

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
«ПРИДНЕПРОВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ»**

На правах рукописи

**Цыганкова
Светлана Григорьевна**

УДК 331.453:613.155

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НОРМАЛИЗАЦИИ АЭРОИОННОГО
РЕЖИМА В ПОМЕЩЕНИЯХ ПРИ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНИЗАЦИИ
ВОЗДУХА**

05.26.01 – охрана труда

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Научный руководитель
Беляев Николай Николаевич
доктор технических наук,
профессор

Днепр – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА НА УСЛОВИЯ ТРУДА. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И КОНТРОЛЯ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В ПОМЕЩЕНИЯХ.....	11
1.1. Аэроионный режим в помещении. Влияние аэроионов на человека...	11
1.2. Анализ существующих средств генерации аэроионов и средств контроля аэроионного режима в помещениях.....	15
1.3. Анализ существующих методов оценки и прогноза параметров аэроионного режима в помещениях.....	18
Выводы по разделу 1.....	33
РАЗДЕЛ 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАССЕИВАНИЯ АЭРОИОНОВ В ПОМЕЩЕНИИ С УЧЕТОМ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ДАННЫЙ ПРОЦЕСС.....	35
2.1. Общие положения. Методика выполнения исследований.....	35
2.2. Особенности рассматриваемого класса задач анализа и прогноза аэроионного режима в помещениях.....	37
2.3. Разработка математической модели переноса ионов в помещении с учетом движения воздушного потока.....	38
2.4. Разработка математической модели рассеивания аэроионов и пыли в помещениях с учетом взаимодействия ионов различной полярности.....	42
2.5. Разработка математической модели электрического поля в помещении с учетом препятствий	46
2.6. Разработка математической модели аэродинамики воздушных потоков в помещении с учетом препятствий	47
2.7. Разработка экспресс-оценки параметров аэроионного режима в помещении с использованием балансовой модели	49

Выводы по разделу 2.....	52
РАЗДЕЛ 3. РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ РАССЕЙВАНИЯ АЭРОИОНОВ В ПОМЕЩЕНИИ И МЕТОДОВ ИХ РЕШЕНИЯ С УЧЕТОМ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОЦЕСС	53
3.1. Разработка дискретной модели массопереноса ионов в помещении с учетом взаимодействия ионов разной полярности.....	53
3.2. Разработка дискретной модели для определения потенциала скорости воздушного потока в помещении с учетом препятствий.....	56
3.3. Разработка дискретной модели скалярного потенциала электростатического поля, создаваемого ионами в помещении, при наличии препятствий.....	60
3.4. Экспресс-оценка параметров аэроионного режима в помещении с использованием балансовой модели.....	61
3.5. Разработка программного обеспечения для оценки, прогноза и управления параметрами аэроионного режима в помещениях.....	62
3.6. Оценка адекватности (верификация) и достоверности разработанных моделей.....	69
3.6.1. Оценка адекватности разработанных моделей на независимых данных.....	70
3.6.2. Оценка адекватности разработанных моделей на основе физического эксперимента.....	74
Выводы по разделу 3.....	83
РАЗДЕЛ 4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В ПОМЕЩЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ.....	84
4.1. Прогноз аэроионного режима на базе разработанной CFD модели при стационарной подаче в помещение ионизированного воздуха.....	84
4.2. Оценка параметров аэроионного режима в помещении на базе	

разработанной CFD модели при установке ионизатора непосредственно внутри помещения.....	92
4.3. Прогноз аэроионного режима на базе разработанной балансовой численной модели.....	127
Выводы по разделу 4.....	130
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	131
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ А	153
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	154
ПРИЛОЖЕНИЕ В	156
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	157

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В настоящее время значительно возросло количество рабочих мест, оборудованных электронно-вычислительными машинами, видеодисплейными терминалами, офисной техникой. При использовании данного оборудования операторы и обслуживающий персонал подвергаются воздействию целого ряда опасных и вредных производственных факторов, одним из которых является повышенная или пониженная ионизация воздуха в рабочем пространстве помещения. Пребывание работников в условиях аэроионного дискомфорта влечет за собой повышенную утомляемость, снижение внимания, скорости зрительных и слуховых реакций и т.д., что в конечном итоге может привести к возникновению несчастных случаев. На данный момент наиболее часто применяемым способом для создания и поддержания оптимального аэроионного состава воздушной среды в помещениях является искусственная ионизация воздуха. В Украине для расчета и оценки параметров аэроионного режима в помещениях применяются в основном аналитические или регрессионные модели, позволяющие рассчитывать концентрацию аэроионов в помещениях, оборудованных электронно-вычислительной и офисной техникой, а также на компьютеризированных рабочих местах. Однако эти модели разработаны без достаточного учета влияния на аэроионный режим наличия установленного оборудования, источников эмиссии ионов и выброса пыли в помещениях и т.д. Для составления более точного прогноза изменения уровней ионизации в рабочей зоне производственных помещений необходима разработка многофакторных математических моделей, позволяющих оперативно получать информацию по изменению концентрации аэроионов для обеспечения комфортной и безопасной воздушной среды в данных помещениях. Таким образом, обоснование параметров нормализации аэроионного режима в помещениях и управление

указанными показателями при искусственной ионизации воздуха является актуальной научно-практической задачей.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Диссертационная работа выполнена с учетом «Концепции Общегосударственной целевой программы улучшения состояния безопасности, гигиены труда и производственной среды на 2012 – 2016 годы» (одобрена распоряжением Кабинета Министров Украины от 31 августа 2011 № 889-р); Общегосударственной социальной программы улучшения состояния безопасности, гигиены труда и производственной среды на 2014 – 2018 годы (утверждена Законом Украины № 178-VII от 04.04.2013), в рамках научно-исследовательской работы ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры» «Системний аналіз енергозберігаючих та екологоорієнтованих систем і технологій життєзабезпечення з метою захисту людини від шкідливих факторів» (державний реєстраційний № 0111U006479), в которой автор была соисполнителем.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является обоснование параметров нормализации аэроионного режима в помещениях при искусственной ионизации воздуха путем моделирования процесса рассеивания аэроионов в помещении, прогноз и управление указанными показателями.

Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи:

- провести анализ современных методов оценки и контроля параметров аэроионного режима в помещении;
- разработать комплекс численных моделей для обоснования требуемых параметров аэроионного режима при искусственной ионизации воздуха на компьютеризованных рабочих местах и в помещениях, а также при персонализированной подаче ионизированного воздуха в рабочую зону;
- разработать метод экспресс-расчета для анализа, прогноза и контроля аэроионного режима в помещениях;

- выполнить программную реализацию и верификацию разработанных численных моделей;
- разработать специальное программное обеспечение для оценки, контроля и управления параметрами аэроионного режима в помещении;
- провести исследования изменения концентрационных полей аэроионов на компьютеризованных рабочих местах и в помещениях при использовании различных способов организации режима искусственной ионизации, провести анализ полученных результатов;
- внедрить результаты исследований на производстве.

