

// Проблемы эндокринологии. — 2012. — № 1. — Т. 58. — С. 23–28.

2. Зборовский А.Б. Эпидемиология и факторы риска развития остеопороза в Волгоградской области / А.Б. Зборовский, Б.В. Заводовский, Л.Е. Сивордова, Саад Халим Рамез, В.А. Лапина, И.А. Зборовская // Вестник Волгоградского гос. мед. ун-та. — 2008. — №3. — С. 12–14.

3. Остеопороз. Клинические рекомендации // Под ред. проф. Л.И. Беневоленской и проф. О.М. Лесняк. — М. «Геотар-Медиа», 2009. — 171 С.

4. Струков В.И., Джоунс О.В., Крутяков Е.Н., Елистратов Г.К. Способ профилактики и лечения остеопороза и переломов костей и препарат для профилактики и лечения остеопороза и переломов костей. Патент на изобретение №2498811. Приоритет изобретения от 19.04.2012 г.

REFERENCES

1. Dreval' A.V., Marchenkova L.A., Grigor'eva E.A. Evaluating quality of climacteric osteoporosis diagnosis in Moscow region, according to patients' polling data // Problemy endokrinologii. — 2012. — 1. — Vol 58. — P. 23–28 (in Russian).

2. Zborovskiy A.B. Epidemiology and risk factors of osteoporosis in Volgograd region. In: A.B. Zborovskiy, B.V. Zavadovskiy, L.E. Sivordova, Saad Khalim Ramez, V.A. Lapina, I.A. Zborovskaya // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta. — 2008. — 3. — P. 12–14 (in Russian).

3. L.I. Benevolenskaya, O.M. Lesnyak, eds. Osteoporosis. Clinical recommendations. — M. «Geotar-Media», 2009. — 171 p. (in Russian).

4. Strukov V.I., Dzshouns O.V., Krutyakov E.N., Elistratov G.K. Method of prevention and treatment of osteoporosis and bone fractures, and medication for prevention and treatment of osteoporosis and bone fractures. Patent RF №2498811. Priority of invention on 19/04/2012 (in Russian)

5. Gunther C. et al. Beneficial Effect of PTH on Spine BMD and Microarchitecture (TBS) Parameters in Postmenopausal Women with Osteoporosis. A 2-Year Study // Osteoporosis Int. — 2012. — Vol. 23. — Suppl. 9 (2). — S. 85–386.

6. Kalinchenko S., Vishnevskiy E.L., Koval A.N., Mskhalaya GJ, Saad F. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18570056> // The Aging Male. — 2008. — Vol. 11. — Suppl. 2. — P. 57–61. doi: 10.1080/13685530801953994.

7. Leslie W.D., Kanis J.) Lumbar spine TBS is a FRAX independent risk factor for fracture. The Manitoba BMD Cohort. ISCD // ISCD Annual meeting 2013. Tampa, Florida.

8. Zborovskaya I.A., Zborovsky A.B., Lapina V.A., Sivordova L.E., Ryachev A.V., Zavadovsky B.V Application of strontium ranelate in treatment of osteoporosis in women with osteoarthritis // Ann Rheum Dis. — 2009. — Vol. 68 (Suppl 3): 755.

Поступила 01.06.2015

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Заводовский Борис Валерьевич (Zavadovsky B.V.),

зав. лаб. методов лечения и профилактики заболеваний суставов ФГБНУ «НИИ «КиЭР», д-р мед. наук, проф. E-mail: pebma@pebma.ru.

Сивордова Лариса Евгеньевна (Seewordova L.E.),

вед. науч. сотр. лаб. методов лечения и профилактики заболеваний суставов ФГБНУ «НИИ «КиЭР», канд. мед. наук. E-mail: seeword@mail.ru.

Полякова Юлия Васильевна (Polyakova Yu.V.),

науч. сотр. лаб. методов лечения и профилактики заболеваний суставов ФГБНУ «НИИ «КиЭР», E-mail: polykoj@mail.ru.

