

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПАСНЫХ ПРИМЕСЕЙ В ЗАКРЫТОМ ПОМЕЩЕНИИ

*Б.М. Десятков¹, А.И. Бородулин¹, Е.А. Ставский¹, В.А. Шлычков¹,
Г.П. Бакшеева¹, В.В. Золин¹, О.В. Культенко¹, О.В. Пьянков¹,
И.В. Ренау¹, В.Н. Михеев², С.Ф. Докучаева³, Л.К. Иванова³,
Т.В. Каримова³, А.П. Федянин²*

¹ ФГУН ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора, пос. Кольцово
Новосибирской области

² Управление Роспотребнадзора по Новосибирской области,
Новосибирск

³ ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Новосибирской области»,
Новосибирск

Разработана математическая модель распространения опасных примесей в закрытом помещении, позволяющая в зависимости от геометрии помещения, параметров его вентиляции, размещенного в нем оборудования описать в динамике сложный процесс распространения и рассчитать поле концентрации указанных примесей в помещении. Математическим моделированием показано, что через 15 мин после вскрытия конверта с «подозрительным порошком» поле концентрации опасных для человека примесей практически во всем объеме помещения достигает значений, при которых даже кратковременное нахождение человека в помещении может привести к его заражению возбудителями инфекций, являющихся наиболее вероятными для применения террористами, и развитию соответствующих инфекционных заболеваний. Предложенная математическая модель обеспечивает проведение расчетов, направленных на решение прикладных задач обеспечения биологической безопасности населения.

Ключевые слова: математическое моделирование, уравнения гидродинамики, распространение аэрозолей, почтовый биотерроризм.

Among new challenges of terrorists to the civilized world, which have appeared recently, we can point out sending mail containing a “suspicious powder”. The paper describes the results of mathematical simulation of propagation of the concentration of bioaerosols generated at opening an envelope containing a “suspicious powder” indoors in experience. Summarized data of the research demonstrate real threat of infecting people who are in the room at opening mail containing a “suspicious powder”. A mathematical model of spread of dangerous pollutants in a closed room is developed that allows to describe the complex process of spread in dynamics depending on the room geometry and ventilation parameters and equipment installed as well as to calculate the concentration field of the above pollutants in the room. Mathematical modeling showed that 15 min after opening an envelope containing a “suspicious powder” the concentration field of pollutants dangerous for man practically in the whole room volume reaches the values at which even short-term stay of man in the room can result in infection with agents most probably to be used by terrorists, and the development of the corresponding infectious diseases. The proposed mathematical model provides carrying out calculations intended for solution of applied problems of biological safety provision for the population.

Keywords: mathematical modeling, equations of hydrodynamics, distribution of aerosols, mail bioterrorism.

Введение

Среди новых биологических угроз цивилизованному миру, появившихся в последнее время, можно выделить биологический терроризм, включая почтовый биотерроризм [1–5]. Помимо негативного психологического эффекта в слу-

чае, когда порошок в почтовом вложении «нейтрален», отправка корреспонденции с возбудителями особо опасных инфекций представляет собой реальную угрозу заражения для получателя [1–5]. Согласно критериально-рейтинговому подходу академика РАМН А.А. Воробьева оценки вероятности использования 30 видов

бактерий, вирусов и токсинов как потенциальных агентов биологического оружия (БО), патогены были распределены на три группы [6–8, 3]. Классификация, разработанная специалистами Национального института здравоохранения (НИИ) США, также выделяет три категории биологических агентов – возможных кандидатов БО [8, 3]. Указанные данные являются необходимыми для разработки сценариев проведения штабных и практических учений, имитирующих применение БО, а также разработки математических моделей по оценке последствий возможных биотерактов в интересах выработки адекватных ответных решений и принятия мер по ликвидации последствий терактов. В связи с этим определен практический интерес представляет опыт США по проведению подобных учений в 1999–2002 годах [9, 5]. Ряд отечественных исследователей также считает необходимой организацию и проведение подобных учений, а также разработку математических моделей чрезвычайных социально-биологических, техногенных катастроф или событий, которые могут произойти в случае применения того или иного инфекционного агента [10–15], включая инфекции, к которым в популяции отсутствует коллективный иммунитет [16, 17].