Объект исследования – процесс рассеивания аэроионов в помещениях при искусственной ионизации воздуха.

Предмет исследования – параметры искусственной ионизации воздуха в помещениях с компьютеризованными рабочими местами, обеспечивающие комфортные условия труда.

Методы исследования. Для достижения цели и решения поставленных задач в работе использован комплексный метод, включающий анализ научно-технической и нормативно-правовой литературы по вопросам обеспечения аэроионного режима в помещениях, применение методов численного моделирования на основе фундаментальных многомерных уравнений аэродинамики, электростатики и массопереноса. Численное интегрирование моделирующих уравнений проводилось с использованием абсолютно устойчивых разностных алгоритмов.

Для верификации разработанных численных моделей проведены физические эксперименты и расчеты на базе аналитических моделей.

Научная новизна полученных результатов:

- впервые установлены закономерности распределения концентрации отрицательных и положительных аэроионов в помещении в зависимости от пространственных характеристик помещения и режима искусственной ионизации;

– впервые установлены зависимости изменения параметров аэроионного режима при применении регулирующих экранов внутри помещения с учетом динамики воздушного потока, электрического поля заряженных частиц, диффузии и эмиссии ионов;

– впервые разработана численная модель, позволяющая обосновать параметры нормализации аэроионного режима в помещениях при искусственной ионизации воздуха с учетом аэродинамических свойств воздушной среды, рекомбинации ионов и их дрейфа под действием электростатических полей, что позволяет проводить прогноз и управление аэроионным режимом по требованиям санитарных норм при аэроионизации воздуха в помещении;

– усовершенствован метод оценки и контроля аэроионного режима в помещениях, основанный на применении балансовой модели, позволяющий учесть кратность воздухообмена и эмиссию аэроионов и пыли в помещении с компьютеризованными рабочими местами.

Практическая ценность полученных результатов:

– разработана численная модель, позволяющая проводить обоснование параметров нормализации аэроионного режима с учетом аэродинамических свойств воздушной среды, рекомбинации ионов и их дрейфа под действием электростатических полей в условиях искусственной ионизации воздуха в помещениях;

– усовершенствован метод оценки и контроля аэроионного режима, особенностью которого является учет кратности воздухообмена и эмиссии аэроионов и пыли в помещении с компьютеризованными рабочими местами;

– разработанный программный код может быть использован для прогноза аэроионного режима в производственных помещениях без ограничения их функциональной направленности, а также в специализированных «чистых» помещениях;

– проведено внедрение результатов работы в практику предприятий Днепровский завод строительных материалов, ООО ПКФ «Біотон» для

анализа и прогноза параметров аэроионного режима при разработке мероприятий по нормализации качества воздушной среды в рабочих помещениях предприятий, что позволяет обеспечивать выполнение санитарных норм при аэроионизации воздуха в помещении;

– материалы диссертационной работы использованы в учебном процессе ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры» при преподавании курсов «Санитарно-гигиенические основы специальности» и «Кондиционирование воздуха» и выполнении магистерских работ по специальности 192 «Строительство и гражданская инженерия» (специализация «Теплогазоснабжение и вентиляция»).

Личный вклад соискателя в научных трудах, опубликованных в соавторстве, заключается в:

– выполнении анализа современных методов оценки параметров аэроионного режима в помещениях и рабочих зонах [10, 12, 14, 17, 20, 23, 109];

– разработке численной модели для оценки аэроионного режима в помещениях и в рабочих зонах при различных способах ионизации воздуха [6, 8 – 15, 17 – 20, 23, 109, 110];

– разработке численной модели для экспресс-прогноза аэроионного режима в помещениях на базе нуль-мерных уравнений баланса массы [11, 12, 15, 19 – 21, 110];

– разработке численной модели для оценки аэроионного режима в помещении при персонализированной подаче ионизированного воздуха в рабочую зону [12, 22];

– выполнении программной реализации разработанных моделей, проведении вычислительных экспериментов на их базе и осуществлении обработки результатов исследований [6, 8 – 15, 17 – 23, 93, 109, 110];

– выполнении тестирования разработанных численных моделей.

Апробация результатов диссертации. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Всеукраїнській науково-практичній

конференції студентів та молодих вчених «Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах» присвяченій 85-річчю ХНАДУ (Харьков, 2015); V Міжнародній науковій конференції молодих вчених та студентів «Екологія. Довкілля. Молодь» (Полтава, 2015); I Всеукраїнській науково-технічній конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (Днепропетровск, 2015); III Международной научно-практической конференции «Современные ресурсосберегающие технологии. Проблемы и перспективы» (Одесса, 2015); XV Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатики і моделювання» (Харьков, 2015); XIII Міжнародній науково-практичній конференції «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем» (Днепропетровск, 2015); Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених «Теоретичні та прикладні аспекти застосування інформаційних технологій в галузі природничих наук» (Одеса, 2016).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 18 научных работах, в том числе 10 – в изданиях, рекомендованных МОН Украины (из них 1 – без соавторов, 4 – в наукометрических изданиях), 7 тезисов докладов на научных конференциях, 1 монография.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, общих выводов, списка использованных источников и приложений. Общий объем диссертации 165 страниц. Помимо основного текста, изложенного на 132 страницах, диссертация содержит 76 рисунков, 10 таблиц, список использованных источников из 151 наименования на 20 страницах и приложения на 13 страницах.

РАЗДЕЛ 1

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА НА УСЛОВИЯ ТРУДА. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И КОНТРОЛЯ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В ПОМЕЩЕНИЯХ

1.1. Аэроионный режим в помещении. Влияние аэроионов на человека

Аэроионный режим в помещении представляет собой определенное сочетание концентраций аэроионов различной полярности и их изменение с течением времени. Согласно действующим нормативным документам [40], ионизация воздуха относится к вредным производственным факторам, поэтому в воздухе помещений с компьютеризованными рабочими местами должен быть соблюден определенный интервал концентраций аэроионов, отклонение от которого создает угрозу здоровью человека (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Нормативные величины ионизации воздуха рабочей среды
производственных и общественных помещений [76]

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 ДНАОП 0.03-3.06-80 [76] 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 [57, 80, 99, 105]. В чистом воздухе содержание положительных ионов несколько превышает количество отрицательных, в загрязненном – доля положительных ионов значительно возрастает.