Симакова Екатерина Станиславовна (Simakova E.S.),

мл. науч. сотр. лаб. методов лечения и профилактики заболеваний суставов ФГБНУ «НИИ «КиЭР», канд. мед. наук. E-mail: pebma@mail.ru.

Кравцов Василий Игоревич (Kravtsov V.I.),

мл. науч. сотр. лаб. методов лечения и профилактики заболеваний суставов ФГБНУ «НИИ «КиЭР», E-mail: pebma@mail.ru.

Фофанова Нина Алексеевна (Fofanova N.A.),

доц. каф. госпитальной терапии ГБОУ ВПО «Волгоградский гос. мед. ун-т» Минздрава России (400131, Волгоград, пл. Павших борцов, 1). e-mail: pebma@mail.ru.

УДК 613.633

Мухаметзанов И.Т.¹, Зарипов Ш.Х.¹, Фатхутдинова Л.М.², Гриншпун С.А.³

ОСАЖДЕНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ДЫХАТЕЛЬНОМ ТРАКТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

¹ФГАОУ ВО «Казанский федеральный университет», Кремлевская ул., 18, Казань, Россия, 420008

²ФГБОУ ВО «Казанский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения РФ, Бутлерова ул., д. 49, Казань, Россия, 420012

³Center for Health — Related Aerosol Studies, University of Cincinnati, Panzeca Way 160, U.S.A., Box 670056

Предложен метод оценки количества оседающей полидисперсной взвеси в отделах дыхательного тракта человека при использовании средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД). Метод включает в себя расчет

улавливания частиц СИЗОД и их осаждения в легких. Для распределения по размерам концентраций взвешенных частиц диоксида титана TiO_2 в производственной среде рассчитано число оседающих частиц при свободном дыхании и дыхании через герметично и негерметично закрепленные респираторы.

Установлено, что больше половины числа частиц размером менее 100 нм оседает в альвеолярной зоне и лишь около одной шестой — в верхних дыхательных путях. Количество частиц в диапазоне 100–1000 нм, оседающих в верхних дыхательных путях и альвеолярной зоне, примерно одинаково. Показано, что зазоры между респиратором и лицом относительной площадью ~0,1% приводят к уменьшению коэффициента защиты в 3,5 раза для высокодисперсных и почти в 48 раз для частиц с размерами выше 100 нм частиц. Эти данные свидетельствуют о необходимости включения в декларируемые показатели защиты типовых СИЗОД поправки, учитывающей снижение их эффективности в условиях реальной эксплуатации.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15–01–06135, 16–51–10024, Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК–6235.2015.1 и Программы повышения конкурентоспособности Казанского Федерального Университета.

Ключевые слова: взвешенные частицы; дыхательные пути; математическая модель; СИЗОД; пылевая экспозиция

Mukhametzanov I.T.¹, Zariyov S.K.¹, Fatkhutdinova L.M.², Grinshpun S.A.³ **Precipitation of low-dispersion dust particles in respiratory tract by individual protective means usage**

¹Kazan Federal University, str. Kremlyovskaya, 35, Kazan, Russia, 420008

²Kazan State Medical University, str. Tovaricheskaya, 5, Kazan, Russia, 420097

³Department of Environmental Health, Center for Health Related Aerosol Studies, University of Cincinnati, USA

The authors suggested a method to evaluate quantity of settled polydispersed suspension in human respiratory tract, due to individual protective means of respiratory organs. The method includes calculation of the particles collection and their precipitation in lungs. To disperse suspended titanium dioxide particles by dimensions in occupational environment, the authors calculated number of precipitated particles in free breathing, and in breathing through hermetically and nonhermetically placed respirators.

