

Сравнительная оценка потоков аэроионов в моделях верхних дыхательных путей человека при аэроионотерапии

05, май 2012

DOI: 10.7463/0512.0409303

Карпухин В. А., Зотов Ю. И., Крюкова Е. Д.

УДК 613.6.02

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
sterious@yandex.ru

Введение

На сегодняшний день аэроионотерапия достаточно широко применяется в медицинской практике как физиотерапевтический метод профилактики и лечения целого ряда заболеваний, в первую очередь сердечнососудистых [1-3]. Однако достаточно остро стоит вопрос о строгом дозировании аэроионного воздействия, т.к. длительное нахождение человека в зоне высоких концентраций аэроионов не безопасно [4].

В работе [5] предложен численный критерий для оценки дозы воздействия аэроионов в виде потока лёгких отрицательных аэроионов (ЛОАИ), оседающих на стенки верхних дыхательных путей при сеансах аэроионотерапии.

На основании литературных данных [6] в работе [5] был проведен анализ анатомических особенностей верхних дыхательных путей человека и предложена их геометрическая модель для среднестатистического человека в виде сегмента тора.

Однако геометрическая модель в виде сегмента тора имеет существенный недостаток – сложность изготовления экспериментального образца.

Для проведения экспериментальных исследований на макете верхних дыхательных путей и проверки результатов вычислительного эксперимента по расчёту значений потоков ЛОАИ, произведённого в пакете COMSOL Multiphysics 4.0 предлагается использовать цилиндрическую модель верхних дыхательных путей человека.

Замена геометрической модели в виде сегмента тора на цилиндрическую модель может оказаться возможной, т.к. «зона эффективного воздействия» аэроионов [5] приходится в основном на небольшой подсегмент, расположенный у входа в верхние

дыхательные пути (рисунок 1). Данный подсегмент тора для упрощения модели можно аппроксимировать цилиндром.

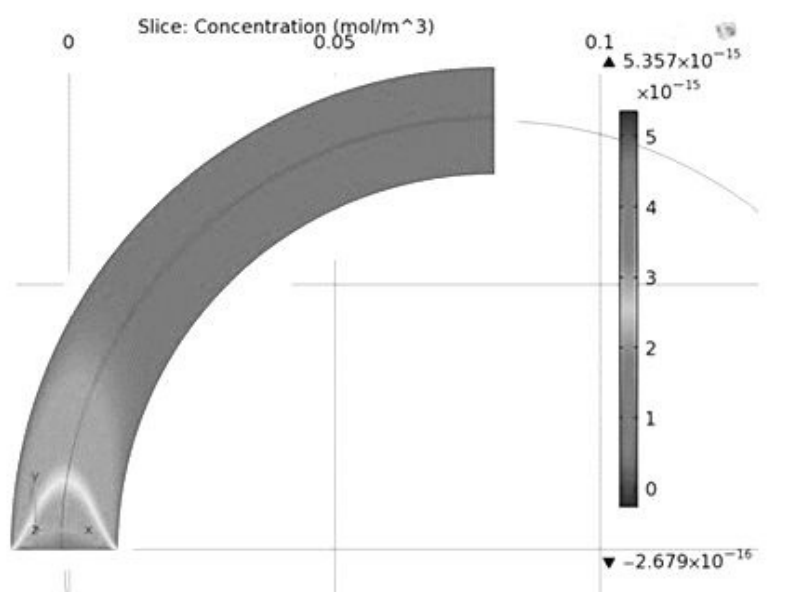


Рисунок 1 - Распределение концентраций ЛОАИ по среднему сечению геометрической модели верхних дыхательных путей в виде сегмента тора

Целью работы является теоретическое обоснование возможности использования цилиндрической модели верхних дыхательных путей при проведении экспериментальных исследований потоков ЛОАИ, оседающих на стенках верхних дыхательных путей среднестатистического человека.