В естественных условиях образование аэроионов происходит за счет процесса ионизации кислорода и газов, входящих в состав воздуха, под действием природного ионизирующего излучения [101, 105, 123]. 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 [2, 3, 36–38, 48, 49, 51, 52, 60, 65, 68]. Кроме этого, при отделке и мебелировке производственных 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 в виде аэрозолей, 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 вышперечисленное вызывает аэроионный дисбаланс, либо же большое превышение ионов положительной полярности [36–38, 69, 80, 85, 88, 100, 101, 105, 126, 128].

Значительное число публикаций отечественных и зарубежных ученых, посвященных именно методам обеспечения аэроионного режима в помещениях, свидетельствует об огромной важности качественного состава воздушной среды для здоровья, самочувствия и работоспособности человека [25, 26, 34, 36–38, 45, 65, 69, 80, 94, 96, 100, 101, 105, 116, 117, 131–133, 147].

Как показано значительным числом ученых [26, 34, 36–38, 45, 65, 69, 80, 94, 96, 101, 105, 117, 119, 125, 147], несоответствие ионного режима нормативным требованиям в воздухе может вызывать 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, оказывать отрицательное влияние на состав и физико-химические свойства крови и общий обмен веществ человека, приводить к снижению сопротивляемости стрессам, повышенной утомляемости, вялости, снижению скорости зрительных и слуховых реакций и как следствие, снижению внимания и работоспособности, что, в свою очередь, может являться причиной несчастных случаев.

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 [101] объясняет тем, что они влияют на основные электрообменные и физико-химические процессы в человеческом организме, нормализуя их интенсивность. Активное улучшение воздушной среды в жилых, рабочих и общественных помещениях путем обогащения воздуха аэроионами кислорода может существенно повысить работоспособность, уменьшить утомляемость, улучшить здоровье [36, 57, 64, 80, 101, 102, 105, 107, 121, 137, 139, 146]. Например, как показали результаты исследований, проведенные в период с 1973 по 1987 год на предприятиях полиграфической промышленности [107], применение аэроионизации привело к повышению работоспособности персонала, снижению заболеваемости, повышению производительности труда (табл. 1.2).

Также в работе [107] приведены данные по результатам клинических исследований, проведенных в 2000 году по заданию Научно-экологического центра им. А. Л. Чижевского среди операторов ПЭВМ. Отмечено, что в результате применения аэроионизации наблюдалось снижение утомляемости и повышение функциональной активности на 17,4 %; на 33 % возросла скорость реагирования к изменениям ситуации на экране; восприятие и запоминание информации повысилось на 46 %.

Таблица 1.2

Результаты исследований по применению искусственной аэроионизации на предприятиях полиграфической промышленности [107]

Снижение запыленности в помещениях	от 3 до 20 раз
Снижение электростатического заряда на картоне (бумаге)	от 5 до 30 раз
Снижение бактериальной обсемененности	от 2 до 8 раз
Снижение общей заболеваемости персонала	на 25 – 32 %
Число дней нетрудоспособности сократилось (по гриппу, ОРВИ, ОРЗ, фарингит, тонзиллит, болезни сердца) из-за гриппа – в 3 раза; из-за ОРЗ – на 15 %; из-за фарингита и тонзиллита – в 4,5 раза; из-за болезни сердца – на 25 %	на 39 %
Повышение зрительной производительности – без аэроионизации правильность считывания знаков снижалась – с аэроионизацией правильность считывания знаков снижалась	на 20 – 25 % на 6 – 8 %

Таким образом, создание и поддержание надлежащего аэроионного режима в помещениях с компьютеризованными рабочими местами является важной задачей, поскольку способствует сохранению здоровья и работоспособности человека.

1.2. Анализ существующих средств генерации аэроионов и средств контроля аэроионного режима в помещениях

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 [66, 105]: 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 [66, 105].

В настоящее время для поддержания аэроионного режима в помещениях в основном применяются электрические ионизаторы коронного разряда, которые могут быть следующих типов [61]: униполярные; биполярные; эффлювиальные; оснащенные вентилятором; работающие в режиме «темной» или «светящейся» короны.

К несомненным достоинствам современных ионизаторов следует отнести сравнительно небольшие габариты, легкий вес, транспортабельность, простоту обслуживания. Вместе с тем, данные о производительности ионизатора приводятся на расстоянии 1 м от него, нет возможности автоматического регулирования эмиссии ионов, зарубежные ионизаторы отличает высокая стоимость приборов.

На практике крайне важно знать не только параметры источников ионизации, но и параметры аэроионного режима в помещении. 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 [28, 47, 50, 54].

Достоинствами современных счетчиков ионов являются небольшие габариты, легкий вес, транспортабельность. При этом следует отметить, что используемые в Украине счетчики аэроионов типа «Сапфир», «Сигма», а также рекомендованные ДНАОП 0.03-3.06-80 [76] САИ-ТГУ и АСИ-1 дают большую погрешность порядка 40 % [27–29, 43, 54, 63]. Также следует подчеркнуть, что зарубежные счетчики аэроионов имеют значительную стоимость.

Кроме этого, необходимо отметить, что экспериментальное определение концентраций аэроионов на рабочих местах крайне затруднено в повседневной практике, что обусловлено малым количеством счетчиков аэроионов в организациях и на производствах, а в случае проведения анализа и прогноза аэроионного режима на стадии проектных работ такой подход, в принципе, неприменим. Также, следует подчеркнуть, что при большом разнообразии ионизаторов, проблемным вопросом остается точность

измерения отечественных приборов, а также обоснование места расположения ионизаторов в помещении.

1.3. Анализ существующих методов оценки и прогноза параметров аэроионного режима в помещениях

Поскольку целью данной работы является обоснование параметров нормализации аэроионного режима в помещениях при искусственной ионизации воздуха путем моделирования процесса рассеивания аэроионов, прогноз и управление указанными показателями, то рассмотрим методы, применяемые в настоящее время в Украине и за рубежом для проведения анализа, оценки и прогноза аэроионного режима в помещениях.

Экспериментальные исследования. В настоящее время к результатам экспериментальных исследований предъявляются очень высокие требования, что связано с созданием и внедрением в практику зарубежных исследований [115, 124, 134, 141–143, 145] высококлассного экспериментального оборудования. Это оборудование дает возможность непосредственно в рабочем помещении, в рабочих зонах («full scale tests») измерять различные параметры воздушной среды: скорость воздушного потока, температуру, количество ионов и т.д. Таким образом, постановка и проведение «full scale experiments» требует 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 рисунках 1.1 – 1.2 показаны примеры тестовых помещений для проведения экспериментальных исследований [134, 145].



Рис. 1.1. Подготовка физического эксперимента по исследованию параметров воздушной среды в офисном помещении [134]



Рис. 1.2. Экспериментальное оборудование в комнате для исследования параметров воздушной среды [145]

Также важно подчеркнуть, что «full scale experiment» проводится для серии задач. Так, на рисунке 1.3 показаны схемы расположения вентиляционных отверстий в помещении, для которых проводились исследования [145].

