

Н. Н. БЕЛЯЕВ, С. Г. ЦЫГАНКОВА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА
В ПОМЕЩЕНИЯХ ПРИ ИСКУССТВЕННОЙ
ИОНИЗАЦИИ ВОЗДУХА**



Н. Н. БЕЛЯЕВ, С. Г. ЦЫГАНКОВА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА
В ПОМЕЩЕНИЯХ ПРИ ИСКУССТВЕННОЙ
ИОНИЗАЦИИ ВОЗДУХА**

Днепропетровск
2016

ББК 38.762.2

Б44

УДК 628.83:658.3:004.942

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *В. Н. Деревянко* (ГВУЗ «ЛГАСА»)

д-р техн. наук, проф. *Л. С. Савин* (ГВУЗ «ЛГАСА»)

д-р техн. наук, проф. *В. Д. Петренко* (ДНУЖТ)

Рекомендовано к печати Ученым советом
Днепропетровского национального университета железнодорожного
транспорта имени академика В. Лазаряна

Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова

Б44 Моделирование аэроионного режима в помещениях при искусственной ионизации воздуха / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова. Днепропетровск: ЛГАСА, 2016. – 109 с.
ISBN 978-966-323-145-7

В монографии рассматривается построение CFD модели прогноза аэроионного режима в помещениях различного назначения при искусственной ионизации воздуха. Расчет аэродинамики воздушных потоков реализован на базе модели потенциального течения. Для решения задачи по определению концентрационного поля аэроионов в помещении используется уравнение массопереноса. Для экспресс расчета аэроионного режима в помещении предложена балансовая модель. Представлены результаты вычислительных экспериментов по оценке аэроионного режима в помещениях при различных условиях организации рабочего пространства и режима ионизации.

Для студентов, аспирантов, научных работников, специализирующихся в области охраны труда, экологической безопасности, мониторинга микроклимата в помещениях, вентиляции и кондиционирования, прикладной математики.

У монографії розглядається побудова CFD моделі прогнозу аероіонного режиму в приміщеннях різного призначення при штучній іонізації повітря. Розрахунок аеродинаміки повітряних потоків реалізований на базі моделі потенційної течії. Для вирішення задачі з визначення концентраційного поля аероіонів в приміщенні використовується рівняння масопереносу. Для експрес розрахунку аероіонного режиму в приміщенні запропонована балансова модель. Представлені результати обчислювальних експериментів з оцінки аероіонного режиму в приміщеннях при різних умовах організації робочого простору і режиму іонізації.

This book is dedicated to the problem of air ions CFD simulation in rooms. To simulate the process of air ion dispersion in rooms three equations are used: equation of potential flow, electrostatic equation and mass transport equation. To solve the governing equations the difference schemes are used. Results of numerical experiments are presented.

Ил. 58. Табл. 4. Библиогр.: 171 наим.

УДК 628.83:658.3:004.942

ББК 38.762.2

© Беляев Н. Н., Цыганкова С. Г., 2016

© ЛГАСА, 2016

ISBN 978-966-323-145-7

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ.....	5
1.1. Аэроионный режим как составляющая микроклимата в помещении. Влияние аэроионов на человека.....	5
1.2. Виды ионизаторов и счетчиков ионов.....	9
1.3. Методы анализа и прогноза микроклимата в рабочих помещениях.....	19
1.3.1. Экспериментальные исследования микроклимата в помещениях.....	19
1.3.2. Графоаналитические методы и регрессионные модели.....	22
1.3.3. Аналитические модели.....	25
1.3.4. Нуль-мерные модели.....	29
1.3.5. CFD модели.....	30
РАЗДЕЛ 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАССЕЙВАНИЯ АЭРОИОНОВ В ПОМЕЩЕНИИ.....	37
2.1. Особенности рассматриваемого класса задач.....	37
2.2. Модель переноса ионов в помещении.....	39
2.3. Математическая модель рассеивания аэроионов и пыли в помещениях.....	41
2.4. Математическое моделирование электрического поля в помещении.....	44
2.5. Модель аэродинамики воздушных потоков в помещении.....	45
2.6. Балансовая модель оценки аэроионного режима в помещении.....	46
РАЗДЕЛ 3. ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ РАССЕЙВАНИЯ АЭРОИОНОВ В ПОМЕЩЕНИИ.....	49
3.1. Численное интегрирование уравнения массопереноса.....	49
3.2. Численное интегрирование уравнения для потенциала скорости.....	52
3.3. Численное интегрирование уравнения электростатики.....	53
3.4. Численное решение уравнений балансовой модели.....	54
3.5. Описание проблемно-ориентированного пакета программ.....	55
РАЗДЕЛ 4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В ПОМЕЩЕНИЯХ.....	57
4.1. Прогноз аэроионного режима на базе разработанной CFD модели при подаче в помещение ионизированного воздуха.....	58
4.2. Прогноз аэроионного режима в помещении на базе разработанной CFD модели при установке ионизатора.....	65
4.3. Прогноз аэроионного режима на базе балансовой численной модели.....	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	92
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	94

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время как в Украине, так и за рубежом значительное внимание уделяется проблемам здорового микроклимата в рабочих и жилых помещениях. В данном контексте наиболее актуальным является создание и поддержание необходимых микроклиматических параметров, которые обеспечивали бы комфортное пребывание человека в жилых, рабочих, производственных помещениях с сохранением хорошего самочувствия и работоспособности. В связи с вышесказанным, обеспечение необходимого аэроионного состава воздушной среды в помещениях и рабочих зонах становится крайне важной задачей в области охраны труда и экологической безопасности. В свою очередь, для расчета аэроионного режима в помещениях необходимы эффективные методики, позволяющие еще на этапе проектирования и реконструкции помещений различного назначения предопределять концентрацию аэроионов в любом месте помещения, и соответственно, получать адекватную информацию, дающую возможность обосновать конкретный режим ионизации и рациональное расположение ионизаторов.