Основными элементами научной новизны в работе являются сформулированные, теоретически и экспериментально подтвержденные, требования к геометрии модели верхних дыхательных путей среднестатистического человека для проведения экспериментальных исследований потоков ЛОАИ.

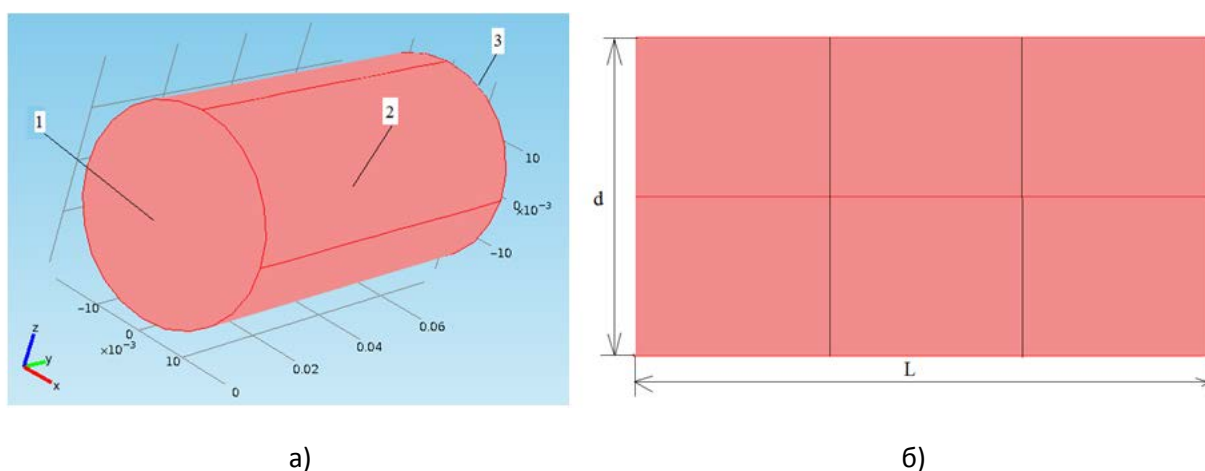
Материалы и методы

Для расчета значения потока ЛОАИ в цилиндрической модели верхних дыхательных путей человека был использован подход, предложенный в работе [5].

После упрощения модели с учётом анатомических особенностей верхних дыхательных путей [6] для трехмерной геометрической модели в виде цилиндра получим:

- диаметр цилиндра $d=0,04$ м;
- длина цилиндра $L=0,075$ м;
- цилиндр разбивается на три фрагмента, соответствующие подсегментам тора в геометрической модели в виде сегмента тора;
- длина каждого фрагмента цилиндра составляет $0,025$ м

Ниже (рисунок 2) представлена геометрическая иллюстрация модели верхних дыхательных путей в виде цилиндра.



а) – трехмерное изображение; б) – двумерное изображение с разбивкой на подсегменты

Рисунок 2 - Геометрическая модель верхних дыхательных путей: 1– вход; 2 – стенки; 3 – выход

При расчете пространственного распределения концентрации ЛОАИ были сделаны следующие допущения:

- внутренняя часть цилиндра заполняется воздухом;
- поток воздуха в цилиндре предполагается ламинарным;
- процессы рекомбинации ЛОАИ внутри цилиндра отсутствуют (в этом случае достигается предельная глубина зоны эффективного воздействия)
- влияние пространственного заряда не учитывается.

С учетом сделанных допущений пространственное распределение концентрации ЛОАИ во внутреннем объеме цилиндра вычислялось путем решения уравнения Фика

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla c = \nabla \cdot (D \cdot \nabla c) + R, \quad (1)$$

где c – концентрация вещества, моль/м³; \mathbf{u} – вектор скорости, м/с; $D = 4,3 \cdot 10^{-6}$ – коэффициент диффузии ЛОАИ, м²/с [7, 8]; $R = 0$ – коэффициент скорости реакции для ЛОАИ, моль/(м³·с).

