

научно-практический
журнал

Гигиена и Санитария

Hygiene & Sanitation (Russian journal)



«ИЗДАТЕЛЬСТВО "МЕДИЦИНА"»

1

Том 95 • 2016

www.medlit.ru

- Гигиена окружающей среды и населенных мест
- Гигиена труда
- Гигиена детей и подростков
- Гигиена питания
- Методы гигиенических исследований
- Профилактическая токсикология и гигиеническое нормирование
- Методология и практика социально-гигиенического мониторинга

ISSN 0016-9900



9 770016 990008

СОДЕРЖАНИЕ

Тематический номер, посвященный 20-летию
ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических
технологий управления рисками здоровью населения»

ПРОБЛЕМНЫЕ СТАТЬИ

- Зайцева Н.В., Попова А.Ю., Онищенко Г.Г., Май И.В. Актуальные проблемы правовой и научно-методической поддержки обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения Российской Федерации как стратегической государственной задачи..... 5

ГИГИЕНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
И НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ

- Клейн С.В., Вековшинина С.А., Сбоев А.С. Приоритетные факторы риска питьевой воды и связанный с этим экономический ущерб..... 10
- Сбоев А.С., Романенко К.В. Анализ влияния хлорорганических соединений, содержащихся в воде сети хозяйственно-питьевого водоснабжения, на здоровье населения в городах Пермского края..... 14
- Зайцева Н.В., Устинова О.Ю., Сбоев А.С. Медико-профилактические технологии управления риском нарушений здоровья, ассоциированных с воздействием факторов среды обитания.. 17
- Май И.В., Клейн С.В., Вековшинина С.А., Балашов С.Ю. Использование методологии оценки риска при разработке генерального плана городского поселения..... 22
- Никифорова Н.В., Кокоулина А.А., Загороднов С.Ю. Оценка загрязненности воздуха жилых помещений формальдегидом в условиях применения полимерсодержащих строительных и отделочных материалов..... 28

ГИГИЕНА ТРУДА

- Шляпников Д.М., Шур П.З., Алексеев В.Б., Лебедева Т.М., Костарев В.Г. Методические подходы к комплексному анализу экспозиции и стажа в оценке профессионального риска Алексеев В.Б., Шляпников Д.М., Власова Е.М., Носов А.Е., Лебедева Т.М. Оценка риска и профилактика патологии органов дыхания у работников титаномагневых производств.. 33
- Носов А.Е., Байдина А.С., Власова Е.М., Алексеев В.Б. Анализ вариабельности ритма сердца при нарушении сердечной деятельности у работников нефтедобывающего предприятия.... 37
- Долгих О.В., Старкова К.Г., Кривцов А.В., Бубнова О.А. Вариабельность иммунорегуляторных и генетических маркеров в условиях комбинированного воздействия факторов производственной среды..... 41
- Барг А.О. Особенности поведенческих факторов риска здоровью у работников промышленных предприятий..... 45
- Дубель Е.В., Унгурияну Т.Н. Гигиеническая оценка условий труда медицинского персонала клинических и параклинических отделений стационара..... 48
- 53

ГИГИЕНА ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ

- Устинова О.Ю., Валина С.Л., Кобякова О.А., Никифорова Н.В., Алексеева А.В. Обоснование оптимальной наполняемости групп дошкольных образовательных организаций общеразвивающей направленности..... 57
- Старкова К.Г., Долгих О.В., Дианова Д.Г., Лебедева Т.М. Иммуномодулирующие эффекты у детей в условиях воздействия стронция при поступлении с питьевой водой..... 63
- Лужецкий К.П., Маклакова О.А., Палагина Л.Н. Нарушения жирового и углеводного обмена у детей, потребляющих питьевую воду ненормативного качества..... 66
- Маклакова О.А., Валина С.Л. Кардиореспираторные нарушения у детей дошкольного возраста, ассоциированные с аэрогенным воздействием бензола, фенола и формальдегида..... 70

ГИГИЕНА ПИТАНИЯ

- Родионова Н.С., Алексеева Т.В., Попов Е.С., Калгина Ю.О., Натарова А.А. Гигиенические аспекты и перспективы отечественного производства продуктов глубокой переработки зародышей пшеницы..... 74

CONTENTS

The thematic issue of the Journal is dedicated to the 20th anniversary of the foundation of the Federal Budget Institution of Science "Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies"

PROBLEM SOLVING ARTICLES

- Zaytseva N.V., Popova A.Yu., Onishchenko G.G., May I.V. Current problems of regulatory and scientific-medical support for the assurance of the sanitary and epidemiological welfare of population in the Russian Federation as the strategic government task