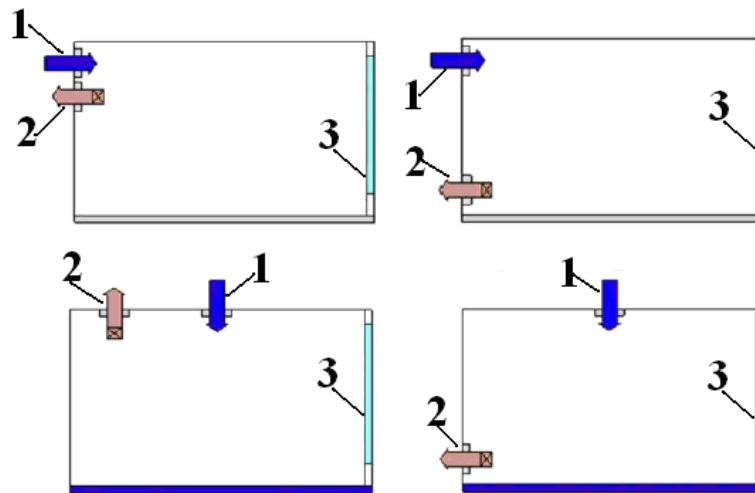


Рис. 1.3. Расположение отверстий системы вентиляции [145]: 1 – входное отверстие, 2 – выходное отверстие; 3 – окно

Результаты экспериментальных исследований параметров аэроионного режима в помещениях, проведенных в Украине, можно найти в работах [30, 35, 41, 45, 54, 61, 77–79, 88, 90].

Следует подчеркнуть, что если на основе экспериментальных данных формулируются некоторые закономерности, то сфера их применения будет ограничена условиями проведения эксперимента, и, без надлежащего обоснования, такие закономерности не могут быть использованы для условий, отличных от экспериментальных.

Графоаналитические методы и регрессионные модели. В некоторых случаях для расчета параметров аэроионного режима используются графоаналитические методы [28, 31, 81, 104], которые построены на основе анализа и обработки данных, полученных в результате эксперимента. Например, в работе [31] разработан графоаналитический аппарат для прогноза распространения аэроионов в рабочих помещениях с несколькими источниками ионизации воздуха и даны рекомендации по практическому использованию данного 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 [31].

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: простоту 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 воздушного потока, 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 ионизатора [30, 82–84, 95–98, 106, 148]. Например, в работе [30] приведена регрессионная модель для оценки концентрации отрицательных аэроионов в помещении вида:

$$n = 1,7947L^2 - 27,5L + 113,4; \quad (1.1)$$

$$R^2 = 0,97; \quad (1.2)$$

где n – концентрация отрицательных аэроионов; L – расстояние от источника аэроионов; R – достоверность аппроксимации.

В работе [148] для оценки концентрации отрицательных аэроионов предложена модель вида:

$$y = 2,8 \times 10^6 \exp(ax), \quad (1.3)$$

где y – средняя концентрация отрицательных аэроионов; x – расстояние от коронирующего электрода; a – коэффициент регрессии.

Автором работы [98] разработан комплекс регрессионных моделей для оценки концентрации отрицательных аэроионов. Вид данных регрессионных моделей показан на рисунке 1.4.

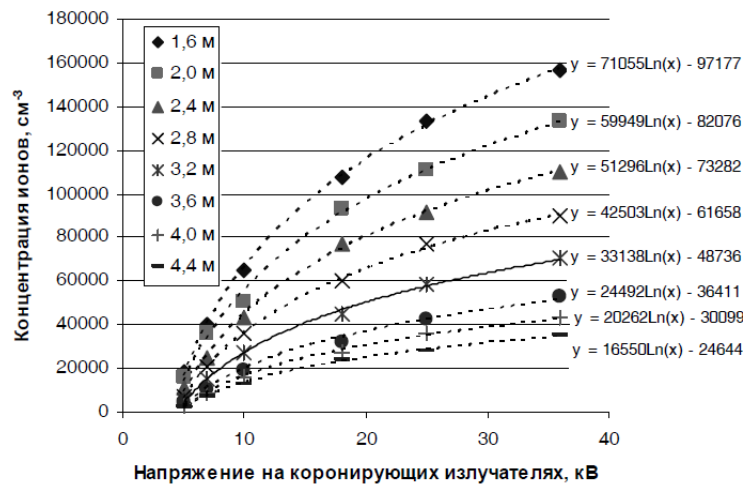


Рис. 1.4. Зависимость концентрации аэроионов от напряжения на излучателях $U_{корон}$ при различных расстояниях до ионизатора [98]

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.

Аналитические модели. Для оценки аэроионного режима в помещениях часто используются одномерные уравнения переноса примеси, для которых можно найти аналитические решения [1, 4, 29–34, 43, 54–56, 77, 86–92]. Рассмотрим эти уравнения.

Так, в работе [54] для анализа концентрации аэроионов используется уравнение массопереноса вида:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g - D \left(\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \right) + \frac{n - n_0}{\tau} + \frac{\partial n}{\partial x} V, \quad (1.4)$$

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 [56] для определения концентрации аэроионов применено следующее уравнение массопереноса, записанное в сферической системе координат (рис. 1.5):

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g + D \left(\frac{\partial^2 n}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial n}{\partial r} \right) - \gamma n^2, \quad (1.5)$$

где n – концентрация аэроионов; g – генерация ионов; D – коэффициент диффузии; r – расстояние до точки определения; γ – коэффициент рекомбинации.

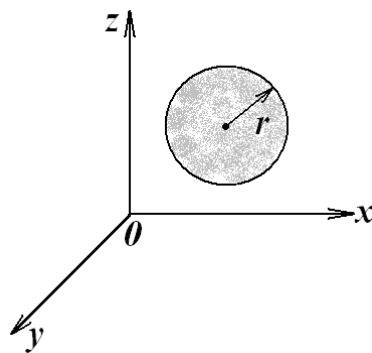


Рис. 1.5. К расчету концентрации ионов в сферической системе координат

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.) [56]. Отметим, что при определенных условиях данное уравнение имеет аналитическое решение [70].