Для расчета значений плотности потока ЛОАИ, оседающего на внутреннюю поверхность цилиндра использовалось уравнение вида

$$N_0 = -n \cdot (cu - D\nabla c), \quad (2)$$

где \mathbf{n} – нормаль к внутренней поверхности цилиндра; c – концентрация вещества, моль/м³.

Поток ЛОАИ, оседающий на внутреннюю поверхность цилиндра S , рассчитывался по формуле

$$N = \int N_0 \cdot dS, \quad (3)$$

Задача решалась при следующих граничных условиях

– На входе цилиндра задаётся концентрация ЛОАИ, значения которой принимают минимально допустимой, нормальной и максимально допустимой, что составляет соответственно [9]:

$c = 1,0 \cdot 10^{-15}$ моль/м³ (600 ед/см³); $c = 5,0 \cdot 10^{-15}$ моль/м³ (3000 ед/см³); $c = 8,0 \cdot 10^{-14}$ моль/м³ (50000 ед/см³).

– Профиль скорости движения ЛОАИ на входе цилиндра задается параболическим и описывается уравнением

$$u_{in} = -V_{max} \cdot \left(\frac{x^2}{d^2/4} + \frac{z^2}{d^2/4} \right) + V_{max}, \quad (4)$$

где $V_{max} = 1,3$ м/с – максимальная скорость движения ЛОАИ равная максимальной скорости движения воздуха в верхних дыхательных путях человека при вдохе [10]; x, z – координаты образующей окружности цилиндра; d – диаметр цилиндра.

– На стенках цилиндра задается концентрация ЛОАИ $c = 0$ моль/м³.

– На выходе цилиндра задается условие непрерывности потока ЛОАИ

$$-n \cdot DVc = 0, \quad (5)$$

где n – нормаль к выходной поверхности цилиндра.

Полученные значения потоков ЛОАИ пересчитываются в значения ионных токов, обусловленных этими потоками по формуле

$$I = N \cdot F, \quad (6)$$

где N – значение потока ЛОАИ, моль/сек; $F = 96485,3383(83)$ Кл·моль⁻¹ – постоянная Фарадея.

Результаты

В среде COMSOL Multiphysics 4.0 был проведен численный расчет распределения концентрации ЛОАИ внутри геометрической модели верхних дыхательных путей в виде цилиндра (рисунок 3). При проведении расчетов параметр L варьировался в диапазоне от 0,025 до 0,075 м (три фрагмента цилиндра).

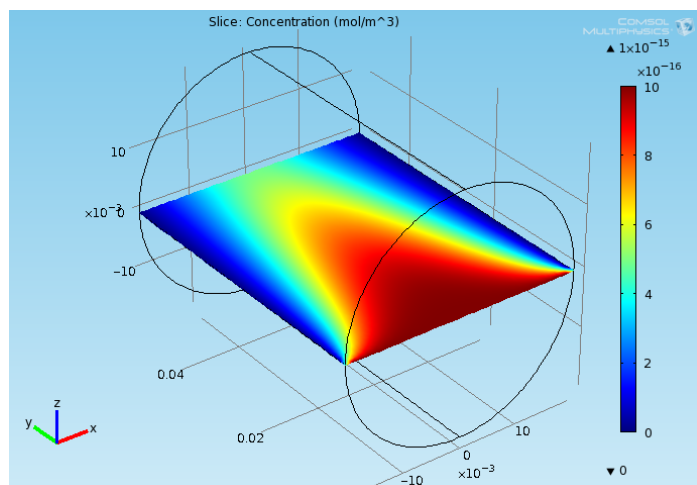


Рисунок 3 - Распределение концентраций ЛОАИ по среднему сечению геометрической модели верхних дыхательных путей в виде цилиндра

Рассчитанные значения потоков ЛОАИ через внутреннюю поверхность фрагментов цилиндров сведены в таблицу 1 для трех значений концентраций на входе геометрической модели верхних дыхательных путей.