Как показывает анализ литературных источников, посвященных данной проблеме, модели, используемые в настоящее время на практике в Украине для вышеуказанных целей, как правило, разработаны без учета основных физических факторов, в первую очередь – аэродинамики воздушных потоков, оказывающих влияние на формирование концентрационного поля аэроионов в помещениях и рабочих зонах. В связи с этим актуальной задачей является разработка моделей, позволяющих оперативно проводить оценку аэроионного режима в любом месте помещения при искусственной ионизации воздуха. Следует подчеркнуть, что при моделировании должны быть учтены наиболее значимые

факторы, определяющие значение концентрации аэроионов в помещениях, т.е. геометрические размеры помещений, наличие в них установленного оборудования и мебели, расположение вентиляционных отверстий, режим вентиляции, размещение ионизаторов, конкретные места эмиссии частиц пыли и ионов различной полярности и их взаимодействие в помещении.

В настоящей монографии рассмотрены новые численные модели прогноза аэроионного режима в помещениях различного назначения при искусственной ионизации воздуха. Модели дают возможность рассчитывать концентрацию аэроионов в любом месте помещения с учетом геометрических характеристик помещения и физических факторов, влияющих на распределение аэроионов в помещениях и рабочих зонах.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ

В данном разделе приведены результаты обзора методов и моделей, применяемых в настоящее время в Украине и за рубежом для изучения аэроионного режима в помещениях.

1.1. Аэроионный режим как составляющая микроклимата в помещении. Влияние аэроионов на человека

Экологическая безопасность внутренней среды жилых, общественных и других зданий складывается из нескольких составляющих, наиболее важными из которых являются внутренний микроклимат помещений, то есть оптимальные для организма человека значения температуры, влажности, скорости движения воздуха, освещенности, инсоляции, уровня шума; качественный и количественный состав воздуха

в помещениях, который определяется прежде всего его ионным составом, а также химическим, радиационным, электромагнитным и биологическим загрязнениями [106, 126].

При этом, возросшее в последнее время число публикаций отечественных и зарубежных ученых, посвященных именно обеспечению аэроионного режима в помещениях, свидетельствует об огромной важности качественного состава воздушной среды для здоровья, самочувствия и работоспособности человека [28, 37, 45–48, 57, 82, 90, 101, 106, 115, 117, 120, 124, 126, 135, 136, 151–153, 167].

Согласно действующим нормативным документам, во вдыхаемом воздухе производственных и общественных помещений должен быть соблюден определенный интервал концентраций ионов, отклонение от которого создает угрозу здоровью человека (таблица 1.1).

Таблица 1.1

Нормативные величины ионизации воздуха рабочей среды производственных и общественных помещений согласно ГОСТ 2152-80 [38] и СанПиН 2.2.4.1294-03 [31]

Уровни аэроионизации	Число ионов в 1 см ³ воздуха		Показатель полярности
	n^+	n^-	
Минимально необходимый	400	600	– 0,2
Оптимальный	1500...3000	3000...5000	от – 0,5 до 0
Максимально допустимый	50000	50000	– 0,05 до + 0,05

Согласно ГОСТ 2152-80 [38] характеристиками ионов являются подвижность и заряд. Подвижность ионов выражается коэффициентом пропорциональности K (см²/сек·В) между скоростью ионов и напряженностью электрического поля, воздействующего на ион. Подвижность ионов зависит от их массы: чем больше масса, тем меньше скорость перемещения ионов в электрическом поле. По

подвижности весь спектр ионов делят на пять диапазонов: легкие $K > 1,0$; средние $1,0 > K > 0,01$; тяжелые $0,01 > K > 0,001$; ионы Ланжевена $0,001 > K > 0,00025$; сверхтяжелые ионы $0,00025 > K$. Показателем полярности Π является отношение разности числа ионов положительной n^+ и отрицательной n^- полярности к их сумме, т.е.

$$\Pi = (n^+ - n^-)/(n^+ + n^-).$$

Концентрация ионов в помещении определяется, как правило, присутствием ионизирующего излучения различных заряженных поверхностей и степенью загрязненности воздуха микрочастицами [74, 101, 115]. В чистом воздухе содержание положительных ионов несколько превышает количество отрицательных, в загрязненном – доля положительных ионов значительно возрастает. Вентиляция имеет крайне важное значение для поддержания оптимального соотношения ионов в воздухе помещения.