Findings are that over a half of particles measured under 100 nm precipitates in alveolar area and only one sixth of them — in upper respiratory tract. Numbers of the particles measured 100–1000 nm, precipitating in upper respiratory tract and alveolar area, are nearly equal. According to the authors, gaps with relative square near 0,1% between respirator and face result in lower protection coefficient in 3,5 times for highly dispersed particles, and nearly in 48 times for the particles measured over 100 nm. These data necessitate declared protection parameters of individual protective means for respiratory organs to be added by amendment considering its lower efficiency in real conditions.

The work was done with support of grants by RFFI N 15–01–06135, 16–51–10024, President of Russian Federation for governmental support of young Russian scientists МК–6235.2015.1 and Program of competitiveness increase in Kazan Federal University.

Key words: suspended particles; respiratory tract; mathematic model; individual protective means for respiratory organs; dust exposure

Вопросы оценки доз взвешенных частиц, оседающих в дыхательной системе человека, остаются актуальными для современной экологии и гигиены труда. При оценке риска формирования пылевой патологии важным этапом является оценка реальной экспозиции взвешенных в рабочей зоне частиц. Концентрация взвешенных частиц внутри дыхательного тракта зависит от размера частиц, условий дыхания и использования СИЗОД и может существенно отличаться от концентрации частиц в окружающей воздушной среде. Кроме того, в рабочих зонах с повышенной концентрацией аэрозольных частиц, как правило, применяются различные типы СИЗОД (респираторы, маски). Поэтому при расчете концентрации частиц в дыхательной системе человека следует также учитывать улавливание взвеси СИЗОД.

В работах [5,9] предложен комбинированный метод к оценке доз оседающих частиц в различных отделах дыхательных путей с учетом сценариев дыхания

человека и неоднородного распределения аэрозольных частиц по размерам в помещении и атмосферном воздухе. В настоящей работе предлагается расширить указанный метод для учета влияния защитных свойств СИЗОД, которые определяются в первую очередь характеристиками пористого фильтровального материала. Вместе с тем в обзорной статье [1] был сделан вывод о несоответствии декларируемых коэффициентов защиты современных СИЗОД обеспечиваемым в производственных условиях во время работы. Основной причиной этого несоответствия является проникновение нефiltrованного воздуха через зазоры между защитной маской и лицом. Зазоры могут возникать из — за неправильного подбора масок или деформации мест соприкосновения маски и лица во время работы. Значительное проникновение частиц через такие зазоры обнаружено, например, в экспериментальном исследовании [3,8]. Проведенные расчетные исследования показали, что, начиная с от-

носительной площади зазора $S_f/S_f \sim 0,1\%$ (S_f — площадь зазора, S_f — площадь внутренней поверхности фильтрующего слоя), негерметично закрепленный респиратор класса N95 не обеспечивает объявленной степени защиты. С дальнейшим ростом площади зазора поток частиц через зазор может сравняться с потоком частиц, идущим на фильтровальный слой, защитная роль которого может при этом свестись к нулю. Возникает вопрос, как появление зазоров между лицом и маской повлияет на число оседающих в дыхательных путях человека частиц?

Цель исследования — изучение осаждения взвешенных частиц в различных отделах дыхательного тракта при использовании средств индивидуальной защиты с нарушениями герметичности их крепления для качественной и количественной оценки реальных экспозиций, а также расчета пылевых нагрузок для ограничения риска пылевой патологии.

Материалы и методы исследования. В работе предлагается комбинированный метод оценки числа оседающих частиц в дыхательном тракте человека для неоднородного распределения частиц по размерам при использовании СИЗОД. Метод включает в себя математическую модель дыхания человека с защитной маской и расчет фракций оседающих частиц в различных отделах дыхательной системы по программе MPPD, реализующей апробированные модели осаждения частиц [4,8]. Для распределения взвеси диоксида титана в производственной среде проведены расчеты числа частиц, оседающих в различных отделах легких при отсутствии СИЗОД, при использовании хорошо облегающего лицо респиратора и при дыхании через респиратор с зазором между поверхностью лица и краем респиратора.