Таблица 1

Значения потоков ЛОАИ (модель в виде цилиндра)

№ сегмента	Значение потока N , моль/сек		
	для $c_1=1,0 \cdot 10^{-15}$ моль/м ³	для $c_2=5,0 \cdot 10^{-15}$ моль/м ³	для $c_3=8,0 \cdot 10^{-14}$ моль/м ³
1	$7,248 \cdot 10^{-19}$	$3,624 \cdot 10^{-18}$	$5,798 \cdot 10^{-17}$
2	$1,840 \cdot 10^{-19}$	$9,201 \cdot 10^{-19}$	$1,472 \cdot 10^{-17}$
3	$1,007 \cdot 10^{-19}$	$5,037 \cdot 10^{-19}$	$8,059 \cdot 10^{-18}$
Общ.	$1,006 \cdot 10^{-18}$	$5,048 \cdot 10^{-18}$	$8,076 \cdot 10^{-17}$

Полученные значения потоков ЛОАИ, представленные в таблице 1 пересчитываются в значения ионных токов, обусловленных этими потоками по формуле (6). Рассчитанные значения ионных токов, обусловленных потоками ЛОАИ через стенки верхних дыхательных путей человека, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Значения токов, создаваемых потоками ЛОАИ (модель в виде цилиндра)

№ сегмента	Значение тока I , фА		
	для $c_1=1,0 \cdot 10^{-15}$ моль/м ³	для $c_2=5,0 \cdot 10^{-15}$ моль/м ³	для $c_3=8,0 \cdot 10^{-14}$ моль/м ³
1	69,93	379,70	5594,00
2	17,75	88,78	1420,00
3	9,72	48,60	777,60
Общ.	97,06	487,10	7792,00

В работе [5] рассчитаны значения потоков ЛОАИ через внутреннюю поверхность верхних дыхательных путей для геометрической модели в виде сегмента тора (таблица 3).

Таблица 3

Значения потоков ЛОАИ (модель в виде сегмента тора)

№ сегмента	Значение потока N , моль/сек		
	для $c_1=1,0 \cdot 10^{-15}$ моль/м ³	для $c_2=5,0 \cdot 10^{-15}$ моль/м ³	для $c_3=8,0 \cdot 10^{-14}$ моль/м ³
1	$6,991 \cdot 10^{-19}$	$3,496 \cdot 10^{-18}$	$5,593 \cdot 10^{-17}$
2	$2,791 \cdot 10^{-19}$	$1,396 \cdot 10^{-18}$	$2,233 \cdot 10^{-17}$
3	$8,372 \cdot 10^{-20}$	$4,186 \cdot 10^{-19}$	$6,698 \cdot 10^{-18}$
Общ.	$1,062 \cdot 10^{-18}$	$5,310 \cdot 10^{-18}$	$8,496 \cdot 10^{-17}$

По имеющимся данным о потоках ЛОАИ для двух геометрических моделей верхних дыхательных путей (в виде сегмента тора и в виде цилиндра) рассчитаны относительные погрешности, возникающие в результате упрощения геометрической модели верхних дыхательных путей от модели в виде сегмента тора к модели в виде цилиндра по формуле

$$\delta = \frac{N_{\text{тор}} - N_{\text{цил}}}{N_{\text{тор}}} \quad (7)$$

где $N_{\text{тор}}$ – значение потока ЛОАИ в геометрической модели в виде сегмента тора; $N_{\text{цил}}$ – значение потока ЛОАИ в геометрической модели в виде цилиндра.

Полученные результаты сведены в таблицу 4.