В естественных условиях образование аэроионов происходит за счет процесса ионизации кислорода и газов, входящих в состав воздуха, под действием природного ионизирующего излучения. Однако, в настоящее время в своей повседневной деятельности большинство жителей городов и мегаполисов проводит до 90% своего времени в закрытом помещении (офис, производство, квартира, транспорт, развлекательные и торговые центры), то есть в искусственной среде обитания. При этом воздух в замкнутой среде помещений, особенно в условиях нарушенного экологического баланса, свойственного большим урбанизированным городам, отличается высоким уровнем загрязнения, в частности, запыленности, и недостаточным количеством кислорода. Кроме этого, при отделке и мебелировке рабочих и офисных помещений достаточно часто используются синтетические материалы, способные накапливать электрический заряд, а также выделять различные вещества в процессе своей эксплуатации. Как в

офисных, так в производственных помещениях, как правило, располагается электрическое оборудование, экраны телевизоров, мониторов компьютеров, различная оргтехника и т.д. Помимо этого, помещения различного назначения могут быть оборудованы системами принудительной вентиляции, очистки, кондиционирования воздуха. Пыль и другие загрязнения не только засоряют воздух, но также и снижают концентрацию ионов кислорода. Кроме этого, пыль, находящаяся в закрытом помещении, является средством перемещения для вирусов, бактерий, болезнетворных спор, пылевых клещей и т.д. Наконец, сам человек является источником только положительных ионов. Все вышеперечисленное вызывает аэроионный дисбаланс, либо же большое превышение ионов положительной полярности [45–48, 90, 101, 115, 124, 126].

Как показано значительным числом ученых [28, 37, 45–48, 57, 82, 90, 101, 115, 117, 120, 126, 136, 167], нарушение оптимального ионного баланса в воздухе может вызывать утомляемость, вялость, головную боль, снижение скорости зрительных и слуховых реакций и как следствие, снижение внимания и работоспособности; снижение сопротивляемости стрессам; различные заболевания дыхательных путей, центральной и периферической нервной и эндокринной системы; снижение способности к восстановлению сил и устойчивости к инфекциям и аллергии; разбалансирование окислительно-восстановительных процессов в тканях человека и ослабление защитных сил организма, а также оказывать отрицательное влияние на состав и физико-химические свойства крови и общий обмен веществ человека.

В то время как недостаток легких отрицательных ионов крайне негативно сказывается на окислительно-восстановительных процессах в организме человека, на состоянии иммунной системы, аэроионы кислорода благотворно влияют на состояние нервной системы, кровяное

давление, тканевое дыхание, обмен веществ, на физико-химические свойства крови, соотношение белковых фракций плазмы, кроветворение, сахар крови, электрокинетический потенциал эритроцитов, митогенетический режим тканей, изоэлектрические точки тканевых коллоидов. Такое действие легких отрицательных аэроионов А. Л. Чижевский [126] объясняет тем, что они влияют на основные электрообменные и физико-химические процессы в человеческом организме, нормализуя их интенсивность. Активное улучшение дыхательной среды в жилых и рабочих помещениях путем обогащения воздуха аэроионами кислорода может существенно повысить работоспособность, уменьшить утомляемость, улучшить здоровье. Аэроионизация воздуха помогает бороться с запыленностью, загазованностью и бактериальным загрязнением помещений [74, 81, 101, 115, 126, 127]. Таким образом, можно сделать вывод о необходимости создания и поддержания надлежащего аэроионного режима в офисных, производственных, общественных помещениях путем создания систем искусственной ионизации воздуха.

1.2. Виды ионизаторов и счетчиков ионов

В настоящее время активно применяется искусственная ионизация воздуха, которая может быть осуществлена двумя путями: подачей ионизированного воздуха или установкой ионизатора непосредственно внутри помещения. Получение аэроионов в аэроионизаторе может быть осуществлено различными способами, и в зависимости от физического процесса, используемого для получения аэроионов, аэроионизаторы можно классифицировать следующим образом [83, 115]: термоэлектронные (плазменные); радиоизотопные; фотоэлектрические (ультрафиолетовые); гидродинамические, электрические (высоковольтные,

коронные) и комбинированные. В термоэлектронных аэроионизаторах, применяющихся, в основном, для исследовательских целей, используется эффект термоэлектронной эмиссии раскаленных металлов при их нагревании до высокой температуры. Принцип действия радиоизотопных аэроионизаторов основан на свойстве α -, β - и γ -лучей радиоактивных веществ ионизировать воздух. Такие приборы используются для проведения медико-биологических наблюдений. Принцип действия гидродинамических аэроионизаторов основан на баллоэлектрическом эффекте, во время которого происходит электризация капель воды при ее дроблении или распылении. Фотоэлектрические аэроионизаторы при работе используют ионизирующую способность ртутно-кварцевых ламп, генерирующих коротковолновые ультрафиолетовые лучи. Такие аэроионизаторы можно использовать для ионизации воздуха больших помещений. Принцип действия электрических аэроионизаторов основан на явлении автоэлектронной эмиссии, возникающей при определенном градиенте электрического поля у заостренного излучателя [83, 115].

В настоящее время для поддержания аэроионного режима в помещениях в основном применяются электрические ионизаторы коронного разряда, которые могут быть следующих типов [78]: униполярные; биполярные; эффлювиальные; оснащенные вентилятором; работающие в режиме «темной» или «светящейся» короны. Общий вид некоторых типов современных ионизаторов, предлагаемых для улучшения уровня комфортности пребывания человека в помещениях, показан на рис. 1.1 – 1.6, некоторые характеристики данных ионизаторов приведены в таблице 1.2.