В работе [29] для рассеивания аэроионов используют уравнение вида:

$$D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - g + \frac{n - n_0}{\tau} = 0, \quad (1.6)$$

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 [29]:

$$n(x) = g \tau e^{\frac{l-x}{\sqrt{D\tau}}} + g \tau, \quad (1.7)$$

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

Интерес представляет модель авторов работы [92], 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. 1.6) [91]. 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 [92]:

$$\Delta N^\pm = \Delta N_x^\pm \exp \left[-\frac{\sigma}{2} \left(\frac{r}{c \cdot x} \right)^2 \right], \quad (1.8)$$

где ΔN^\pm и ΔN_x^\pm – избыточные концентрации аэроионов положительной (верхний знак «+») и отрицательной (нижний знак «-») полярности в произвольной точке струи, заданной координатами x и r , и на оси струи, соответственно, которые определяются из соотношений [92]:

$$\Delta N_x^\pm = (n_x^\pm + N_x^\pm) - (n_\infty^\pm + N_\infty^\pm), \quad (1.9)$$

$$\Delta N^\pm = (n^\pm + N^\pm) - (n_\infty^\pm + N_\infty^\pm); \quad (1.10)$$

где n^\pm , n_x^\pm , n_∞^\pm – концентрации легких положительных и отрицательных аэроионов в произвольной точке, на оси и в окружающей среде соответственно; N^\pm , N_x^\pm , N_∞^\pm – концентрации тяжелых положительных и отрицательных аэроионов в произвольной точке, на оси и в окружающей среде соответственно; σ – экспериментальная постоянная, вероятное значение которой равно 0,8.

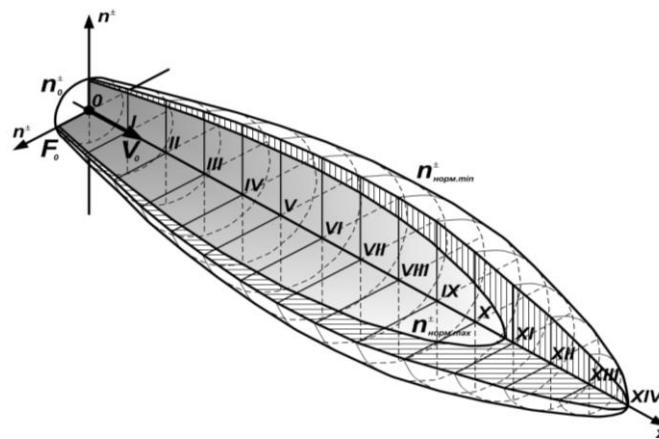


Рис. 1.6. Схематическое изображение физической модели процесса создания полей избыточных концентраций аэроионов в приточной струе в рабочей зоне помещения [91]

В целом, к достоинствам аналитических моделей можно отнести следующие: возможность учета основных физических параметров, таких как скорость, диффузия, интенсивность эмиссии ионов; быстрый расчет; удобство для программирования.

Как недостатки моделей данного класса необходимо выделить следующие: отсутствие возможности определения концентрационного поля аэроионов в помещениях и в рабочих зонах; отсутствие учета влияния мебели, оборудования, различных препятствий, расположенных в помещении на процесс рассеивания аэроионов; отсутствие возможности учета мест

расположения источников ионизации в помещении; проблема «воспроизведения» в модели ограниченного твердыми стенками пространства.

Нуль-мерные модели. За рубежом, для расчета концентрации ионов достаточно широко используются нуль-мерные (балансовые) модели. Эти модели относятся к группе так называемых «Black Box Models». Так, в работе [127] предложена нуль-мерная модель вида:

$$\frac{dn}{dt} = q_n - \alpha np - \beta nA + n_0 \frac{Q}{V} - n \frac{Q}{V} - \lambda_i n, \quad (1.11)$$

$$\frac{dp}{dt} = q_p - \alpha np - \beta pA + p_0 \frac{Q}{V} - p \frac{Q}{V} - \lambda_i n, \quad (1.12)$$

где q_n , q_p – скорость генерации соответственно отрицательных и положительных ионов в помещении; n_0 , p_0 – концентрации отрицательных и положительных ионов, поступающие извне в помещение; n , p , A – текущие концентрации отрицательных, положительных аэроионов и пыли соответственно; α – скорость рекомбинации ионов с ионами противоположной полярности; β – скорость комбинации ионов с частицами пыли; A – концентрация частиц пыли; V – объем; Q – объем воздуха, входящий в помещение в единицу времени; λ_i – электростатическое осаждение ионов.

В работе [116] рассмотрена более простая нуль-мерная модель вида:

$$\frac{dn}{dt} = q_n - \alpha np - \beta nA, \quad (1.13)$$

$$\frac{dp}{dt} = q_p - \alpha np - \beta pA, \quad (1.14)$$

где q_n , q_p – скорость генерации соответственно отрицательных и положительных ионов в помещении; n , p , A – текущие концентрации

отрицательных, положительных аэроионов и пыли соответственно; α – скорость рекомбинации ионов с ионами противоположной полярности; β – скорость комбинации ионов с частицами пыли.

Как правило, рассмотренные уравнения решаются численно, хотя при определенных краевых условиях данные уравнения имеют аналитическое решение [108].

Несомненными достоинствами данных моделей является: возможность быстрого расчета; возможность учета некоторых важных параметров моделируемого процесса (параметры воздухообмена, параметры процесса взаимодействия ионов различной полярности друг с другом и с частицами пыли); достаточная для инженерных задач точность расчета.

Вместе с тем, следует отметить некоторые недостатки данных моделей: нет возможности учета аэродинамики воздушных потоков в помещении; нет учета влияния различных препятствий (мебели, оборудования и т.п.) на процесс рассеивания аэроионов в помещении; нет возможности учета места расположения ионизатора в помещении; модель дает прогнозное значение концентрации аэроионов не в самом помещении, а на выходе из него.

CFD модели. Анализ литературных источников по прогнозу аэроионного режима в помещениях показал отсутствие многомерных CFD моделей для решения задач данного класса в Украине. Данное научное направление активно развивается в настоящее время за рубежом [112–114, 116, 118, 120, 131–133, 144, 149].

Следует подчеркнуть, что за рубежом достигнут существенный прогресс в создании CFD моделей для анализа параметров воздушной среды в помещениях. Созданные в настоящее время зарубежные CFD модели позволяют воспроизводить различные объекты, размещенные в помещении и учитывать их влияние на формирование концентрационных полей, полей температуры и т.п. в помещениях. Например, на рисунке 1.7 рассмотрено офисное помещение, для которого была построена геометрическая модель (рис. 1.8), а затем разработана численная модель, результаты расчета по

которой показаны на рисунке 1.9 [120]. Результаты расчета, приведенные на рисунке 1.9 показательны тем, что процесс распространения тепла в вентилируемом помещении описывается дифференциальным уравнением, имеющим ту же форму, что и уравнение массопереноса, используемое для расчета переноса аэроионов, с тем отличием, что параметр концентрации заменяется параметром температуры в помещении, коэффициенты диффузии – коэффициентом температуропроводности, а источник эмиссии тепла – источником эмиссии ионов.