Таблица 4

Значения относительных погрешностей

№ сегмента	Значение относительной погрешности, %		
	для $c_1=1,0 \cdot 10^{-15}$ моль/м ³	для $c_2=5,0 \cdot 10^{-15}$ моль/м ³	для $c_3=8,0 \cdot 10^{-14}$ моль/м ³
1	3,68	3,66	3,67
2	34,07	34,09	34,08
3	20,28	20,33	20,32
Общ.	5,27	4,93	4,94

Обсуждение

На основании произведённого в среде COMSOL Multiphysics 4.0 численного расчёта значений потока ЛОАИ для геометрической модели верхних дыхательных путей среднестатистического человека в виде цилиндра и сравнения полученных результатов с аналогичными данными для геометрической модели в виде сегмента тора, установлено, что значения относительных погрешностей расчёта потоков ЛОАИ, возникающих в

результате упрощения геометрической модели верхних дыхательных путей от сегмента тора к цилиндру при концентрациях ЛОАИ 600 ед/см^3 ; 3000 ед/см^3 и 50000 ед/см^3 составили, соответственно,

- для первого фрагмента модели 3,68; 3,66 и 3,67 %;
- для второго фрагмента модели 34,07; 34,09 и 34,08 %;
- для третьего фрагмента модели 20,28; 30,33 и 20,32 %;
- для трёх фрагментов модели суммарно 5,27; 4,93 и 4,94 %.

Таким образом, относительная погрешность потока ЛОАИ, возникающая в результате упрощения геометрической модели верхних дыхательных путей от сегмента тора к цилиндру, для трёх участков суммарно не превышает 5,3 %.

Для проведения экспериментальных исследований потоков ЛОАИ, оседающих на стенках верхних дыхательных путей среднестатистического человека допустимо использовать модель в виде цилиндра с диаметром цилиндра 0,04 м и длиной цилиндра 0,075 м.

Литература

1. Kondrashova M.N., Grigorenko E.V., Tikhonov A.N. et al. The Primary Physico-Chemical Mechanism for the Beneficial Biological/Medical Effects of Negative Air Ions // IEEE Transactions on plasma science. – 2000. - V. 28, №1.- P. 230-238.
2. Гишинская Н.Ю., Супова М.В. Применение аэроионотерапии у больных гипертонической болезнью с ночным апноэ при храпе // Русский медицинский журнал. - 2003. – Т.11, № 21 – С. 36 - 42.
3. Герасимова Л.И. Аэроионотерапия. Профилактическое и лечебное воздействие на организм человека. Роль, сущность, механизм и аппаратура. - М., 1996
4. Гуськов А.С. Комплексная гигиеническая оценка ионизации воздушной среды закрытых помещений: автореф. дис. канд. мед. наук: 14.00.07 ГУ НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.Н. Сысина. – М., 2005. - 22 с.
5. Карпухин В.А., Зотов Ю.И., Крюкова Е.Д. Исследование процесса оседания аэроионов на стенки верхних дыхательных путей человека при аэроионотерапии // Биомедицинская радиоэлектроника. Биомедицинские технологии и радиоэлектроника, – 2012. – №3. – С. 36–41.
6. Тегакко Л. И., Марфина О. В. Практическая антропология. — Ростов-на-Дону, 2003. - 320 с.

7. Лепихов П.В. Биотехническая система управления концентрацией легких ЛОАИ: Дисс. ... канд. тех. наук : 05.11.17. - МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2007. – 167 с.
8. Лившиц М.Н. Аэроионификация. Практическое применение. – М.: Стройиздат, 1990.- 168 с.
9. СанПиН 2.2.4.1294-03. Гигиенические требования к аэроионному составу воздуха производственных и общественных помещений.– М., 2003. – 3 с.
10. Физиология человека: Учебник / Под ред. В.М. Покровского, Г.Ф. Коротько. - 2-е изд., перераб. и доп.- М.: ОАО Издательство «Медицина», 2007. – 656 с.

Comparative estimation of air ion streams in the models of person's upper respiratory tracts during airionic therapy.

05, May 2012

DOI: 10.7463/0512.0409303

Karpuhin V.A., Zotov Yu.I., Kryukova E.D.