Рис. 1.1. Ионизатор воздуха Zenet Super Plus Turbo

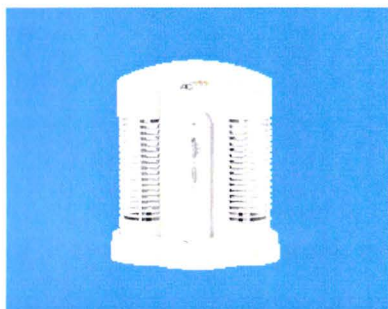


Рис. 1.2. Ионизатор воздуха AIC XJ-902



Рис. 1.3. Ионизатор воздуха «Янтарь 5А»

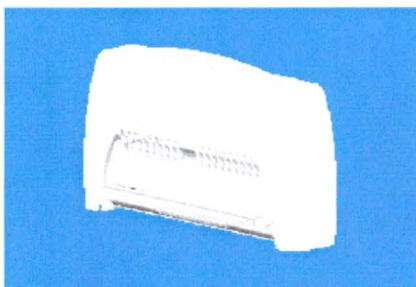


Рис. 1.4. Ионизатор воздуха Супер-Плюс-Био



Рис. 1.5. Ионизатор воздуха «Полет»



Рис. 1.6. Ионизатор воздуха Medical Ion Mini

Характеристики ионизаторов воздуха

Ионизатор					
Zenet Super Plus Turbo	AIC XJ-902	Янтарь 5А	Супер-Плюс-Био	Полет	Medical Ion Mini
Концентрация отрицательных аэроионов (на расстоянии 1 м от ионизатора)					
до 4×10^4 ион/см ³	до 1×10^4 ион/см ³	от 0,5 до 100 тыс. ион/см ³	20000 ион/см ³	$7 \cdot 10^4 - 12 \cdot 10^4$ ион/см ³	$2,7 \cdot 10^5$ ион/см ³
Габаритные размеры, мм					
275×195×145	220×60×150	125×100×175	280×195×60	40×85×40	140×90×45
Площадь ионизации					
100 м ³	15 м ²	20 – 25 м ²	до 50 м ³	30 – 54 м ²	16,5 м ²
Масса, кг					
2	0,53	1,5	1	1,9	0,5

На практике крайне важно знать не только параметры источников ионизации, но и параметры микроклимата. Главный вопрос – какова будет концентрация ионов в рабочей зоне, и в частности, в зоне расположения органов дыхания работника. Одним из подходов к определению концентрации аэроионов на рабочих местах является применение счетчиков ионов. Все существующие устройства измерения концентрации аэроионов можно классифицировать на спектрометры, регистраторы аэроионов и собственно счетчики аэроионов. Для измерения концентрации аэроионов в счетчиках аэроионов используют, как правило аспирационный метод или метод открытого коллектора [30, 59, 65, 66, 70]. На рис. 1.7 – 1.13 показан общий вид некоторых счетчиков аэроионов, сравнительная характеристика данных счетчиков представлена в таблице 1.3.



Рис. 1.7. Счетчик ионов «Сапфир-3М»



Рис. 1.8. Счетчик ионов «Сигма-1»



Рис. 1.9. Счетчик ионов «MAC-01»