Приведенные выше данные обосновывают практическую значимость оценок риска, которому подвергается человек при вскрытии писем, содержащих неизвестный порошок.

Целью данной работы является математическое моделирование распространения в производственном помещении биологического аэрозоля, возникшего при вскрытии почтового конверта, содержащего порошок.

Материалы и методы

В лабораторном помещении, близком по площади и оснащению мебели комнате приема и сортировки корреспонденции почтового отделения (офисному помещению), были произведены опыты, направленные на оценку характеристик аэрозолей, образующихся при вскрытии конверта с «подозрительным порошком». Экспериментальные данные, послужившие в качестве исходных параметров для математического моделирования, представлены в таблице [18]. План помещения с производственной мебелью представлен на рис. 1.

Моделирование поля вектора скорости воздуха в помещении проводили на основе уравнений гидротермодинамики в приближении Буссинеска [19]. Исходные уравнения математической модели были записаны в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad ; \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \quad ; \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad ; \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \quad , \end{aligned} \tag{1}$$

где оси x, y направлены по горизонтали вдоль ребер нижней грани параллелепипеда (см. рис. 1), ось z - вертикально вверх, u, v, w – x, y, z компоненты вектора скорости воздуха, τ_{ij} – компоненты тензора турбулентных напряжений, ρ - плотность воздуха, p – возмущения давления. Компоненты тензора турбулентных напряжений аппроксимировались с помощью гради-

ентно-диффузионного замыкания с использованием гипотезы об изотропности мелкомасштабной турбулентности [20–22].

Для определения поля математического ожидания концентрации бактериальных аэрозолей $c(x, y, z, t)$ внутри помещения было использовано полуэмпирическое уравнение турбулентной диффузии [20]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + (w - w_g) \frac{\partial c}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} K_c \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_c \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_c \frac{\partial c}{\partial z} \end{aligned} \quad (2)$$

где w_g – скорость седиментации частиц; K_c – коэффициент турбулентной диффузии примеси.

С целью упрощения решаемой задачи в расчетах не учитывался теплообмен воздуха с внешней средой за счет теплопроводности через

$$\begin{aligned} u = v = w = 0 & \quad \text{при } (x, y, z) \in G_0 \quad ; \\ \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \quad , \quad p = p_1 & \quad \text{при } (x, y, z) \in G_1 \quad ; \\ \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \quad , \quad p = p_2 & \quad \text{при } (x, y, z) \in G_2 \quad , \end{aligned} \quad (3)$$

где p_1, p_2 – значения давления в воздухонагнетающем и вытяжном вентиляционных люках. Поскольку давление определено с точностью до аддитивной постоянной, можно положить $p_2 = 0$. Тогда величина p_1 будет характеризовать превышение давления над атмосферным за счет наддува. В ходе сопоставления результатов модельных расчетов с экспериментальной базой было найдено значение $p_1 = 6,5$ ГПа.

Перепад давления на входе подбирался так, чтобы обеспечить выполнение условия

$$\iint_{G_1} v dx dz = \iint_{G_2} v dx dz = Q \quad ,$$

где $Q = 0,15 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ – объемная скорость вентиляции.

Граничные условия для математического ожидания концентрации задавались в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial n} = 0 & \quad \text{при } (x, y, z) \in G_0 \quad ; \\ \langle c \rangle = 0 & \quad \text{при } (x, y, z) \in G_1 \quad ; \\ \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial y} = 0 & \quad \text{при } (x, y, z) \in G_2 \quad , \end{aligned} \quad (4)$$

где n – направление нормали к твердым стенкам.

стены и выделение тепла работающими в помещении приборами. Поэтому температура в помещении считалась постоянной, а соответствующее уравнение для температуры не использовалось.

