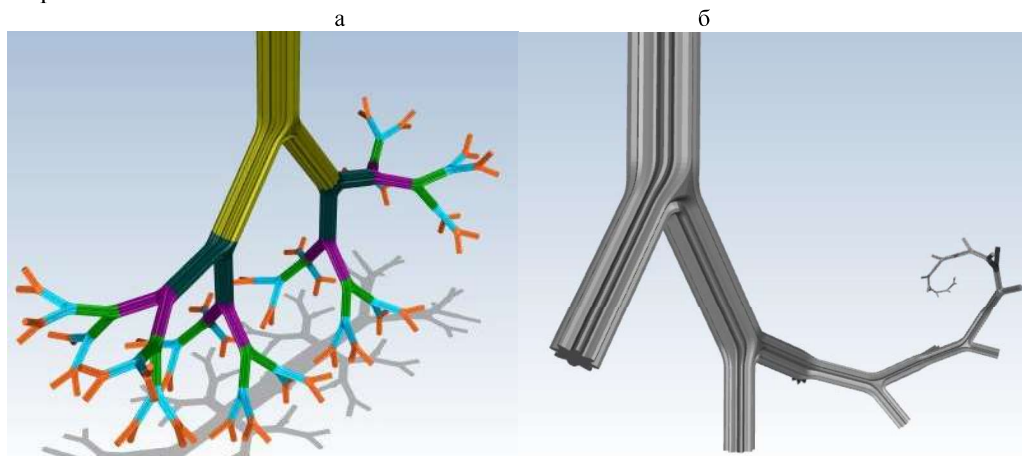


Рис. 1. Построение бронхиального дерева человека. Бронхиальное дерево человека с 0-ой по 5-ю генерации (бифуркации одного порядка выделены одним цветом) (а). Отдельная полная ветвь бронхиального дерева с 0-ой по 23-ю генерацию (б).

В данной работе предложена численная методика последовательного расчета бронхиального дерева человека. Ввиду малых скоростей и давлений сжимаемостью воздуха обычно пренебрегают [3]. Предполагается, что течение ламинарное, расход воздуха через все бронхи  $n$ -ой генерации одинаковый. Расчет проводится от  $n$ -ой к  $n+1$ -ой генерации. На входе в  $n$ -ю генерацию задается поле скоростей и среднее давление во входном сечении, на выходе – расход. После расчета на выходе получим поле скоростей и среднее давление в сечении. Эти значения передаются на  $n+1$ -ю генерацию. Таким образом можно (при желании и терпении) рассчитать течение во всем бронхиальном дереве человека или хотя бы в одной ветке с 0-ой до 23-ей генерации. Размеры бронхов и бифуркация уменьшаются с увеличением номера бифуркации (диаметр бронха 0-й бифуркации 18 мм, а 23-ей только 0.419 мм). Расчет проводится для отдельной бифуркации, так что сетка и точность метода на бифуркации не сильно деградируют, что позволяет почти не терять точности расчета вплоть до 23-ей бифуркации.

Результаты расчета бронхиального дерева до 14-ой бифуркации приведены на рис. 2 (а). Видно, что ламинарный режим течения дает в два раза меньшее значение падения давления, по сравнению с турбулентными расчетами [3].

Для расчета осаждения капель аэрозоли в бронхиальном дереве человека взят для примера типичный компрессорный небулайзер (ингалятор) марки NE-C24 фирмы “Om-gon”. Характеристики небулайзера следующие: размер капель 3 мкм, объемный расход аэрозоли 0.3 мл/мин. Типичный расход воздуха при вдохе аэрозоли через небулайзер взят равным 50 л/мин. Расчеты проводились для одной ветки бронхиального дерева, показанной на рис. 1 (б).

Результаты расчета приведены на рис. 2 (б). Видно, что для начальных бифуркаций характер оседания капель немонотонный. Начиная с 7-ой бифуркации характер оседания носит почти линейный характер. Из расчетов (рис. 2 (б)) видно, что до альвеол доходит только 30% аэрозоли, остальные капли оседают на стенках бронхиального дерева.

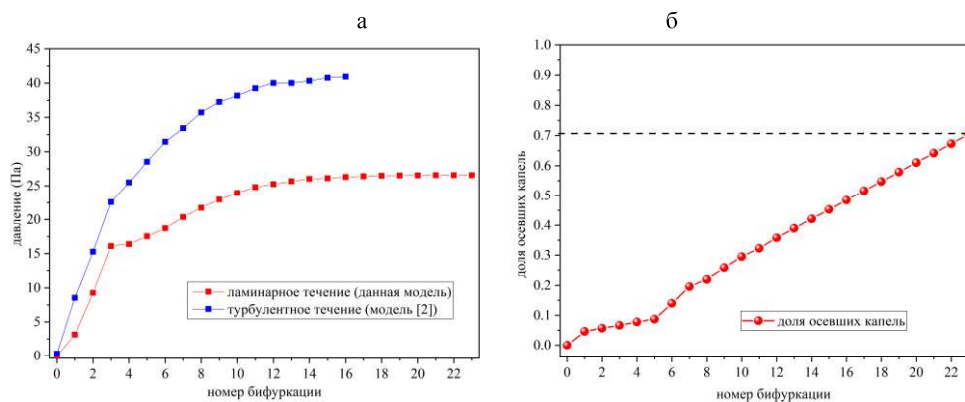


Рис. 2. Расчет перепада давления в бронхиальном дереве в зависимости от номера бифуркации (а). Отношение массовой доли осевших капель аэрозоля к массовой доле прошедших капель в бронхиальном дереве человека в зависимости от номера бифуркации (б).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Субъекта РФ (Новосибирская область) в рамках научного проекта № 19-41-540003 р\_а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Medvedev A.E., Fomin V.M., Gafurova P.S.** Simulation of the flow in the human bronchial tree // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2027, Issue. 1. P. 040074-1 - 040074-11.
2. **Medvedev A.E., Gafurova P.S.** Three-dimensional model of the air flow in the human bronchial tree (normal and pathological cases) // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2125, Issue. 1. P. 030009-1 – 030009-4.
3. **Tena A.F., Fernández J., Álvarez E., Casan P., Walters D.K.** Design of a numerical model of lung by means of a special boundary condition in the truncated branches // International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering. 2017. Vol. 33, No. 6. P. e2830-552.