Рис. 1.10. Счетчик ионов Air Ion Counter

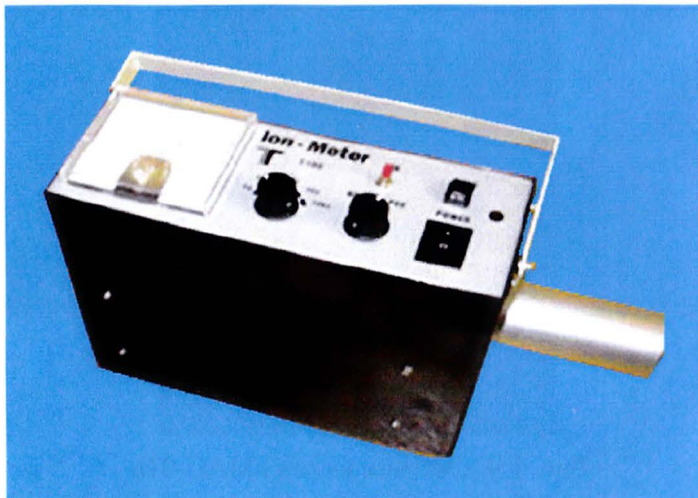


Рис. 1.11. Счетчик ионов Ionmeter T-111



Рис. 1.12. Счетчик ионов Highly Accurate
Air Ion Counter NT-C101A

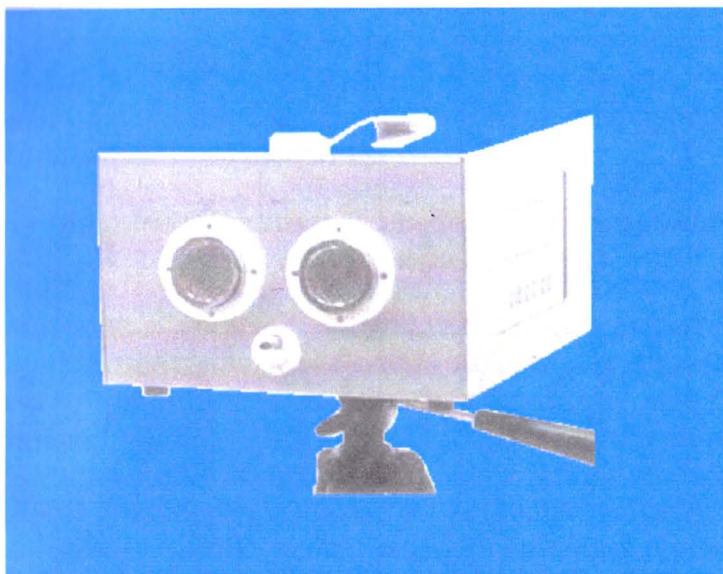


Рис. 1.13. Счетчик ионов Highly Accurate
Air Ion Counter COM 3800

Таблица 1.3

Характеристики счетчиков ионов

Характеристики	Счетчик ионов						
	Сапфир-3М	Сигма-1	МАС-1	Air Ion Counter	Ionmeter T-111	Highly Accurate Air Ion Counter NT-C101A	Highly Accurate Air Ion Counter COM 3800
Метод измерения	аспирационный	аспирационный	аспирационный	аспирационный	аспирационный	аспирационный	аспирационный
Тип измеряемых аэроионов	легкие	легкие	легкие	легкие	легкие	легкие	легкие
Измерение ионов обеих полярностей	Автоматически определяет знак	Ручной выбор знака	Измеряет отдельно число «+» и «-» ионов	Измеряет отдельно число «+» и «-» ионов	Измеряет и «+» и «-» ионы	Измеряет «-» ионы	Измеряет и «+» и «-» ионы
Диапазон измерения, ионов на см ³	200-2500000	100-199999	10 ² -10 ⁶	10-2 10 ⁶	500-5000000	10-3000000	0-5000000
Максимальная погрешность, %	30%	25%	40%	25%	3%	5%	1%
Габаритные размеры, мм	250×170×90	90×150×180	170×105×56	100×50×150	250×100×220	70×180×110	130×205×250
Производитель	Россия	Россия	Россия	США	Швеция	Япония	Япония

Однако, следует отметить, что используемые в Украине счетчики аэроионов типа «Сапфир», «Сигма» дают большую погрешность порядка 40% [29, 30, 32, 53, 66, 70, 80]. Также следует подчеркнуть, что зарубежные счетчики аэроионов имеют значительную стоимость (порядка 2500 – 16000 долларов США).

Кроме этого, необходимо отметить, что экспериментальное определение концентраций аэроионов на рабочих местах не может быть реализовано в повседневной практике, что обусловлено малым количеством счетчиков аэроионов в организациях и на производствах, а в случае проведения проектных работ такой подход, в принципе, неприменим.

1.3. Методы анализа и прогноза микроклимата в рабочих помещениях

Поскольку целью данной работы является разработка прогнозных моделей для оценки концентрации аэроионов в помещениях и рабочих зонах, то рассмотрим модели, применяемые в настоящее время в Украине и за рубежом для проведения таких исследований.

1.3.1. Экспериментальные исследования микроклимата в помещениях

В настоящее время к результатам экспериментальных исследований предъявляются очень высокие требования, что связано с созданием и внедрением в практику зарубежных исследований [134, 144, 154, 165] высококлассного экспериментального оборудования. Это оборудование дает возможность непосредственно в рабочем помещении, в рабочих зонах («full scale tests») измерять различные параметры микроклимата: скорость воздушного потока, температуру, количество ионов и т.д. Таким образом,

постановка и проведение «full scale experiments» требуют значительных материальных затрат. Важно отметить, что оборудование такого класса отсутствует в Украине. Проведение «full scale experiments» также требует значительных временных затрат на подготовку и организацию места проведения эксперимента, а также на проведение собственно экспериментальных исследований. На рис. 1.14 – 1.15 показаны примеры тестовых помещений для исследования параметров микроклимата [154, 165].



Рис. 1.14. Подготовка физического эксперимента по исследованию микроклимата в офисном помещении [154]

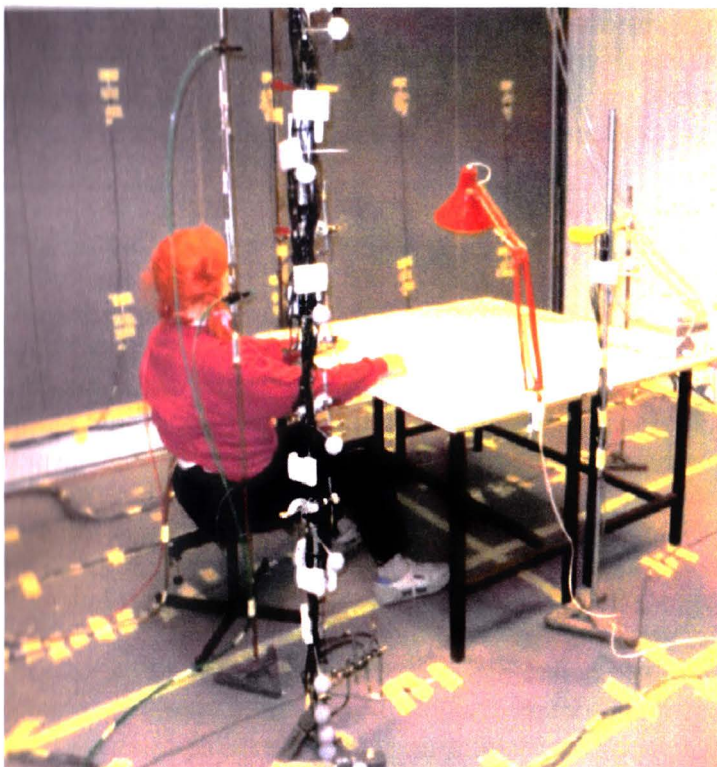


Рис. 1.15. Экспериментальное оборудование в комнате для исследования параметров микроклимата [165]

Также важно подчеркнуть, что «full scale experiment» проводится для серии задач. Так, на рис. 1.16 показаны схемы реализации воздухообмена в помещении, для которых проводились исследования [165].