HYGIENE OF THE ENVIRONMENT AND LOCALITIES

- Klein S.V., Vekovshinina S.A., Sboev A.S. Priority risk factors of drinking water and the related with it economical loss
- Sboev A.S., Romanenko Ch.V. Analysis of the impact of organochlorine compounds contained in the water network of the domestic water supply on the health of population in cities of the Perm Krai
- Zaytseva N.V., Ustinova O.Yu., Sboev A.S. Medical and preventive technologies for risk management of health problems associated with exposure to environmental factors
- May I.V., Kleyn S.V., Vekovshinina S.A., Balashov S.Yu. The use of the methodology of risk assessment in the elaboration of the general layout of an urban settlement
- Nikiforova N.V., Kokoulina A.A., Zagorodnov S.Yu. Evaluation of indoor air pollution with formaldehyde in conditions of the use of constructional and finish materials with polymeric components

OCCUPATIONAL HYGIENE

- Shlyapnikov D.M., Shur P.Z., Alekseev V.B., Lebedeva T.M., Kostarev V.G. Methodological approaches to the integrated evaluation of the exposure and length of service in the occupational risk assessment Alekseev V.B., Shlyapnikov D.M., Vlasova E.M., Nosov A.E., Lebedeva T.M. Risk assessment and prevention of respiratory diseases in workers occupied in titanium and magnesium production
- Nosov A.E., Baydina A.S., Vlasova E.M., Alekseev V.B. Analysis of the heart rate variability in cardiac abnormalities in workers employed in oil production
- Dolgikh O.V., Starkova K.G., Kryvtsov A.V., Bubnova O.A. Variability of immunoregulatory and genetic markers in conditions of the combined effects of industrial environmental factors
- Barg A.O. Peculiarities of behavioral risk factors for health in workers of industrial enterprises
- Dubel E.V., Unguryanu T.N. Hygienic assessment of working conditions for medical personnel in clinical and paraclinical departments of the hospital

HYGIENE OF CHILDREN AND ADOLESCENTS

- Ustinova O.Yu., Valina S.L., Kobyakova O.A., Nikiforova N.V., Alekseeva A.V. Rationale for the optimal group occupancy in preschool educational institutions of general enrichment orientation
- Starkova K.G., Dolgikh O.V., Dianova D.G., Lebedeva T.M. Immunomodulatory effects in children in conditions of the exposure to strontium due to intake with drinking water
- Luzhetsky K.P., Maklakova O.A., Palagina L.N. Disorders of lipid and carbohydrate metabolism in children consuming drinking water of a non-normative quality
- Maklakova O.A., Valina S.L. Cardiorespiratory disorders in preschool aged children associated with aerogenic impact of benzene, phenol and formaldehyde

FOOD HYGIENE

- Rodionova N.S., Alekseeva T.V., Popov E.S., Kalgina Yu.O., Natarova A.A. Hygiene aspects and prospects for the domestic production of products of deep processing of wheat germ

- Попов Е.С., Родионова Н.С., Соколова О.А., Мазуренко Н.Ю. Оценка перспектив производства сбалансированных по полиненасыщенным жирным кислотам продуктов из отечественного растительного сырья..... 79
- Антипова Л.В., Дворянинова О.П., Соколов А.В. Прудовые рыбы в улучшении структуры питания населения: гигиенические аспекты..... 84

МЕТОДЫ ГИГИЕНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

- Цинкер М.Ю. Трехмерное моделирование дыхательной системы человека для задач оценки рисков здоровью при ингаляционной экспозиции химических веществ..... 90

ПРОФИЛАКТИЧЕСКАЯ ТОКСИКОЛОГИЯ И ГИГИЕНИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ

- Ланин Д.В., Лебедева Т.М. Воздействие химических факторов среды обитания на функции и взаимосвязи регуляторных систем у детей..... 94
- Землянова М.А., Пустовалова О.В., Мазунина Д.Л., Сбоев А.С. Биохимические маркерные показатели негативных эффектов у детей при воздействии хлорорганических соединений с питьевой водой..... 97
- Карпова М.В., Землянова М.А., Мазунина Д.Л. Биомаркеры цитогенетических нарушений при воздействии марганца и стабильного стронция питьевой воды..... 102

МЕТОДОЛОГИЯ И ПРАКТИКА СОЦИАЛЬНО-ГИГИЕНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

- Зайцева Н.В., Шур П.З., Май И.В., Кирьянов Д.А. К вопросу о применении прогнозирования эволюции риска здоровью в гигиенических оценках..... 106
- Уланова Т.С., Нурисламова Т.В., Карнажицкая Т.Д., Гилева О.В. Методические особенности определения химических соединений и элементов в биологических средах..... 112
- Гилева О.В., Уланова Т.С., Вейхман Г.А., Недошитова А.В., Стенно Е.В. Методическое обеспечение определения токсичных и эссенциальных элементов в биологических средах человека..... 116
- Нурисламова Т.В., Уланова Т.С., Попова Н.А., Мальцева О.А. Методическое обеспечение социально-гигиенического мониторинга акрилонитрила в атмосферном, выдыхаемом воздухе и крови..... 122