Russia, Bauman Moscow State Technical University
sterious@yandex.ru

In this paper numerical calculation of values of light negative air ion (LNAI) stream was carried out for a cylindrical geometrical model in the COMSOL Multiphysics 4.0. on the basis of the solution of the Fick equation. The relative error of a light negative air ion stream appearing with simplification of geometrical model of the upper respiratory tracts from a tore segment to the cylinder didn't exceed 5,3 %. Possibility of use of a cylindrical model of the upper respiratory tracts was proved by means of experimental studies of streams of the light negative air ions (LNAI) settling on walls of the upper respiratory tracts of an average person.

Publications with keywords: [air ions](#), [model of the upper respiratory tracts](#), [air ions streams](#), [air ions concentration](#)

Publications with words: [air ions](#), [model of the upper respiratory tracts](#), [air ions streams](#), [air ions concentration](#)

References

1. Kondrashova M.N., Grigorenko E.V., Tikhonov A.N., et al. The Primary Physico-Chemical Mechanism for the Beneficial Biological/Medical Effects of Negative Air Ions. *IEEE Transactions on plasma science*, 2000, vol. 28, no.1, pp. 230-238.
2. Gilinskaia N.Iu., Supova M.V. Primenenie aeroionoterapii u bol'nykh gipertonicheskoi bolezni'u s nochnym apnoe pri khrape [The use of aeroionotherapy in hypertensive patients with sleep apnea at snoring]. *Russkii meditsinskii zhurnal*, 2003, vol. 11, no. 21, pp. 36 - 42.
3. Gerasimova L.I. *Aeroionoterapiia. Profilakticheskoe i lechebnoe vozdeistvie na organizm cheloveka. Rol', sushchnost', mekhanizm i apparatura* [Aeroionotherapy. Prophylactic and medicinal impact on the human body. The role, nature, mechanism and equipment]. Moscow, 1996
4. Gus'kov A.S. *Kompleksnaia gigienicheskaiia otsenka ionizatsii vozdushnoi sredy zakrytykh pomeshchenii. Avtoref. dis. kand. med. nauk* [A comprehensive hygienic assessment of the

- ionization of air environment in the closed premises: Abstract of cand. diss.]. Moscow, 2005. 22 p.
5. Karpukhin V.A., Zotov Iu.I., Kriukova E.D. Issledovanie protsessa osedaniia aeroionov na stenki verkhnikh dykhatel'nykh putei cheloveka pri aeroionoterapii [Investigation of the process of subsidence of air ions on the walls of the upper human respiratory tract at aeroionotherapy]. *Biomeditsinskaia radioelektronika. Biomeditsinskie tekhnologii i radioelektronika* [Biomedical electronics. Biomedical technology and radio electronics], 2012, no. 3, pp.36-41.
 6. Tegako L.I., Marfina O.V. *Prakticheskaiia antropologiia* [Practical anthropology]. Rostov-on-Don, 2003. 320 p.
 7. Lepikhov P.V. *Biotekhnicheskaiia sistema upravleniia kontsentratsiei legkikh LOAI: Diss. ... kand. tekhn. nauk* [Biotechnical control system of the concentration of light negative aeroions (LOAI): Cand. diss.]. Moscow. The Bauman MSTU, 2007. 167 p.
 8. Livshits M.N. *Aeroionifikatsiia. Prakticheskoe primenenie* [Aeroionization. Practical application]. Moscow, Stroiizdat, 1990. 168 p.
 9. *SanPiN 2.2.4.1294-03. Gigienicheskie trebovaniia k aeroionnomu sostavu vozdukha proizvodstvennykh i obshchestvennykh pomeshchenii* [Sanitary Rules and Norms 2.2.4.1294-03. Hygienic requirements to the air ionic air composition of industrial and public premises]. Moscow, 2003. 3 p.
 10. Pokrovskii V.M, Korot'ko G.F., Eds. *Fiziologiia cheloveka* [Human physiology]. Moscow, Meditsina, 2007. 656 p.