Рис. 1.7. Конференц-зал, для которого была создана CFD модель [120]

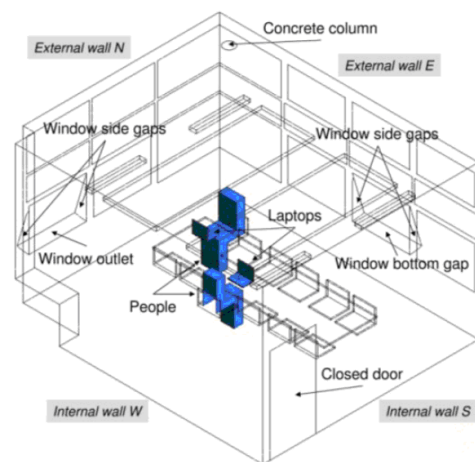


Рис. 1.8. Геометрия моделируемого конференц-зала [120]

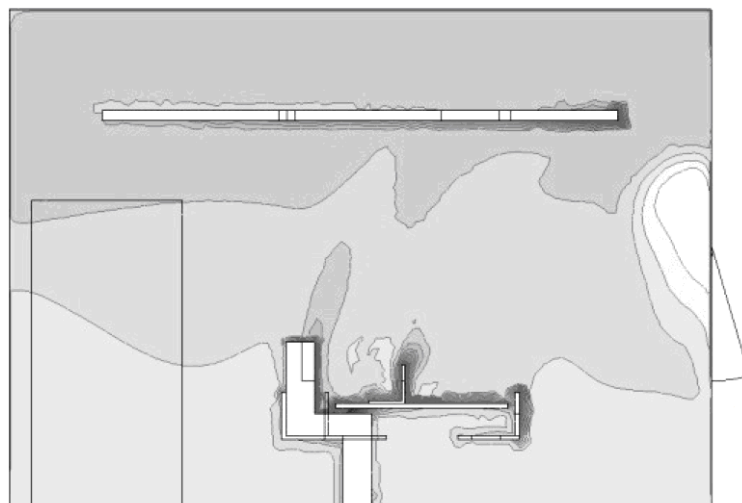


Рис. 1.9. CFD моделирование температурного поля в конференц-зале [120]

Иногда в зарубежных расчетах рассматриваются упрощенные схемы рабочих помещений, например, как показано на рисунке 1.10, где представлена геометрия моделируемого помещения; расчет аэродинамики воздушных потоков для данного помещения выполнен на основе уравнений Навье-Стокса [138].

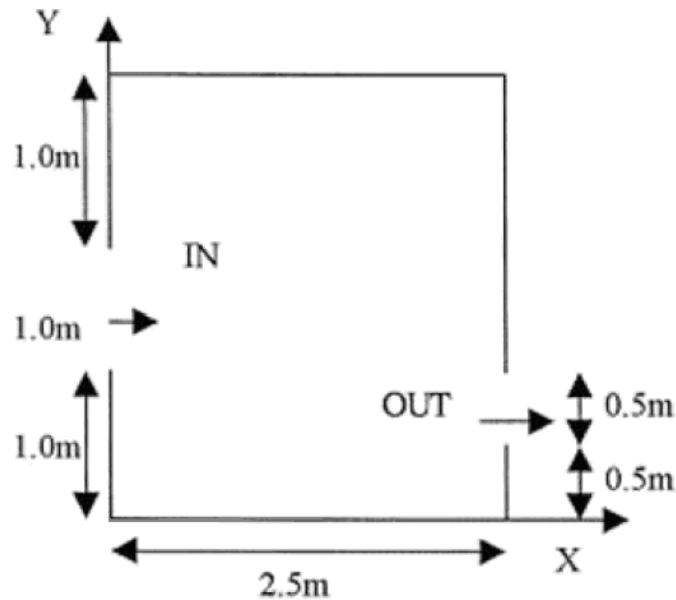


Рис. 1.10. Расчетная схема помещения [138]

Основой для CFD моделирования аэроионного режима, согласно [131] является уравнение массопереноса вида:

$$\frac{\partial}{\partial x}(n(bE + u)) + \frac{\partial}{\partial y}(n(bE + v)) = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_y \frac{\partial v}{\partial y}\right), \quad (1.15)$$

где n – концентрация отрицательных ионов; u , v , – компоненты вектора скорости; D_x , D_y – коэффициенты диффузии; t – время; b – коэффициент подвижности ионов; E – напряженность электрического поля.

Для расчета поля скоростей воздушного потока в помещении используются двумерные уравнения Навье-Стокса [131].

Полученные авторами работы [131] результаты CFD моделирования аэроионного режима в помещении представлены на рисунках 1.11 и 1.12, где

показаны схема моделируемого помещения и распределение концентрации отрицательных ионов соответственно.

Анализ литературных источников показал, что за рубежом при проведении расчетов концентрационных полей аэроионов для решения аэродинамической задачи использовались коммерческие пакеты программ типа FLUENT, VORTEX, ANSYS [116, 120, 131–133, 144, 149–151] и др., то есть авторы, которые работают в области оценки аэроионного режима, как правило, не создают своих программных кодов.

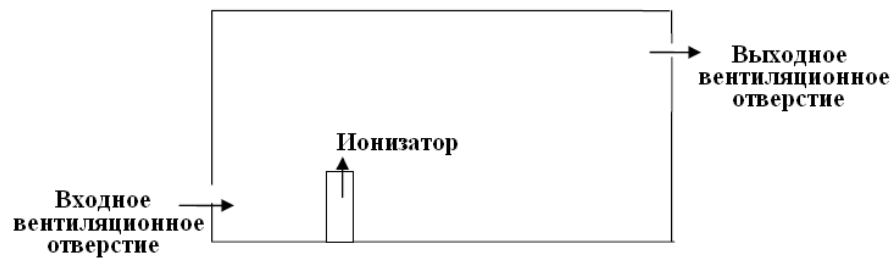


Рис. 1.11. Схема помещения для 2D CFD моделирования аэроионного режима [131]



Рис. 1.12. Распределение концентрации отрицательных ионов в помещении [131]

Обсуждая проблему CFD моделирования аэроионного режима в помещениях, в частности, на базе уравнений Навье-Стокса, следует подчеркнуть, что в настоящее время нет возможности математическим путем определять параметры воздушного потока в помещении с высокой

точностью, что связано с формированием турбулентных потоков в этих помещениях, а как известно, математическое моделирование турбулентных течений является на данный момент времени главной гидродинамической проблемой. Поэтому, нередко наблюдается значительное расхождение между данными, полученными в результате проведения эксперимента и данными численного моделирования. Пример такого расхождения показан на рисунке 1.13 [140].