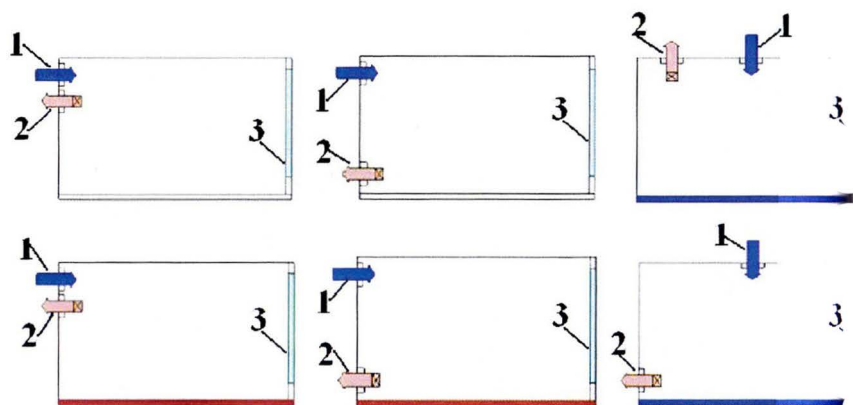


Рис. 1.16. Расположение отверстий системы вентиляции [165]
 1 – входное отверстие, 2 – выходное отверстие; 3 – окно

Результаты экспериментальных исследований параметров микроклимата в помещениях, проведенных в Украине, можно найти в работах [33, 57, 70, 78, 98, 100, 109, 110, 112].

Следует отметить, что применение полученных экспериментальных результатов ограничено теми условиями при которых осуществлялось исследование, то есть были сделаны соответствующие измерения параметров, и, без надлежащего обоснования, такие данные не могут быть использованы для условий, отличных от экспериментальных.

1.3.2. Графоаналитические методы и регрессионные модели

В некоторых случаях для расчета микроклимата используются графоаналитические методы [30, 34, 104, 128] которые построены на основе анализа и обработки данных полученных в результате эксперимента. Например, в работе [34] разработан графоаналитический аппарат для прогноз распространения аэроионов в рабочих помещениях несколькими источниками ионизации воздуха и даны рекомендации по практическому использованию данных.

метода. Автор обращает внимание на то, что предложенный метод позволяет определить схему размещения в конкретном помещении необходимого оборудования с обеспечением нормативных параметров аэроионизации воздуха на рабочих местах [34].

Однако, при моделировании аэроионного режима графоаналитические модели используются редко, что связано со сложностью расчета процесса распространения аэроионов в помещении, где находится оборудование, мебель, и т.п., влияющие на аэродинамику воздушных потоков.

К преимуществам графоаналитических методов можно отнести следующие:

- простота расчета;
- отсутствие необходимости использования компьютера для проведения расчетов;
- возможность быстрого овладения данным методом.

Недостатки данных методов заключаются в следующем:

- нет возможности построить концентрационное поле аэроионов в помещениях, в рабочих зонах, в зоне расположения органов дыхания;
- нет учета влияния скорости, диффузии на формирование концентрационного поля аэроионов;
- «жесткая» привязка модели к тем условиям, для которых приведен эксперимент.

В ряде случаев на практике используются регрессионные модели, которые основаны на обработке результатов измерения аэроионов на различных расстояниях от источника [33, 120, 122, 168]. Например, в работе [33] приведена регрессионная модель для оценки концентрации отрицательных аэроионов в помещении вида

$$n = 1,7947L^2 - 27,5L + 113,4;$$
$$R^2 = 0,97;$$

где n – концентрация отрицательных аэроионов;
 L – расстояние от источника аэроионов;

R – достоверность аппроксимации.

В работе [168] для оценки концентрации отрицательных аэроионов предложена модель вида

$$y = 2,8 \times 10^6 \exp(ax),$$

где y – средняя концентрация отрицательных аэроионов;

x – расстояние от коронирующего электрода;

a – коэффициент регрессии.

Автором работы [122] разработан комплекс регрессионных моделей для оценки концентрации отрицательных аэроионов. Вид данных регрессионных моделей показан на рис. 1.17.

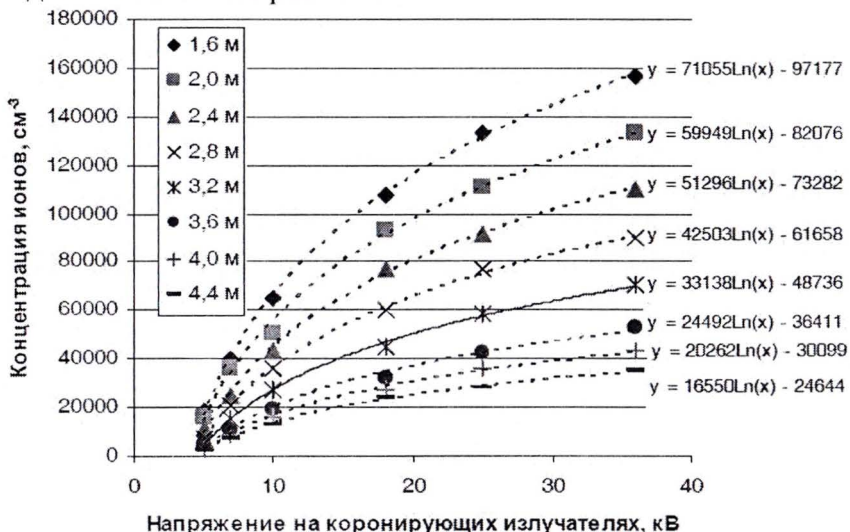


Рис. 1.17. Зависимость концентрации аэроионов от напряжения на излучателях $U_{\text{корон}}$ при различных расстояниях до ионизатора [122]

Совершенно очевидно, что вышеперечисленные модели являются простыми, и для их реализации не требуется компьютер. Существенным недостатком подобных моделей

является крайне ограниченная область их применения — только та, для которой проводились измерения.