Для расчета количественной дозы $D_i(d_p)$ частиц (число частиц), оседающих в i -м отделе дыхательного тракта человека в запыленной воздушной среде за рабочую смену, используется формула вида [5]:

$$D_i(d_p) = C_0(d_p) \times F_i(d_p) \times V \times TIL(d_p) \quad (1)$$

где d_p — диаметр частицы, $C_0(d_p)$ — распределение числовой концентрации частиц вдыхаемой взвеси по размерам на рабочем месте, $F_i(d_p)$ — фракция частиц, оседающих в i -м отделе дыхательного тракта человека, V — объем вдыхаемого воздуха. В ф-ле (1) вводится новый множитель $TIL(d_p)$ (Total Inward Leakage — коэффициент пропускания), учитывающий уменьшение количества вдыхаемых частиц в фильтровальном слое респиратора или маски [7]. Величина $TIL(d_p)$ для масок различных типов при наличии зазоров экспериментально исследовалась в работах [2,8,10]. Было показано, что модель сферического пробоотборника с пористым слоем, улавливающим частицы за счет механизмов захвата, диффузии и электростатического осаждения, удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными [10]. Размеры радиусов сферы и ротового отверстия в модели сферического пробоотборника приняты в соот-

ветствии с размерами головы и ротового отверстия манекена [6].

Площадь поверхности фильтра респиратора S_f принята равной $0,018 \text{ м}^2$, что соответствует площади фильтров респираторов европейского FFP2 и американского N95 FFR классов. Коэффициент пропускания η_f фильтра респиратора соответствует респиратору класса N95. В [8] получены зависимости TIL от диаметра частиц для различных относительных площадей зазоров S_f/S_f , которые и были использованы для расчетов по ф-ле (1).

В качестве исходного распределения концентрации $C_0(d_p)$ вдыхаемой пыли принято распределение концентрации частиц по размерам для диоксида титана TiO_2 [11]. Диоксид титана активно используется в пищевой, медицинской и микробиологической промышленности. Распределение получено из измерений в рабочей зоне на высоте 1 м и расстоянии 4 м от источника на заводе, производящим нанопорошок TiO_2 . Для расчета относительной фракции взвешенных частиц, оседающих в различных отделах дыхательной системы человека, использовалась программа MPPD (Multiple — Path Particle Dosimetry V2.11) [4]. Выбрана симметричная модель дыхательных путей легких человека «Yeh — Schum symmetric» [12]. Анализировался сценарий дыхания с равным временем вдоха и выдоха при частоте и минутном объеме дыхания 24 мин^{-1} и 30 л/мин соответственно. Предполагалось, что между вдохом и выдохом отсутствует пауза. Значения величин FRC (functional residual capacity — объем легкого в конце нормального выдоха) и URT volume (upper respiratory tract — объем дыхательных путей от ноздри до глотки) приняты равными 3300 мл и 50 мл соответственно. Плотность диоксида титана TiO_2 принята равной $4,235 \text{ г/см}^3$. Рассчитываются количественные дозы D_1, D_2, D_3 оседающих частиц в трех областях соответственно: верхние дыхательные пути (носовая полость, носоглотка, носоглоточные пути), нижние дыхательные пути (трахея, бронхи, бронхиолы), альвеолярная зона, а также суммарное количество $D = D_1 + D_2 + D_3$.