Обозначим G_0 – поверхность твердых стенок (стен, потолка, пола и предметов интерьера), G_1, G_2 – области в плоскости $y = 0$, ограниченные контурами приточного и вытяжного отверстий в стене, соответственно. Граничные условия формулировались следующим образом:

Ввиду того, что вскрытие конверта происходило за время много меньше пятнадцатиминутного периода отбора проб аэрозолей, источник аэрозольных частиц был задан мгновенным. Предполагалось, что в начальный момент времени все частицы были сосредоточены в кубе с ребром 0,5 м, расположенном на столе в месте, где производилось вскрытие конверта. Согласно данным таблицы начальная концентрация частиц была задана равной $7 \cdot 10^7 \text{ КОЕ} \cdot \text{м}^{-3}$ (КОЕ – колониеобразующая единица). Аэродинамический диаметр частиц был равен 17 мкм [18], а скорость седиментации $w_g \approx 0,87 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$.

Уравнения (1), (2) решали методом конечных разностей по переменным x, y, z, t . В области определения вводилась регулярная сетка с основными узлами, расположенными равномерно вдоль осей координат. Дискретизация уравнений проводилась в терминах естественных переменных «скорость–давление» с использованием основных и полужелых узлов. Конечно-разностные аналоги исходных систем были получены из эквивалентной консервативной формы уравнений. Определенная таким образом сеточная структура полей позволяет аппроксимировать уравнения со вторым порядком точности по пространственным переменным. Криволинейные границы учитывались с помощью метода фиктивных областей [23].

Расчетная область представляет собой прямоугольный параллелепипед с ребрами, соот-

Исходные данные для построения математической модели распространения биологического аэрозоля при вскрытии конверта в закрытом помещении

Вид исходного параметра	Наименование параметра	Значения параметров
Физический	Высота расположения отверстий приточно-вытяжной вентиляции от уровня пола	3,65 м
	Диаметр приточного отверстия	0,25 м
	Диаметр вытяжного отверстия	0,30 м
	Расстояние между отверстиями	2,0 м
	Размеры помещения (длина·ширина·высота)	9,2·6,0·4,2 м
	Средняя скорость воздуха в сечении входного отверстия	3,0 м·с ⁻¹
	Средняя скорость воздуха в выходном сечении	2,08 м·с ⁻¹
	Время прошедшее после вскрытия конверта	
		5,0 мин
		15 мин
Биологический	Концентрация бактерий в воздухе в месте вскрытия конверта и в радиусе 1,0 м через 0 мин (КОЕ·м ⁻³), для P ₉₅	(6,96±0,22)·10 ⁷
	Концентрация бактерий в воздухе в месте вскрытия конверта и в радиусе 1,0 м через 5,0 мин (КОЕ·м ⁻³), для P ₉₅	(1,60±0,61)·10 ⁵
	Концентрация бактерий в воздухе в месте вскрытия конверта и в радиусе 1,0 м через 15 мин (КОЕ·м ⁻³), для P ₉₅	(1,83±1,1)·10 ⁵

ветствующими размеру помещения. Число сеточных узлов вдоль осей координат x , y , z было задано равным $128 \times 128 \times 64$, что обеспечивало пространственное разрешение $7,2 \times 4,8 \times 6$ см³. Предметы интерьера (столы, шкафы) были представлены в виде параллелепипедов с непроницаемыми стенками. Предполагалось, что свободное пространство между столешницами и плоскостью пола не оказывает значительного влияния на циркуляцию в комнате и им можно пренебречь.

Для интегрирования по времени системы уравнений (1), (2) был использован неявный метод расщепления [24, 25], аппроксимирующий производные по времени с первым порядком точности. Расчет проводился с шагом $\Delta t = 0,02$ с до получения установившегося режима. В качестве начальных условий принималось состояние покоя. Фактическое время выхода решения на асимптотику составляло около 5 минут.

Результаты и обсуждение

Анализ установившегося течения воздуха показал, что траектории частиц воздуха в по-

мещении имеют многообразную и сложную пространственную конфигурацию. Общим для всех траекторий является только совокупность начальных точек внутри приточного контура G_1 и концевые точки на выпускном контуре G_2 . Основной динамический процесс локализован вблизи вентиляционных отверстий.