- Popov E.S., Rodionova N.S., Sokolova O.A., Mazurenko N.Yu. Estimation of prospects of the production from domestic vegetable raw materials balanced on polyunsaturated fatty acids..... 79
- Antipova L.V., Dvoryaninova O.P., Sokolov A.V. Pond fishes in the improvement of the structure of population's nutrition: hygienic aspects..... 84

METHODS OF HYGIENIC INVESTIGATIONS

- Tsinker M.Yu. Three-dimensional modeling of human respiratory system for tasks of health risk assessment in the exposure to the chemicals inhalation..... 90

PREVENTIVE TOXICOLOGY AND HYGIENIC RATING

- Lanin D.V., Lebedeva T.M. The influence of chemical environmental factors on functions and interrelationships of regulatory systems in children..... 94
- Zemlyanova M.A., Pustovalova O.V., Mazunina D.L., Sboev A.S. Biochemical marker indices of negative impacts in children under the exposure to the chlororganic compounds with drinking water..... 97
- Karpova M.V., Zemlyanova M.A., Mazunina D.L. Biomarkers of cytogenetic disorders under the external environmental isolated exposure of manganese and stable strontium from drinking water..... 102

METHODOLOGY AND PRACTICE OF SOCIO-HYGIENIC MONITORING

- Zaitseva N.V. Shur P.Z. May I.V., Kiryanov D.A. On the question of the application of the prediction of the evolution of health risk in hygienic assessments..... 106
- Ulanova T.S., Nurislamova T.V., Karnazhitskaya T.D., Gileva O.V. Methodical peculiarities and guidelines for the determination of chemical compounds and elements in the biological matrices..... 112
- Gileva O.V., Ulanova T.S., Viekhman G.A., Nedoshitova A.V., Stenno E.V. Methodical assurance of the assessment of toxic and essential elements in human biological matrices..... 116
- Nurislamova T.V., Ulanova T.S., Popova N.A., Maltseva O.A. Methodical support of social-hygienic and medical-biological monitoring of acrylonitrile in atmospheric, expired air and blood..... 122

Полнотекстовый архив 2012–2014

на сайтах www.cyberleninka.ru и www.elibrary.ru в открытом доступе

Уважаемые авторы!

Правила оформления статей можно найти на сайте Издательства "Медицина" www.medlit.ru на странице нашего журнала.

Художественный редактор
А. В. Минаичев
Корректор Т. Д. Малышева
Переводчик Л. Д. Шакина
Верстка С. М. Мешкорудникова

Все права защищены. Ни одна часть этого издания не может быть занесена в память компьютера либо воспроизведена любым способом без предварительного письменного разрешения издателя.

Сдано в набор 21.12.2015.
Подписано в печать 25.01.2016.
Формат 60 × 88 1/8. Печать офсетная.
Печ. л. 12,0. Усл. печ. л. 11,76.
Уч.-изд. л. 12,5. Заказ 12.

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика",
142110, г. Подольск, ул. Кирова, 15

8. Dvoryaninova O.P., S'yanov D.A. The use of biotechnological potential of freshwater biological resources for the purpose of obtaining high-quality and safe fish products. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2013; 4: 199–204. (in Russian)
9. Dvoryaninova O.P., Sokolov A.V. Development of high-valuable foodstuff on the basis of objects of an aquaculture for ensuring the balanced food of the population. *Modern problems of science and education*. 2015.; 1: 254. (in Russian)
10. Antipova L.V., Glotova I.A., Rogov I.A. *Research Methods of Meat and Meat Products: Textbook for Universities [Metody issledovaniya myasa i myasnykh produktov: Uchebnik dlya VUZov]*. Moscow: Kolos; 2001. (in Russian)
11. Rogov I.A., Antipova L.V., Dunchenko N.A. *Food Chemistry [Khimiya pishchi]*. Moscow: KolosS; 2007. (in Russian)
12. Antipova L.V., Bezryadin N.N., Titov S.A. *Physical Methods of Control of Raw Materials and Products in the Meat Industry: Laboratory [Fizicheskie metody kontrolya syr'ya i produktov v myasnoy promyshlennosti: Laboratornyy praktikum]*. St.Petersburg: GIOR; 2006. (in Russian)
13. Skurikhin I.M., Tutel'yan V.A., eds. *The Chemical Composition of Russian Food: a Handbook [Khimicheskiy sostav rossiyskikh pishchevykh produktov: Spravochnik]*. Moscow: DeLi print; 2002. (in Russian)
14. Dvoryaninova O.P., Alekhina A.V., Storublevtsev S.A. Obtaining and study the properties of the enzyme complex of freshwater carp meat. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya*. 2010; 4: 13–5. (in Russian)
15. Antipova L.V., Dvoryaninova O.P., Kalach E.V. Food biotechnology in ensuring proper nutrition of the population on the basis of biological resources and the study of quality of regional freshwater aquaculture. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy*. 2010; 3: 71–4. (in Russian)
16. Subbotina M.A. Factors influencing the biological value of vegetable oils and animal fats. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2009; 2: 86–90. (in Russian)
17. Antipova L.V., Antipov S.S., Altaeva A., Alikulov Z. Xenobiotics in food chains of aquatic ecosystems in the production of aquaculture food sources. In: *Proceedings of the 3rd Baikal Microbiology Symposium "Microorganisms and Viruses in Aquatic Ecosystems" [Materialy 3-go Baykal'skogo Mikrobiologicheskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem «Mikroorganizmy i virusy v vodnykh ekosistemakh»]*. Irkutsk; 2011. (in Russian)
18. Shebela K.Yu., Sarbatova N.Yu. Useful properties of fish for food. *Molodoy uchenyy*. 2014; 17: 112–5. (in Russian)
19. Fish and seafood. The table of caloric content and chemical composition of the products. Available at: http://health-diet.ru/base_of_food/food_1515/index.php (accessed 18 November 2015). (in Russian)