1.3.3. Аналитические модели

Для прогноза микроклимата в помещениях, и, в частности, для оценки аэроионного режима, используются одномерные уравнения переноса примеси, для которых можно найти аналитические решения [4, 32–35, 53, 70–72, 98, 107–114]. Рассмотрим эти уравнения.

Так, в работе [70] для анализа концентрации аэроионов используется уравнение массопереноса вида:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g - D \left(\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \right) + \frac{n - n_0}{\tau} + \frac{\partial n}{\partial x} V,$$

где $\frac{\partial n}{\partial t}$ — изменение концентрации ионов по времени;

g — производительность источника ионов;

D — коэффициент диффузии;

n_0 — исходная концентрация ионов в помещении;

τ — среднее время жизни ионов;

V — скорость потока воздуха в канале;

X — расстояние от источника ионизации.

В работе [72] для определения концентрации аэроионов применено следующее уравнение массопереноса, записанное в сферической системе координат (рис. 1.18):

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g + D \left(\frac{\partial^2 n}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial n}{\partial r} \right) - \gamma n,$$

где n — концентрация аэроионов;

g — генерация ионов;

D — коэффициент диффузии;

r — расстояние до точки определения;

γ — коэффициент рекомбинации.

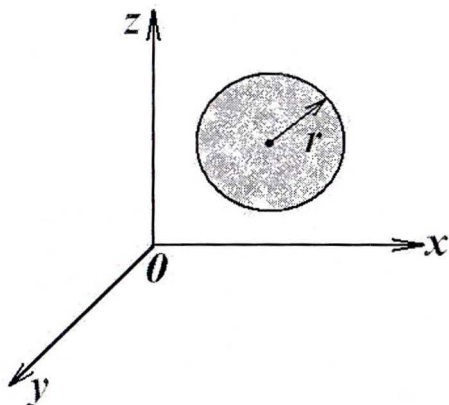


Рис. 1.18. К расчету концентрации ионов в сферической системе координат

При этом автор указывает, что данная модель не учитывает направленного движения воздуха в помещении (за счет функционирования систем вентиляции, кондиционирования воздуха, систем охлаждения технических средств и т.д.) [72]. Отметим, что при определенных условиях данное уравнение имеет аналитическое решение [91].

В работе [32] для рассеивания аэроионов используют уравнение вида:

$$D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - g + \frac{n - n_0}{\tau} = 0,$$

где D – коэффициент диффузии;

n – концентрация ионов в данной точке;

n_0 – средняя (фоновая) концентрация ионов;

g – производительность источника ионов;

τ – среднее время жизни ионов;

x – расстояние от источника до точки определения концентрации n .

Аналитическое решение данного уравнения имеет вид [32]:

$$n(x) = g\tau e^{\frac{l-x}{\sqrt{D\tau}}} + g\tau,$$

где l – расстояние, на котором концентрация аэроионов практически уравнивается с фоновой.

Интерес представляет модель авторов работы [114], разработанная на основании подобия процессов переноса тепла и примесей в приточных струях. Для построения модели осуществляется определенная идеализация процесса формирования концентрационного поля аэроионов в рабочей зоне помещения (рис. 1.19) [113].

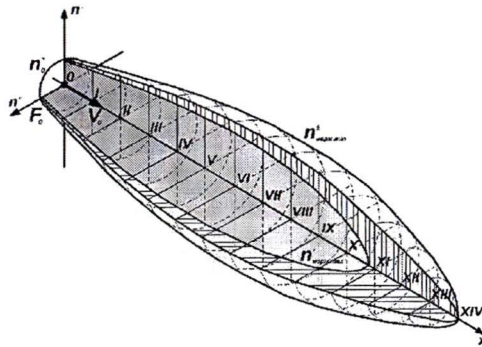


Рис. 1.19. Схематическое изображение физической модели процесса создания полей избыточных концентраций аэроионов в приточной струе в рабочей зоне помещения [113]

Однако, как видно из данного рисунка, принятая схематизация процесса рассеивания ионов является сильно приближенной, так как при этой модели не учитывается влияние стен помещения, мебели и т.д., то есть рассматривается просто свободная струя.

В данном случае распределение избыточной концентрации аэроионов в поперечных сечениях струи рассчитано на базе зависимости [114]:

$$\Delta N^{\pm} = \Delta N_x^{\pm} \exp \left[-\frac{\sigma}{2} \left(\frac{r}{c \cdot x} \right)^2 \right],$$

аэроионов составляет 600 частиц/см³, а максимальное значение 50000 частиц/см³, то, как следует из анализа данных, представленных в таблице 4.1, в помещении обеспечиваются требуемые нормативы концентрации отрицательных аэроионов.