Поток воздуха, поступающий в помещение, частично рассеивается турбулентными пульсациями и отражается от потолка. Основная часть воздушной струи ударяется о противоположную стену и образует дивергентный поток растекания, следуя вдоль стен и пола и формируя циркуляционную структуру. Оказавшись в пределах циркуляции, воздушная частица может довольно долго не покидать ее и двигаться по неправильной незамкнутой спирали. Количество спиральных оборотов частицы зависит от ее начального положения на входном сечении и может составлять до нескольких десятков.

Траектории, исходящие из других точек на контуре G_1 , могут оказаться вне локальной циркуляции и попадать в дальнюю слабоактивную часть помещения. В целом совокупность траек-

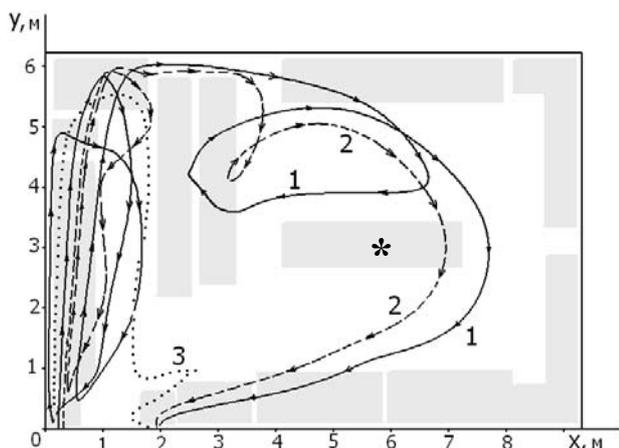


Рис. 1. Пример рассчитанных траекторий частиц воздуха, исходящих из нагнетающего вентиляционного отверстия в горизонтальной проекции на уровне $z = 3,6$ м. Звездочкой отмечена зона вскрытия конверта

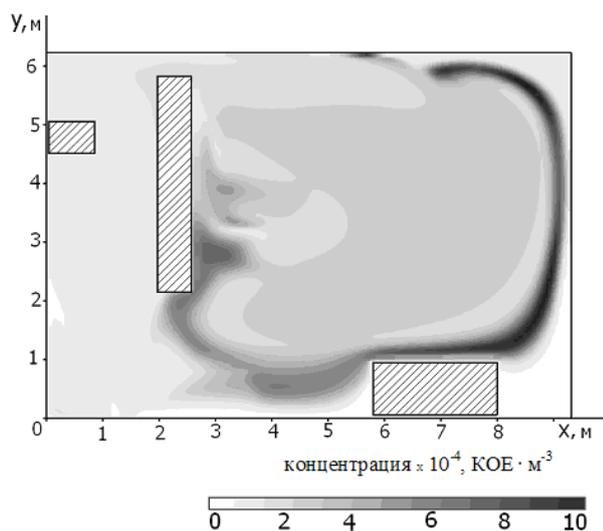


Рис. 2. Поле концентрации примеси в момент $t = 15$ мин на уровне $z = 1,4$ м

торий носит неупорядоченный и, в некотором смысле, запутанный характер.

На рис. 1 показаны плоские проекции траекторий воздушных частиц на горизонтальную плоскость $z = 3,65$ м – высота вентиляционных отверстий (кривые 1–3). Серой заливкой показаны предметы интерьера. Кривая 1 описывает траекторию этих частиц, совершивших вертикальный оборот по маршруту «потолок–стена–пол–потолок» и после этого вышедших из циркуляции. Далее воздушная аэрозольная частица смещается в глубину помещения, где делает петлеобразный разворот и направляется к выходному вентиляционному отверстию. Пространственная структура траектории 2 качественно близка к описанной. Точечная линия 3

отражает движение частицы, не попавшей в спиральный цикл и по настильной траектории уходящей к выходу. Излом кривой 3 вблизи вытяжки отвечает участку подъема траектории к потолку. Отметим, что начальные координаты трех помеченных воздушных частиц на входе отличаются друг от друга на малую величину, не превышающую 3–7 см.