Поступила 04.06.15

Методы гигиенических исследований

© ЦИНКЕР М.Ю., 2016

УДК 614.72:616.24]:001.8

Цинкер М.Ю.

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЫХАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ РИСКОВ ЗДОРОВЬЮ ПРИ ИНГАЛЯЦИОННОЙ ЭКСПОЗИЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения», 614045, Пермь

В рамках многоуровневой модели накопления функциональных нарушений в организме человека под воздействием факторов среды обитания разрабатывается подмодель «мезоуровня» дыхательной системы. Статья посвящена трехмерному моделированию процесса течения в крупных дыхательных путях человека. Рассмотренные подходы могут быть применены для задач оценки риска здоровью при ингаляционной экспозиции химических веществ.

Ключевые слова: математическое моделирование; дыхательная система; ингаляционная экспозиция; эволюция риска здоровью.

Для цитирования: Цинкер М.Ю. Трехмерное моделирование дыхательной системы человека для задач оценки рисков здоровью при ингаляционной экспозиции химических веществ. *Гигиена и санитария*. 2016; 95(1): 90–93. DOI: 10.18821/0016-9900-2016-95-1-90-93.

Tsinker M. Yu.

THREE-DIMENSIONAL MODELING OF HUMAN RESPIRATORY SYSTEM FOR TASKS OF HEALTH RISK ASSESSMENT IN THE EXPOSURE TO THE CHEMICALS INHALATION

Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, Russian Federation, 614045

In the framework of multi-level model of accumulation of functional disorders in the human body under the influence of environmental factors there is delivered a sub-model of the “meso-level” of the respiratory system. The article is devoted to the three-dimensional modelling of the air flow in large airways of a human. The considered approaches can be applied for tasks of the health risk assessment in chemicals inhalation exposure.

Keywords: mathematical modelling; the respiratory system; inhalation exposure; the evolution of the health risk.

For citation: Tsinker M. Yu. Three-dimensional modeling of human respiratory system for tasks of health risk assessment in the exposure to the chemicals inhalation. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)* 2016; 95(1): 90–93. (In Russ.). DOI: 10.18821/0016-9900-2016-95-1-90-93.

For correspondence: Mikhail Y. Tsinker, E-mail: Tsinker@fcrisk.ru

Received 20.06.15

Для корреспонденции: Цинкер Михаил Юрьевич, математик отдела математического моделирования систем и процессов ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Роспотребнадзора, 614045, Пермь, E-mail: cinker@fcrisk.ru

В процессе жизнедеятельности человек постоянно взаимодействует со средой обитания, получая из нее необходимые питательные вещества и подвергаясь негативному влиянию множества химических, физических, биологических факторов. Комплексное воздействие факторов среды обитания на организм человека вызывает повышенные риски здоровью населения, проявляющиеся в дополнительной заболеваемости и смертности [1, 2].

Всесторонне исследовать состояние здоровья человека позволяют клинично-лабораторные и инструментальные методы диагностики. Несмотря на непрерывное совершенствование методов диагностики, многие исследования являются довольно трудоемкими и дорогостоящими, продолжительными во времени. Более того, лабораторные методы не дают возможности прогнозировать функциональные нарушения органов и систем человека, а именно эта задача является одной из приоритетных при решении вопросов, связанных с оценкой риска для здоровья человека.

Успешной диагностике и прогнозированию течения заболевания в значительной мере могли бы способствовать знания о причинах, факторах и механизмах его развития. Одними из наиболее перспективных подходов для оценки рисков здоровью от факторов среды обитания и установления причинно-следственных связей являются методы математического моделирования [3, 4].