Результаты исследования и их обсуждение. На основе предложенного метода рассчитаны число частиц, оседающих в трех областях дыхательных путей человека в течение 8 часов, и их сумма (полное осаждение). При свободном дыхании максимальное количество оседающих частиц в верхних дыхательных путях наблюдается в диапазоне размеров $100\text{--}200 \text{ нм}$ и составляет около 2×10^{10} частиц (рис. а). При использовании герметично закрепленного респиратора число частиц, оседающих в верхних дыхательных путях, падает примерно на два порядка. Меняется также характер зависимости числовой дозы оседающих частиц от их размера. Максимум зависимости $D_1(d_p)$ приходится на диапазон $30\text{--}120 \text{ нм}$, соответствующий максимуму прохождения частиц через фильтровальный материал [8]. С увеличением размера частиц, начиная с 120 нм , через респиратор проходит меньшее количе-

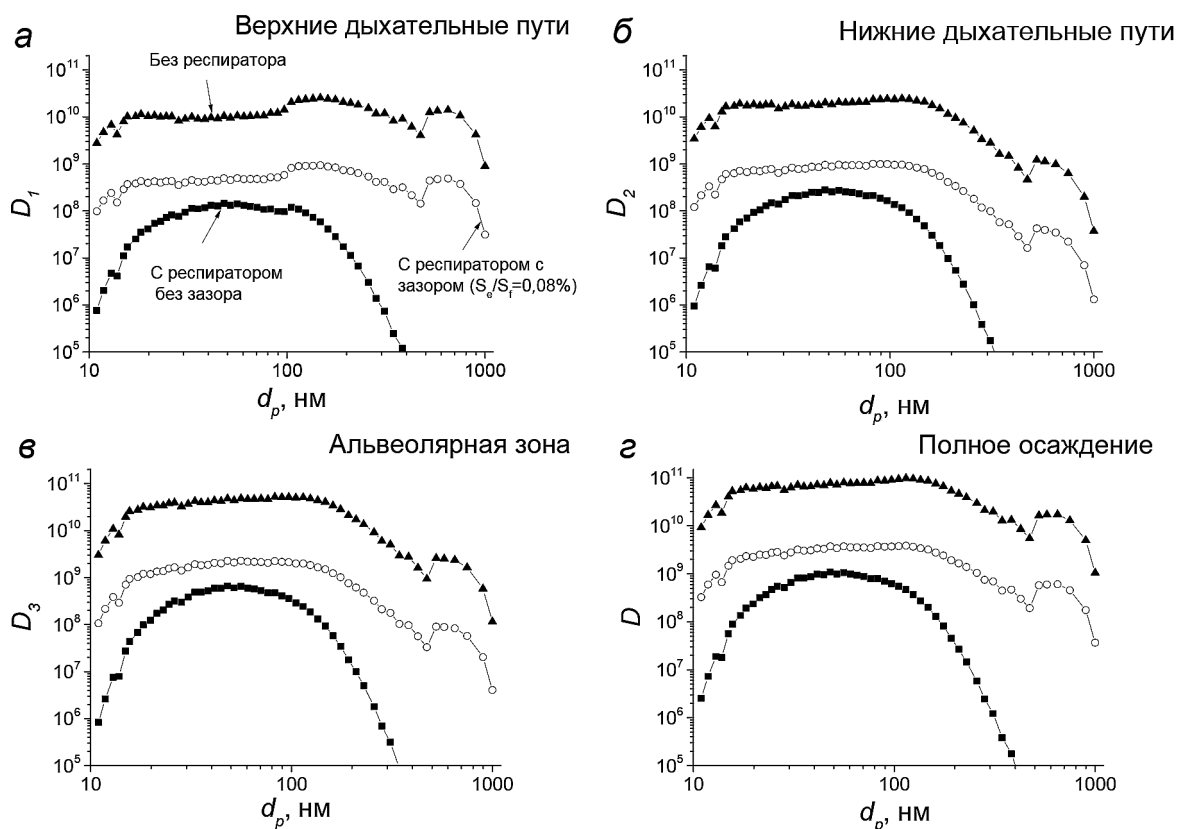


Рис. Зависимости доз D_1 , D_2 , D_3 , D оседающих частиц TiO_2 от диаметра частиц

ство частиц и величина D_1 падает. При использовании плотно облегающего респиратора частицы крупнее 800 нм практически не попадают в дыхательные пути вследствие инерционного улавливания фильтровальным слоем. В области размеров менее 30 нм числовая доза оседающих частиц мала в связи с диффузионным оседанием в пористом фильтровальном слое СИЗОД.