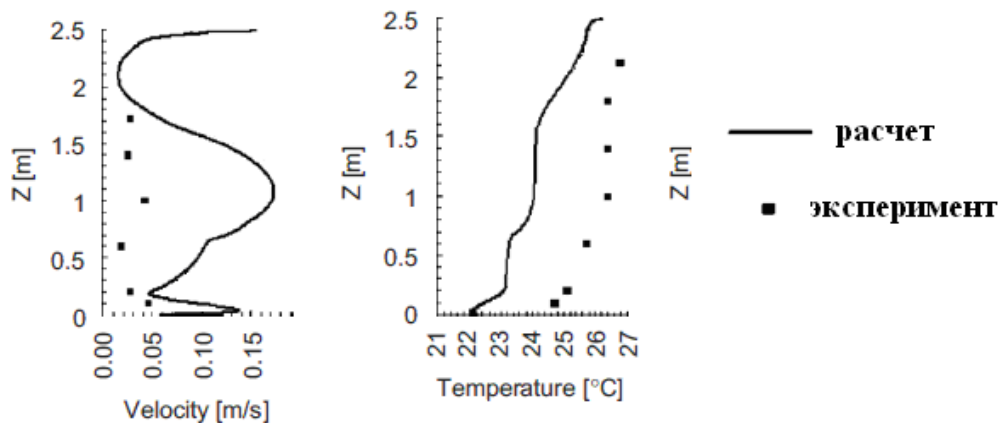


Рис. 1.13. Сравнение численных и экспериментальных данных [140]

Кроме этого, как известно [129, 130], численное решение аэродинамической задачи на базе уравнений Навье–Стокса требует использования очень мелкой сетки, что предъявляет высокие требования к объему памяти и быстродействию компьютера.

К преимуществам CFD моделей можно отнести следующие: возможность воспроизведения в модели большой детализации помещения, почти эквивалентной физическому эксперименту (учет столов, стульев, стеллажей, их размеров и формы и т.д.); возможность определения концентрации ионов в любой интересующей области в помещении (над стулом, под столом и т.д.); значительно меньшее время на проведение вычислительного эксперимента, чем на постановку и проведение физического эксперимента, что, соответственно приводит к меньшим экономическим затратам; удобство для анализа получаемых результатов

(визуализация концентрационного поля) в помещениях, в рабочих зонах, в месте расположения органов дыхания и т.д., что позволяет принимать рациональные решения по улучшению параметров воздушной среды в целом и аэроионного режима в частности.

Однако, следует отметить следующие недостатки CFD моделей: требуется высокая квалификация пользования для проведения CFD эксперимента; в ряде случаев расчет одного варианта задачи на базе уравнений Навье-Стокса требует несколько суток машинного времени; в настоящее время отсутствует универсальная модель турбулентности, что оставляет открытой проблему обоснования конкретной модели турбулентности для конкретных задач переноса аэроионов в помещениях.

Таким образом, на основе аналитического обзора существующих методов и моделей для прогноза аэроионного режима в помещениях можно сделать следующие выводы:

1. Существующие статистические модели или модели, основанные на аналитическом решении одномерного уравнения массопереноса не позволяют получать прогнозную информацию о параметрах аэроионного режима в помещении или на рабочем месте с учетом формы помещения, его геометрических характеристик, наличия мебели и т.д.

2. Применение CFD моделирования на базе уравнений Навье-Стокса требует использование мощных компьютеров и больших затрат компьютерного времени при практической реализации модели. Поэтому модели данного класса еще не могут быть повседневным инструментом решения прогнозных задач, связанных с изучением аэроионного режима в помещениях.

3. В связи с вышесказанным возникает необходимость в разработке CFD моделей, учитывающих основные физические параметры переноса аэроионов в помещениях, и при этом требующих минимальных затрат компьютерного времени.

Выводы по разделу 1

1. На основании анализа литературных источников установлено, что создание и поддержание требуемого аэроионного режима в помещениях с компьютеризованными рабочими местами является важной задачей, поскольку способствует сохранению здоровья человека за счет обеспечения комфортных условий труда.

2. В настоящее время постановка и проведение физического эксперимента для оценки и контроля аэроионного режима в офисных помещениях требуют применения дорогостоящего, порой уникального оборудования, и больших временных затрат на постановку и проведение эксперимента. Поэтому физический эксперимент не может служить каждодневным инструментом для анализа аэроионного режима в помещениях различного назначения.

3. В Украине для прогноза аэроионного режима в офисных помещениях используются в настоящее время упрощенные методики расчета – графоаналитические, регрессионные, аналитические. Данные методики позволяют быстро получить прогнозную информацию, но могут быть применены только для локального прогноза аэроионного режима, поскольку имеют ряд существенных недостатков – нет учета аэродинамики воздушных потоков в помещении; нет учета влияния различных препятствий (мебели, оборудования и т.п.) на процесс рассеивания аэроионов в помещении; нет возможности учета места расположения ионизатора в помещении. В Украине отсутствуют методики, позволяющие оценивать концентрацию аэроионов на различных расстояниях от ионизаторов и по всему помещению.

4. За рубежом для проведения серийных расчетов аэроионного режима нередко используются специальные методы экспресс-расчета, в частности, упрощенная балансовая модель. В Украине аналогичные методики отсутствуют, поэтому возникает необходимость в разработке методов,

основанных на применении балансовой модели, позволяющих прогнозировать и контролировать параметры аэроионного режима в помещениях.

5. Как показал анализ литературных источников, за рубежом наиболее активно развивается научное направление, связанное с развитием CFD моделей для прогнозирования аэроионного режима в помещениях. В настоящее время модели данного класса в Украине отсутствуют, поэтому актуальной задачей является разработка CFD моделей для оценки, прогноза и контроля параметров аэроионного режима в помещениях, а также создание на базе разработанных моделей специального программного обеспечения, что позволит оценивать, контролировать и управлять параметрами аэроионного режима в помещениях для обеспечения комфортных условий труда.

РАЗДЕЛ 2

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАССЕЙВАНИЯ АЭРОИОНОВ В ПОМЕЩЕНИИ С УЧЕТОМ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ДАННЫЙ ПРОЦЕСС

2.1. Общие положения. Методика выполнения исследований

Поскольку целью диссертационной работы является обоснование параметров нормализации аэроионного режима в помещениях при искусственной ионизации воздуха путем моделирования процесса рассеивания аэроионов для обеспечения комфортных условий труда на компьютеризованных рабочих местах и в помещениях, то в этом и последующем разделах поэтапно рассматривается создание CFD (computational fluid dynamic model) моделей, на базе которых затем разрабатывается специальное программное обеспечение, позволяющее оценивать, прогнозировать и контролировать параметры аэроионного режима в помещениях. Поскольку CFD модель – это неразрывное сочетание трех факторов [44, 62, 71, 112, 130–133, 144], а именно, математической модели, численного метода решения и программной реализации, то последовательно рассмотрим все эти факторы.