В настоящее время коллектив авторов разрабатывает многоуровневую математическую модель эволюции функциональных нарушений человеческого организма, учитывающую влияние факторов среды обитания [5]. В данной модели индивидуальный человеческий организм представлен конечным набором органов и систем, полностью взаимосвязанных между собой. На «макроуровне» рассматриваются механизмы возникновения функциональных нарушений, обусловленные естественными процессами и негативным воздействием факторов среды обитания. На «мезоуровне» детально рассматриваются процессы, происходящие в отдельных системах человеческого организма [6], на «микроуровне» – процессы на уровне клеток. На основе многоуровневой модели разработаны подходы к оценке интегрального и популяционного риска здоровью [7].

Необходимость установления кинетических зависимостей для химических веществ, поступающих из атмосферного воздуха в человеческий организм, обуславливает целесообразность развития подмодели «мезоуровня» дыхательной системы [8]. При ингаляционной экспозиции химических веществ можно выделить два механизма эволюции риска нарушений дыхательной системы – непосредственное раздражающее действие химических веществ при поступлении в воздухоносные пути и легкие человека и негативное воздействие химических веществ, содержащихся в крови, поступающей в дыхательную систему [9]. Кроме того, вещества, поступающие через органы дыхания, посредством кровеносной системы, могут оказывать воздействие и на другие органы и системы человеческого организма, увеличивая риск возникновения нарушений здоровья.

В зависимости от целей исследования математические модели дыхательной системы существенно различаются. В [10] представлен ряд моделей легких человека, отличающихся по мере увеличения сложности, начиная от представления легких жестким контейнером, сообщаемым с атмосферой, и заканчивая моделью легкого с изменяющимся объемом и давлением (аналогия с поршнем) под действием работы мышц, учитывающей газообмен с кровью и перфузию крови. В [11] представлена двухкомпарментальная модель легких, состоящая из анатомически мертвого пространства и альвеолярного пространства, через которое осуществляется перфузия крови. Данные модели позволяют объяснить основные физиологические процессы, происходящие при дыхании, но не учитывают реальную геометрию и не позволяют проследить пространственные характеристики процессов.

В этой связи представляется целесообразным оценивать поступление химических веществ ингаляционным путем методами механики сплошной среды, описывающих простран-



Рис. 1. Схема согласования подмоделей дыхательной системы.

ственно-временные закономерности. В последние десятилетия наибольший интерес представляют трехмерные модели течения воздуха как многокомпонентной смеси газов, движущейся в каналах сложной формы [12–16]. Однако существующие модели описывают только отдельные участки легких, переносят ограниченное количество химических веществ, не учитывают взаимодействие органов человека между собой и не дают возможности прогнозировать функциональные нарушения здоровья человека, связанные с факторами среды обитания.

Таким образом, цель работы – разработка эволюционной математической модели дыхательной системы, учитывающей воздействия факторов среды обитания. Разрабатываемая модель должна описывать взаимодействие дыхательной системы с другими системами человеческого организма, накопление функциональной поврежденности дыхательной системы за счет естественных процессов старения организма и воздействий внешне-средовых факторов.

Под дыханием понимают совокупность процессов, обеспечивающих поступление из атмосферного воздуха в кровь кислорода и удаление углекислого газа. Воздух в общем случае является многокомпонентной смесью газов с твердыми частицами. При дыхании в незапыленных условиях воздух можно считать многокомпонентной смесью газов. Дыхательную систему представим состоящей из крупных воздухоносных путей (первые 4 генерации, начиная с трахеи), входящих в соответствующие участки легких. Легкие, заполненные более мелкими дыхательными путями и содержащимися в них воздухом, представим сплошной деформируемой насыщенной пористой средой. Стенки легких являются альвеолярно-капиллярной мембраной, через которую посредством диффузии происходит газообмен между воздухом и кровью. В кровь из воздуха попадает кислород, а выделяется углекислый газ. Кроме кислорода и углекислого газа в газообмене участвуют другие химические вещества, содержащиеся в атмосферном воздухе. Регуляция дыхания осуществляется центральной нервной системой за счет контроля уровней этих газов в крови.

В начальный момент времени стенки легочной ткани находятся в естественном ненапряженном состоянии, уровень кислорода и углекислого газа в крови в пределах нормы. При достижении уровня кислорода или углекислого газа критического значения центральная нервная система посылает сигнал мышцам. Под воздействием мышц внутренняя камера на вдохе расширяется, неподвижный в начальный момент времени воздух на входе в трахею приходит в движение (из области высокого давления в область низкого давления). Попадая в легкие, газовая смесь начинает распространяться в пористой среде. Газообмен происходит через альвеолярно-капиллярную мембрану посредством диффузии вещества из области с высокой концентрацией в область с низкой концентрацией. Альвеолярно-капиллярная мембрана обладает различной диффузионной способностью для разных веществ. После достижения максимального растяжения