При наличии зазора, площадь S_i которого составляет 0,1% площади S_f внутренней поверхности респиратора, кривая $D_1(d_p)$ по форме повторяет кривую осаждения при свободном дыхании и оказывается между кривыми, полученными для дыхания без респиратора и дыхания через герметично закрепленный респиратор. В этом случае слабо проявляются свойства фильтрующего материала респиратора, так как основное количество частиц проникает в дыхательную систему через зазор.

В нижних дыхательных путях и альвеолярной зоне, как и при полном осаждении, (рис. б–г) поведение кривых $D_i(d_p)$ схоже с описанным выше поведением в верхних дыхательных путях. Наблюдается также высокая эффективность защиты респиратора хорошо подогнанного к лицу и рост числа оседающих частиц при появлении зазора. Суммарное количество оседающих в дыхательной системе частиц для выбранного распределения $C_0(d_p)$ при свободном дыхании колеблется от 6×10^9 до 10^{11} частиц. Максимум осаждения наблюдается для частиц размером 30–180 нм и составляет $D \sim 7\text{--}9 \times 10^{10}$.

В табл. 1 представлены рассчитанные числовые дозы оседающих частиц для различных диапазонов

размеров частиц. При свободном дыхании в рассматриваемой воздушной среде рабочей зоны человека вдыхается около $6,6 \times 10^{12}$ частиц, из которых во всей дыхательной системе оседает $1,87 \times 10^{12}$ высокодисперсных (10–100 нм) и $0,930 \times 10^{12}$ среднедисперсных (100–1000 нм) частиц. Больше половины числа частиц размером менее 100 нм оседает в альвеолярной зоне и лишь около одной шестой в верхних дыхательных путях. Для среднедисперсных частиц примерно одинаковое количество оседает в верхних дыхательных путях и альвеолярной зоне.

Таблица 1

Число оседающих частиц при свободном дыхании (без респиратора)

Область дыхательной системы	Число частиц ($\times 10^9$)		
	10–100 нм	100–1000 нм	10–1000 нм
Полное осаждение	1870	930	2800
Верхние дыхательные пути	280	340	620
Нижние дыхательные пути	510	200	710
Альвеолярная зона	1080	390	1470

В табл. 2 представлены степени уменьшения числа оседающих в дыхательных путях высоко- и среднедисперсных частиц. Использование герметично закрепленного респиратора уменьшает дозу оседающих в дыхательных путях высокодисперсных частиц в ~ 77 раз, а среднедисперсных в ~ 1340 раз. При появлении зазора дозы оседания уменьшаются всего лишь в 21 и

28 раз соответственно. При этом для респиратора с зазором степень уменьшения доз оседающих частиц не сильно отличается для высокодисперсных и среднedisперсных частиц. Таким образом, образование зазоров между респиратором и лицом относительной площади ~0,1% приводит к уменьшению коэффициента защиты в 3,5 раза для высокодисперсных и почти в 48 раз для среднedisперсных частиц.

Таблица 2

Эффективность защиты респиратора

Область дыхательной системы	Степень уменьшения числа оседающих частиц, раз			
	Респиратор без зазора		Респиратор с зазором $S_e/S_f \sim 0,1\%$	
	10–100 нм	100–1000 нм	10–100 нм	100–1000 нм
Полное осаждение	77	1340	21	28
Верхние дыхательные пути	67	1930	21	28
Нижние дыхательные пути	73	1160	21	28
Альвеолярная зона	83	1120	22	28

Предложенный метод может быть использован для оценки реальных экспозиций и расчета пылевых нагрузок при управлении рисками легочных заболеваний в загрязненных рабочих зонах.