На рис. 2 представлено рассчитанное поле концентрации аэрозоля на высоте вскрытия конверта $z = 1,4$ м, полученное через 15 мин развития процесса. Не смотря на то, что решение задачи переноса загрязнителя проводилось для монодисперсного порошка, а фактический состав примеси был полидисперсным [18], рассчитанное поле концентрации находится в удовлетворительном согласии с экспериментальными значениями, представленными в таблице. Обращает на себя внимание неоднородность полученного поля концентрации, а также то, что в помещении не осталось зон, свободных от биологического аэрозоля. При этом концентрация частиц биологического аэрозоля в воздухе помещения через 15 мин после вскрытия конверта достигла значений, при которых даже кратковременное нахождение человека в помещении с учетом малых величин заражающих доз для человека ряда возбудителей ООИ (особо опасные инфекции), являющихся наиболее вероятными для применения террористами [26, 27], может привести к его заражению и развитию ООИ. Полученные результаты показывают, что рабочие места для вскрытия «подозрительных» почтовых отправлений требуют при их организации дополнительных исследований, направленных на установление оптимальных и более безопасных условий работы.

Выводы

1. Разработана математическая модель распространения опасных примесей в закрытом помещении, позволяющая в зависимости от геометрии помещения, параметров его вентиляции, размещенного в нем оборудования описать в динамике сложный процесс распространения и рассчитать поле концентрации указанных примесей в помещении. Предложенная математическая модель обеспечивает проведение расчетов, направленных на решение прикладных задач обеспечения биологической безопасности населения.

2. Математическим моделированием показано, что через 15 мин после вскрытия конверта

с «подозрительным порошком» поле концентрации опасных для человека примесей практически во всем объеме помещения достигает значений, при которых даже кратковременное нахождение человека в помещении может привести к его заражению возбудителями инфекций, являющихся наиболее вероятными для применения террористами, и развитию соответствующих инфекционных заболеваний.