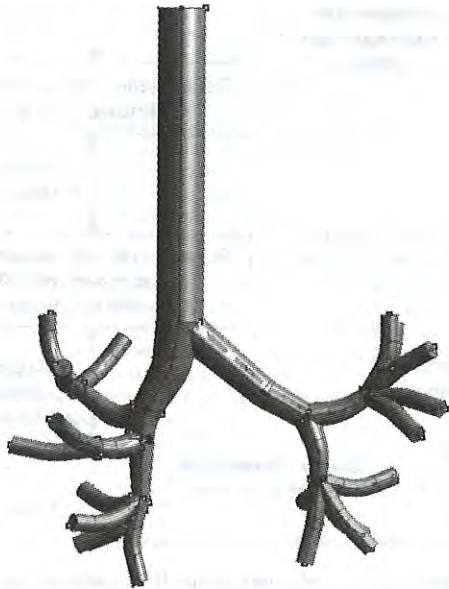


Рис. 2. Трехмерная геометрия воздухоносных путей (фронтальная плоскость, вид спереди).

стенок легких происходит задержка дыхания, пока кровь не насытится кислородом (достигнет оптимального уровня), и при помощи сжатия стенок происходит выдох. Один цикл дыхания (вдох – выдох) у человека в среднем занимает 4 с.

Структурные нарушения дыхательной системы, обусловленные естественными процессами и негативным действием факторов среды обитания, проявляются в снижении функциональности альвеолярно-капиллярной мембраны, которая в свою очередь ухудшает газообмен (снижая диффузионную способность альвеолярно-капиллярной мембраны).

Математическая модель дыхательной системы состоит из трех взаимосвязанных подмоделей: подмодель движения воздуха в крупных воздухоносных путях; подмодель распространения воздуха в деформируемой насыщенной пористой среде легких; подмодель газообмена через биологическую мембрану.

Схема взаимодействия подмоделей дыхательной системы между собой приведена на рис. 1. На входе в модель задаются параметры окружающей среды. На выходе из модели получаем концентрации веществ в крови и выдыхаемом воздухе. Стрелками отмечены связи между подмоделями. Выходные данные из одной подмодели являются входными данными в другую.

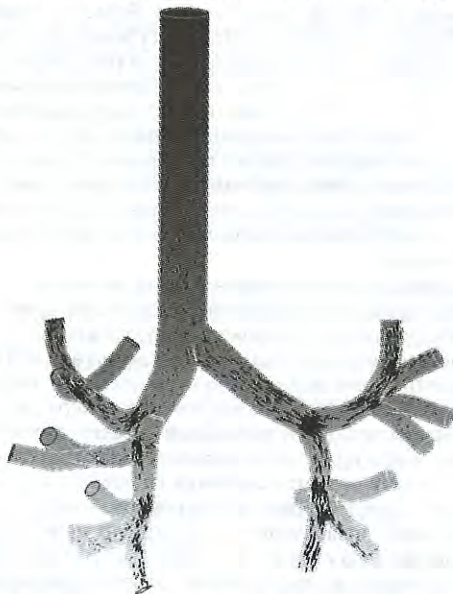


Рис. 3. Поле вектора скорости на входе (фронтальная плоскость, вид спереди).

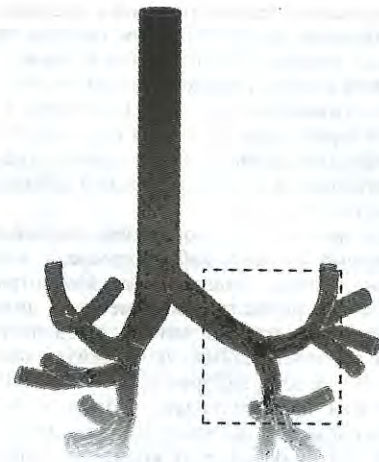


Рис. 4. Поле вектора скорости на выдохе (фронтальная плоскость, вид спереди).

Полная математическая модель дыхательной системы человека является многоплановой и требует соответствующей степени разработанности подмодели дыхательной системы на «макроуровне» и подмодели «мезоуровня» – крупных воздухоносных путей, легких, альвеолярно-капиллярной мембраны, что в совокупности представляет достаточно объемную проблему. В данной статье рассмотрен фрагмент работы, посвященный одной из подзадач – трехмерному моделированию процесса течения в крупных воздухоносных путях человека, так как данный участок дыхательной системы имеет сложную ассиметричную геометрию и свои особенности потока воздуха, которые необходимо учитывать при моделировании дыхательной системы. Дальнейшее развитие модели «мезоуровня» предполагает совместное решение задач газовой динамики в крупных бронхах, деформирования пористой среды легких и всасывания токсических веществ в кровеносную систему.

На основе данных медицинских атласов была воссоздана трехмерная геометрия первых четырех генераций нижних дыхательных путей, начиная с трахеи [17]. С атмосферой граничит один вход (трахея), с легкими – 20 (в верхней доле правого легкого – 3, в средней – 2, нижней – 5; в верхней и нижней долях левого легкого – по 5). На рис. 2 представлена построенная трехмерная геометрия воздухоносных путей в фронтальной плоскости.