Отметим, что для расчета задачи на базе разработанной численной модели оставляет порядка $0,5$ секунды компьютерного времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии рассмотрены эффективные численные модели прогноза и оценки аэроионного режима в помещениях различного назначения и в рабочих зонах при искусственной ионизации воздуха. Разработанная численная CFD модель основывается на применении уравнения массопереноса для описания процесса рассеивания ионов и пыли. Для расчета аэродинамики воздушных потоков и определения поля скорости воздушного потока в помещении применяется модель потенциального течения. Для моделирования электрического поля, создаваемого ионами, используется уравнение Пуассона для скалярного потенциала. При моделировании учитываются наиболее важные физические факторы, оказывающие влияние на процесс формирования концентрационного поля ионов, то есть наличие в помещении мебели, установленного оборудования, стен, пола, потолка, различных препятствий, размещение вентиляционных отверстий, режим воздухообмена, конкретных мест эмиссии ионов различной полярности и их взаимодействия в помещении и в рабочих зонах, мест установки ионизаторов и т.д.

Для экспресс расчета концентрации аэроионов в помещениях при искусственной ионизации воздуха разработана балансовая численная модель, учитывающая при моделировании зависимость эмиссии отрицательных,

положительных аэроионов и пыли в помещении от времени и зависимость от времени кратности воздухообмена, а также импульсный режим работы ионизаторов.

Разработанная CFD модель позволяет оперативно рассчитывать концентрацию аэроионов в любом месте помещения или рабочей зоны, и, что особенно важно, в местах расположения органов дыхания работников. С помощью предложенных в монографии моделей появляется возможность определять места рационального расположения ионизаторов с целью создания наиболее благоприятного аэроионного режима для персонала. Следует отметить, что разработанные численные модели позволяют оперативно проводить серийные расчеты для определения оптимального варианта организации искусственной ионизации воздуха в процессе дизайна или реинжиниринга рабочих зон и помещений различного назначения.

164. Teodosiu C. Appropriate CFD turbulence model for improving indoor air quality of ventilated spaces / C. Teodosiu, V. Ilie, R. Teodosiu // *Mathematical Modelling in Civil Engineering*, 2014. – Vol. 10, no. 4, pp. 28–42.
165. Tomasi R. Experimental evaluation of air distribution in mechanically ventilated residential rooms: Thermal comfort and ventilation effectiveness / R. Tomasi, M. Krajcik, A. Simone, B.W. Olesen // *Energy and Buildings*, 2013. – Vol. 60, pp. 28–37.
166. Waring M. S. The effect of an ion generator on indoor air quality in a residential room / M. S. Waring, J. A. Siegel // *Indoor Air*, 2011. – Vol. 21, no. 4, pp. 267–276.
167. Wiszniewski A. Influence of Air-Ions on People Subjected to Physical Effort and at Rest / A. Wiszniewski, A. Suchanowski // *Polish Journal of Environmental Studies*, 2008. – Vol. 17, no. 5, pp. 801–810.
168. Wu C. C. Influence of air humidity and the distance from the source on negative air ion concentration in indoor air / C. C. Wu, W. M. Lee, S. Yang, K.-P. Yu, C. L. Lou // *Science of the Total Environment*, 2006. – Vol. 370, no. 1, pp. 245–253.
169. Xing H. A study of the air quality in the breathing zone in a room with displacement ventilation / H. Xing, A. Hatton, H. B. Awbi // *Building and environment*, 2001. – Vol. 36, no. 7, pp. 809–820.
170. Yang X. Performance of three air distribution systems in VOC removal from an area source / X. Yang, J. Srebric, X. Li, G. He // *Building and Environment*, 2004. – Vol. 39, no. 11, pp. 1289–1299.
171. Zhang W. Simulation of ion generation and breakdown in atmospheric air / W. Zhang, T. S. Fisher, S. V. Garimella // *Journal of applied physics*. – USA, 2004. – Vol. 96, no. 11, pp. 6066–6072.

Краткие сведения об авторах

Беляев Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидравлики и водоснабжения Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Академика Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, e-mail: gidravlika2013@mail.ru.

Biliaiev Mykola Mykolaiovych, Dr.Sc. (Tech.), Prof. Department of Hydraulics and Water Supply, National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2, akademika Lazaryana str., Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine, e-mail: gidravlika2013@mail.ru.

Сфера научных интересов: математическое моделирование процессов аэрогидродинамики и массопереноса; численное моделирование в области экологической и промышленной безопасности, охраны окружающей среды; математическое моделирование процессов массопереноса в системах водоснабжения и водоотведения.

Цыганкова Светлана Григорьевна, ассистент кафедры водоснабжения, водоотведения и гидравлики Государственного высшего учебного заведения «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры» (ГВУЗ «ПГАСА»), ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, e-mail: s-tsygankova@mail.ru.

Tsygankova Svetlana Grigorievna, Ass. Prof., Department of Water Supply, Drainage and Hydraulics, State Higher Educational Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Gchernishevskogo str., Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: s-tsygankova@mail.ru.

Сфера научных интересов: математическое моделирование микроклимата в помещениях, расчет и проектирование насосных установок различного назначения.

Наукове видання

Біляєв Микола Миколайович
Циганкова Світлана Григорівна

**МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОІОННОГО РЕЖИМУ
В ПРИМІЩЕННЯХ ПРИ ШТУЧНІЙ ІОНІЗАЦІЇ ПОВІТРЯ**

Монографія
Російською мовою

Матеріал друкується в авторській редакції

Видавництво «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»
вул. Чернишевського, 24-а, м. Дніпропетровськ, 49005

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
Серія ДК № 1291 від 20.03.2003

Підписано до друку 16.01.2016.
Формат 60x84 ^{1/16}. Папір офсетний. Гарнітура літературна.
Друк офсетний. Ум. друк. арк. 6,8. Тираж 300 прим.