Список литературы

1. Кондрик, Е.К., Волков, В.Я., Кавызина, Л.И., Старицын, Н.А., Ураков, Н.Н. Аналитическое обоснование концепции биологической безопасности. – М., 2003. – 64 с.
2. Липницкий, А.В., Алексеев, В.В. Некоторые задачи противодействия биотерроризму // Противочумные учреждения России и их роль в обеспечении эпидемиологического благополучия населения страны: Материалы конференции, посвященной 70-летию Противочумного центра. – М.: РОО ЛО «Сокольники», 2004. – С. 283–285.
3. Черкасский, Б.Л., Бакулов, И.А., Пчелинцев, С.Ю. Зоонозы и безопасность // Вестн. РАМН. – 2002. – № 10. – С. 30–33.
4. Tucker, Jonathan B. Historical Trends Related to Bioterrorism: An Empirical Analysis // Emerg. Infect. Diseases. – 1999. – Vol. 5, No. 4. – P. 498–504.
5. O'Toole, T., Mair, M., Inglesby, T.V. Shining light on “dark winter” // Clin. Infect. Diseases. – 2002. – Vol. 34, No. 7. – P. 972–983.
6. Воробьев, А.А. Оценка вероятности использования биоагентов в качестве биологического оружия // Эпидемиол. и инфекц. болезни. – 2001. – № 6. – С. 54–56.
7. Воробьев, А.А. Современные проблемы микробиологической безопасности // Вестн. РАМН. – 2002. – № 10. – С. 9–12.
8. Онищенко, Г.Г., Пальцев, М.А., Зверев, В.В. и др. Биологическая безопасность. – М.: ОАО «Издательство «Медицина», 2006. – С. 304.
9. O'Toole, T. Smallpox; an attack scenario // Emerg. Infect. Diseases. – 1999. – Vol. 5, No. 4. – P. 540–546.
10. Аграновский, И.Е., Сергеев, А.Н., Пьянков, О.Е., Петрищенко, В.А., Агафонов, А.П., Игнатьев, Г.М., Бородулин, А.И., Сафатов, А.С. Тестирование нового персонального пробоотборника для обнаружения жизнеспособных вирусов в аэрозоле // Оптика атмосф. и океана. – 2004. – Т. 17, № 5–6. – С. 483–487.
11. Александров, В.С., Беркутов, А.В., Бачинский, А.Г., Бородулин, А.И., Криницын, Л.А., Мартынюк, Р.А., Нетесов, С.В., Попов, А.С., Сандахчиев, Л.С., Сафатов, А.С., Ставский, Е.А. Проблемы защиты населения Сибирского региона от природных и техногенных угроз биологического характера // Материалы научно-практической конференции «Дальнейшее совершенствование природной, техногенной и пожарной безопасности населения и территорий – устойчивое развитие Сибирского региона» (15 сентября 2004 г.). – Новосибирск: Агентство «Сибпринт». – С. 26–27.
12. Agranovski, A., Safatov, A.S., P'ankov, O.V., et al. Monitoring of Viable Airborne SARS Virus in Ambient Air // Atmos. Environ. – 2004. – Vol. 38, No. 23. – P. 3879–3884.
13. Бородулин, А.И., Десятков, Б.М., Ставский, Е.А., Сергеев, А.Н., Лаптева, Н.А., Михеев, В.Н., Шабанов, А.Н. Модель для оценки последствий распыла опасных примесей на станции метрополитена // Безопас. жизнедеят-сти. – 2007. – № 11.
14. Математическое моделирование и прогнозирование сценариев развития эпидемий (вспышек) оспы, сибирской язвы в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера // Итоговый научный отчет по теме № 60. Госконтракт от 31.01.2002 г. № 43.035.11. 2546 ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2002–2006 годы». Архив ФГУН ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора. – 2003. – С. 128.
15. Borodulin, A.I., Desyatkov, B.M., Lapteva, N.A., Sergeev, A.N., Agranovski, I.E. Personal Sampler of Monitoring of Viable Viruses. Part I. Modelling of Outdoor Sampling Conditions // Atmos. Environ. – 2006. – Vol. 40, No. 35. – P. 6687–6695.
16. Зверев, В.В., Семенов, Б.Ф. Вакцинопрофилактика при биотерроризме и биокатастрофах // Вестн. РАМН. – 2002. – № 10. – С. 39–41.
17. Покровский, В.И. Медицинские проблемы биобезопасности // Вестн. РАМН. – 2002. – № 10. – С. 6–9.
18. Ставский, Е. А. Совершенствование системы обеспечения безопасности работ с вирусами I–II групп патогенности: Автореф. дисс. на соискание ученой степени доктора мед. наук. – Типография Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, 2008. – 58 с.
19. Гутман, Л.Н. Введение в нелинейную теорию мезометеорологических процессов. – Л.: Гидрометеоздат, 1969. – 295 с.
20. Монин, А.С., Яглом, А.М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. Ч. 1. – М.: Наука, 1965. – 640 с.
21. Smagorinsky, J. General Circulation Experiments with the Primitive Equations: 1. The basic experiment // Mon. Weather Rev. – 1963. – Vol. 91, No. 2. – P. 99–164.
22. Deardorff, J.W. A Numerical Study of Three-Dimensional Turbulent Channel Flow to Large Reynolds Numbers // J. Fluid Mech. – 1970. – Vol. 41. – P. 453–480.
23. Вабищевич, П.Н. Метод фиктивных областей в задачах математической физики. – М.: Изд-во МГУ, 1991. – 157 с.
24. Марчук, Г.И. Методы вычислительной математики. – М.: Наука, 1977. – 456 с.
25. Марчук, Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
26. Henderson, D.A., Ingeky, T.V., Barillelt, J.G., et al. Smallpox as a biological weapon: medical and public health management. Working Group on Civilian Biodefense // JAMA. – 1999. – Vol. 281. – P. 2127–2137.
27. Противодействие биологическому терроризму. Практическое руководство по противоэпидемическому обеспечению. Под ред. академика РАМН проф. Г.Г. Онищенко. – М.: «Петит-А», 2003. – 301 с.