С использованием программного продукта ANSYS Fluent выполнен расчет течения воздуха в крупных воздухоносных путях. Расчет проводился для двух сценариев (вдох и выдох). В качестве граничных условий были заданы показатели давления на входе и выходе. Получены параметры течения воздуха на вдохе и выдохе. На рис. 3 и 4 представлены поля вектора скорости перемещений.

По мере уменьшения размера воздухоносных путей уменьшаются скорости течения. Это обусловлено тем, что суммарная площадь сечений на входе в легкие больше площади поперечного сечения трахеи. В местах сужения и ветвления наблюдается

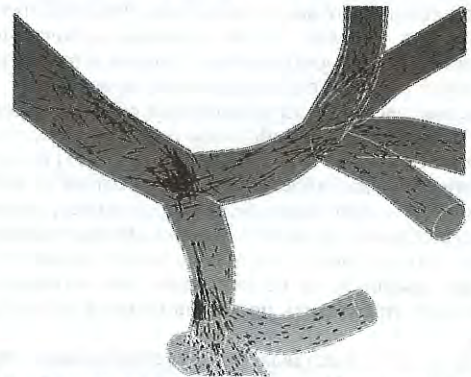


Рис. 5. Поле вектора скорости на выдохе (фронтальная плоскость, вид спереди) (укрупненный фрагмент, отмеченный на рис. 4).

увеличение скоростей течения воздуха и возникновение завихренности течения (рис. 5).

Таким образом, разработанная математическая модель дыхательной системы человека является подмоделью «мезоуровня» многоуровневой модели человеческого организма. Дыхательная система смоделирована тремя взаимосвязанными подмоделями, описывающими процесс дыхания совокупностью синхронизированных процессов газовой динамики в системе бронхов, газовой динамики в деформируемой насыщенной пористой среде и диффузии. На данном этапе с использованием программного продукта ANSYS Fluent выполнен расчет течения воздуха при вдохе и выдохе в первых четырех генерациях крупных воздухоносных путей, начиная с трахеи. Дальнейшее развитие модели предполагает совместное решение задач деформации легких, газодинамики в дыхательных путях человека и всасывания химических веществ в кровеносную систему. Рассмотренные подходы могут быть применены для задач оценки риска здоровью при ингаляционной экспозиции химических веществ.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Литература (п.п. 6, 10–11, 13–16 см. References)