Выводы:

1. Предложен метод оценки числа частиц, оседающих в различных отделах дыхательного тракта человека, для неоднородного распределения концентрации по размерам. На примере частиц диоксида титана рассчитано осаждение частиц при свободном дыхании и дыхании через герметично и негерметично закрепленные респираторы.

2. Установлено, что больше половины числа частиц размером менее 100 нм оседает в альвеолярной зоне и лишь около одной шестой — в верхних дыхательных путях. Количество частиц в диапазоне 100–1000 нм, оседающих в верхних дыхательных путях и альвеолярной зоне, примерно одинаково.

3. Показано, что зазоры между респиратором и лицом относительной площади ~0,1% приводят к уменьшению коэффициента защиты в 3,5 раза для высокодисперсных и почти в 48 раз для среднedisперсных частиц. Эти данные свидетельствуют о необходимости включения в декларлируемые показатели защиты типовых СИЗОД поправки, учитывающей снижение их эффективности в условиях реальной эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (см. REFERENCES пп. 2–12)

1. Кириллов В.Ф., Филин А.С., Чиркин А.В. // Токсикол. вестник. — 2014. — Т. 129, № 6. — С. 44–49.

REFERENCES

1. Kirillov V.F., Filin A.S., Chirkin A.V. Toksikologicheskiy Vestnik. — 2014; Vol 129. — 6. — P. 44–49 (in Russian).
2. Chen C.C., Willeke K. // Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 1992. — Vol. 53. — № 9. — P. 533–539.
3. Grinshpun S.A. et al // J. Occup. Environ. Hyg. 2009. — Vol. 6. — № 10. — P. 593–603.
4. <http://www.ara.com/products/mppd.htm>. Multiple — Path Particle Dosimetry Model (MPPD v 2.11).
5. Hussein T. et al // Atmos. Environ. — 2015. — Vol. 106. — P. 402–411.
6. Kennedy N.J., Hinds W. // J. Aerosol Sci. — 2002. — Vol. 33. — № 2. — P. 237–255.
7. Liu B.Y.H. et al // Aerosol Sci. Technol. — 1993. — Vol. 19. — № 1. — P. 15–26.
8. Mukhametzanov I.T. et al // Aerosol Air Qual. Res. — 2016. — Vol. 16. — P. 2428–2437.
9. Oravisiärvi K. et al // J. Aerosol Sci. — 2014. — Vol. 69. — P. 32–47.
10. Rengasamy S., Eimer B.C. // Ann. Occup. Hyg. — 2012. — Vol. 56. — N 5. — P. 568–580.
11. Yang Y. et al // Aerosol Air Qual. Res. — 2012. — Vol. 12. — N 5. — P. 934–940.
12. Yeh H.C., Schum G.M. // Bull. Math. Biol. — 1980. — Vol. 42. — N 3. — P. 461–480.

Поступила 05.04.2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Мухаметзанов Ильнар Тальгатович (Mukhametzanov I.T.),
мл. науч. сотр. Института вычислит. мат. и инф. технологий
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) фед. унт». E-mail:
ilnar.mukhametzanov@mail.ru.

Зарипов Шамиль Хузеевич (Zaripov S.K.),
зав. каф. моделирования экологических систем Института
экологии и природопользования ФГАОУ ВО «Казанский
(Приволжский) фед. ун-т», д-р физ.-мат. E-mail: shamil.
zaripov@gmail.com.

Фатхутдинова Лилия Минвагизовна (Fatkhutdinova L.M.),
зав. каф. гиг., медицины труда ФГБОУ ВО «Казанский
гос. мед. ун-т», д-р мед. наук. E-mail: liliya.fatkhutdinova@
gmail.com.

Гриншпун Сергей Александрович (Grinshpun S.A.),
дир. Центра исследования влияния аэрозолей на здоровье,
Ун-т Цинциннати, США. E-mail: sergey.grinshpun@uc.edu.