1. Жолдакова З.И., Рахманин Ю.А., Сеницына О.О. *Комплексное действие веществ. Гигиеническая оценка и обоснование региональных нормативов*. М.; 2006.
2. Зайцева Н.В., Трусов П.В., Шур П.З., Кирьянов Д.А., Чигвинцев В.М., Цинкер М.Ю. Методические подходы к оценке риска воздействия разнородных факторов среды обитания на здоровье населения на основе эволюционных моделей. *Анализ риска здоровью*. 2013; 1: 15–23.
3. Петров И.Б. Математическое моделирование в медицине и биологии на основе моделей механики сплошных сред. *Труды Московского физико-технического института*. 2009; 1(1): 5–16.
4. Бочаров Г.А., Черешнев В.А., Лузянина Т.Б., Чигвинцев Е.А., Людеви́г Б. Математические технологии анализа клеточных факторов развития иммунных реакций. *Технологии живых систем*. 2009; 6(7): 4–15.
5. Трусов П.В., Зайцева Н.В., Кирьянов Д.А., Камалтдинов М.Р., Цинкер М.Ю., Чигвинцев В.М. и др. Математическая модель эволюции функциональных нарушений в организме человека с учетом внешнесредовых факторов. *Математическая биология и биоинформатика*. 2012; 2: 589–610. Available at: http://www.matbio.org/2012/Trusov_7_589.pdf
6. Камалтдинов М.Р., Кирьянов Д.А. Применение рекуррентных соотношений для оценки интегрального риска здоровью населения. *Здоровье семьи-21 век*. 2011; 3. Available at: <http://www.fh-21.perm.ru/download/2011-3-6.pdf>
7. Цинкер М.Ю. Математическая модель дыхательной системы человека. В кн.: *Биомеханика-2014: материалы XI Всероссийской конференции с международным участием и школы-семинара для молодых ученых. (Пермь, 1–4 декабря 2014)*. Пермь; 2014; 255–8.
8. Калетина Н.И., ред. *Токсикологическая химия. Метаболизм и анализ токсикантов: учебное пособие*. М.: ГЭОТАР-Медиа; 2008.
9. Кириллова И.В., Грамакова А.А., Белова Ю.А., Челнокова Н.О. Трехмерное моделирование трахеобронхиального дерева. В кн.: Усанов Д.А., ред. *Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2009: материалы ежегодной Всероссийской научной школы-семинара*. Саратов: Издательство Саратовского университета; 2009: 54–9.
10. Вейбель Э.Р. *Морфометрия легких человека*. М.: Медицина; 1970.
11. Zholdakova Z.I., Rakhmanin Yu.A., Sinitsyna O.O. *Complex Action of Substances. Hygienic Assessment and Justification of Regional Standards [Kompleksnoe deystvie veshchestv. Gigenicheskaya otsenka i obosnovanie regional'nykh normativov]*. Moscow; 2006. (in Russian)
12. Zaytseva N.V., Trusov P.V., Shur P.Z., Kir'yanov D.A., Chigvintsev V.M., Tsinker M.Yu. Methodological approaches to the assessment of risk of diverse environmental factors exposure to public health based on evolutionary models. *Analiz riska zdorov'yu*. 2013; 1: 15–23. (in Russian)
13. Petrov I.B. Mathematical modeling in medicine and biology on the basis of models of mechanics of continua. *Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta*. 2009; 1(1): 5–16. (in Russian)
14. Bocharov G.A., Chereshnev V.A., Luzyanina T.B., Chiglintsev E.A., Lyudevig B. Mathematical technologies for the analysis of kinetic factors in the development of immune responses. *Tekhnologii zhivyykh sistem*. 2009; 6(7): 4–15. (in Russian)
15. Trusov P.V., Zaytseva N.V., Kir'yanov D.A., Kamaltdinov M.R., Tsinker M.Yu., Chigvintsev V.M. et al. A mathematical model of the evolution of functional disorders in humans with regard to environmental factors. *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika*. 2012; 2: 589–610. Available at: http://www.matbio.org/2012/Trusov_7_589.pdf (in Russian)
16. Zaitseva N.V., Kiryanov D.A., Lanin D.V., Chigvintsev V.M. A mathematical model of the immune and neuroendocrine systems mutual regulation under the technogenic chemical factors impact. *Comput. Math. Methods Med*. 2014; 2014: 492489. Available at: <http://www.hindawi.com/journals/cmmm/2014/492489/>
17. Kamaltdinov M.R., Kir'yanov D.A. The use of recurrence relations for the assessment of the integral public health risk. *Zdorov'e sem'i – 21 vek*. 2011; 3. Available at: <http://www.fh-21.perm.ru/download/2011-3-6.pdf> (in Russian)
18. Tsinker M.Yu. Mathematical model of the human respiratory system. In: *Biomechanics-2014: Proceedings of XI All-Russian Conference with International Participation and School-seminar for Young Scientists. (Perm, 1-4 December 2014) [Biomekhanika-2014: materialy XI Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem i shkoly-seminara dlya molodykh uchenyykh. (Perm', 1-4 dekabrya 2014)]*. Perm'; 2014; 255–8. (in Russian)
19. Kaletina N.I., ed. *Toxicological Chemistry. Metabolism and Analysis of Toxicants: educational book [Toksikologicheskaya khimiya. Metabolizm i analiz toksikantov: uchebnoe posobie]*. Moscow: GEOTAR-Media; 2008. (in Russian)
20. Ben-Tal A. Simplified models for gas exchange in the human lungs. *J. Theor. Biol.* 2006; 238 (2): 474–95.
21. Benallal H., Beck K.C., Johnson B.D., Busso T. Assessment of cardiac output from a tidally ventilated homogeneous lung model. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2005; 95(2–3): 153–62.
22. Kirillova I.V., Gramakova A.A., Belova Yu.A., Chelnokova N.O. Three-dimensional modeling of the tracheobronchial tree. In: Usanov D.A., ed. *Methods of Computer Diagnostics in Biology and Medicine-2009: Proceedings of the Annual All-Russian Scientific School-Seminar [Metody komp'yuternoy diagnostiki v biologii i meditsine – 2009: materialy ezhegodnoy Vserossiyskoy nauchnoy shkoly-seminara]*. Saratov: Izdatel'stvo Saratovskogo universiteta; 2009: 54–9. (in Russian)
23. Fomin V.M., Ganimedov V.L., Mel'nikov M.N., Muchnaya M.I., Sadovskii A.S., Shepelenko V.I. Numerical modeling of the air flow in the human nasal cavity with simulation of application of the clinical method of active anterior rhinomanometry. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2012; 53(1): 49–55.
24. Lambert A.R. *Regional deposition of particles in an image-based airway model: CFD simulation and left-right lung ventilation asymmetry*: MS (Master of science) thesis. University of Iowa; 2010.
25. Wall W.A., Rabczuk T. Fluid structure interaction in lower airways of CT-based lung geometries. *Int. J. Numer. Methods Fluids*. 2008; 57: 653–75.
26. Kleinstreuer C., Zhang Z., Li Z., Roberts W.L., Rojas C. A new methodology for targeting drug-aerosols in the human respiratory system. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2008; 51(23–24): 5578–89.
27. Veybel' E.R. *Morphometry of the Human Lung [Morfometriya legkikh cheloveka]*. Moscow: Meditsina; 1970. (in Russian)