В данном разделе рассматриваются математические модели переноса аэроионов в помещении, основанные на фундаментальных законах механики сплошной среды и электростатики и учитывающие при моделировании практически все физические факторы, влияющие на этот процесс. Эти уравнения составляют платформу разработанного программного обеспечения. Разработка осуществляется в определенной последовательности [16, 24, 53, 72–75, 103, 116, 120, 129, 130–133, 140, 144]:

1. Построение физической концепции исследуемого процесса (рабочая гипотеза).

2. Создание численной модели исследуемого процесса (рис. 2.1).
3. Разработка программ для персонального компьютера, реализующих численные модели.
4. Проверка адекватности разработанного программного обеспечения (кода).
5. Проведение исследований параметров аэроионного режима в помещениях на базе разработанного программного обеспечения.

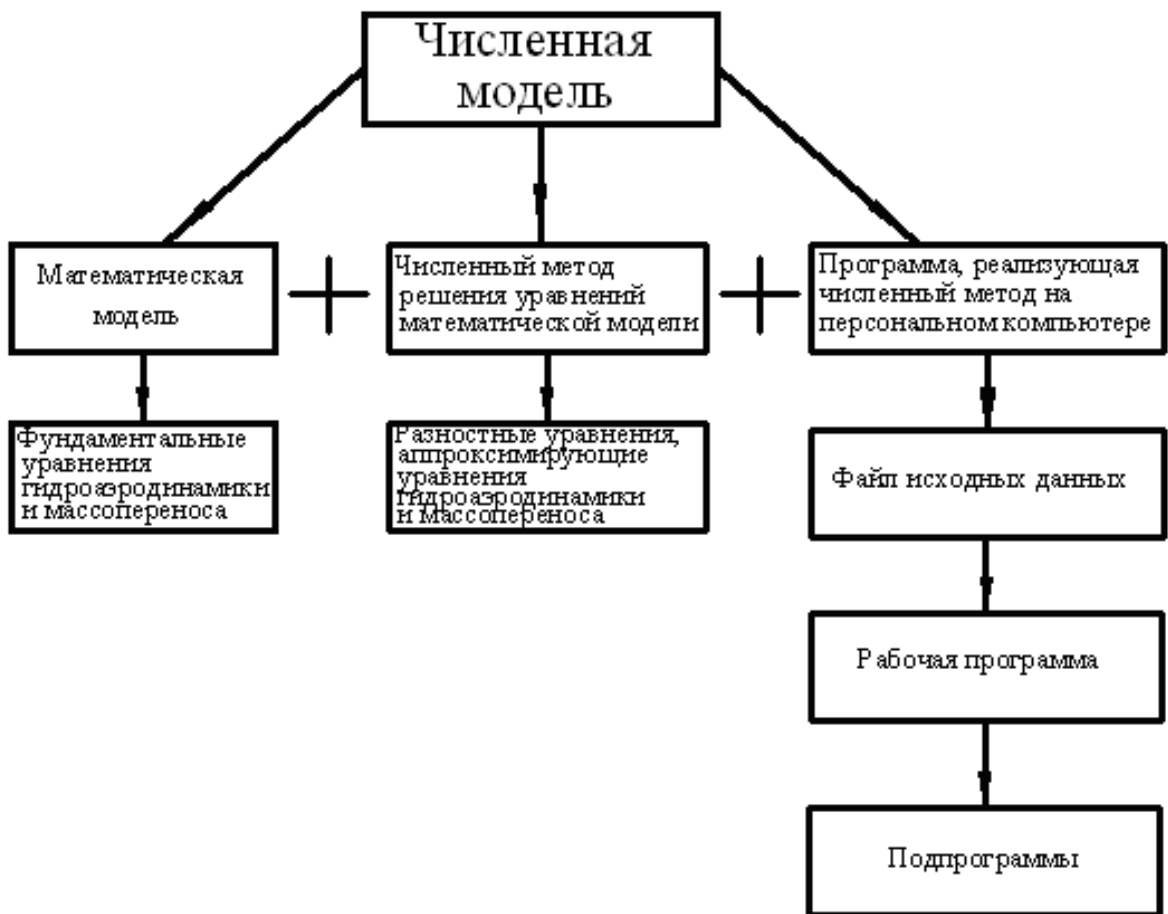


Рис. 2.1. Структурная схема CFD модели

Таким образом, в диссертационной работе для исследования используется CFD моделирование как основной инструмент теоретического решения задач прогноза аэроионного режима в помещениях.

2.2. Особенности рассматриваемого класса задач анализа и прогноза аэроионного режима в помещениях

Прежде чем перейти к построению моделей для анализа и прогноза аэроионного режима в помещениях, выделим особенности данного класса задач, которые принципиально усложняют решение:

1. Наличие в помещениях объектов (рис. 2.2), влияющих на аэродинамику воздушных потоков (мебели, оборудования и т.п.).
2. Различный режим вентиляции помещений.
3. Различное положение в помещении отверстий вентиляции.
4. Наличие в помещении источников положительных ионов, пыли.
5. Возможность установки в помещении регулирующих экранов.

Необходимо подчеркнуть, что, согласно современным требованиям, предъявляемым к численным моделям, перечисленные факторы должны быть учтены, чтобы иметь возможность анализировать влияние каждого фактора и их совокупности в целом.



Рис. 2.2. Помещение с компьютеризованными рабочими местами

Кроме этого, в числе современных требований, предъявляемых к математическим моделям, обязательно указывается возможность их использования для получения новых знаний, новой информации, что, как известно, не могут сделать статистические модели, поскольку основаны на обработке уже существующих знаний.

Таким образом, рассмотренные в разделе 2 и 3 математические модели ориентированы на решение многофакторных задач формирования аэроионного режима в помещениях с учетом перечисленных особенностей.

2.3. Разработка математической модели рассеивания ионов в помещении с учетом движения воздушного потока

Разработку математической модели процесса рассеивания ионов в помещении будем вести в предположении, что воздушная среда в помещении, с аэродинамической точки зрения – несжимаемая жидкость [39, 59, 131].

Рассмотрим воздушное пространство внутри помещения, введем декартовую систему координат и выделим в помещении некоторый контрольный объем в виде параллелепипеда, с ребрами длиной dx , dy , dz (рис. 2.3). Примем, что концентрация ионов на входе в выделенный объем равна C .

Рассмотрим перенос ионов в направлении оси x . Будем считать, что на левой грани параллелепипеда площадью $dydz$ скорость воздушного потока равна u . Тогда для правой грани рассматриваемого объема можем записать:

$$u + du = u + \frac{\partial u}{\partial x} dx, \quad (2.1)$$

$$C + dC = C + \frac{\partial C}{\partial x} dx. \quad (2.2)$$

При движении потока ионов за время dt через левую грань внутрь контрольного объема войдет масса ионов, равная:

$$(Cu)dydzdt. \quad (2.3)$$

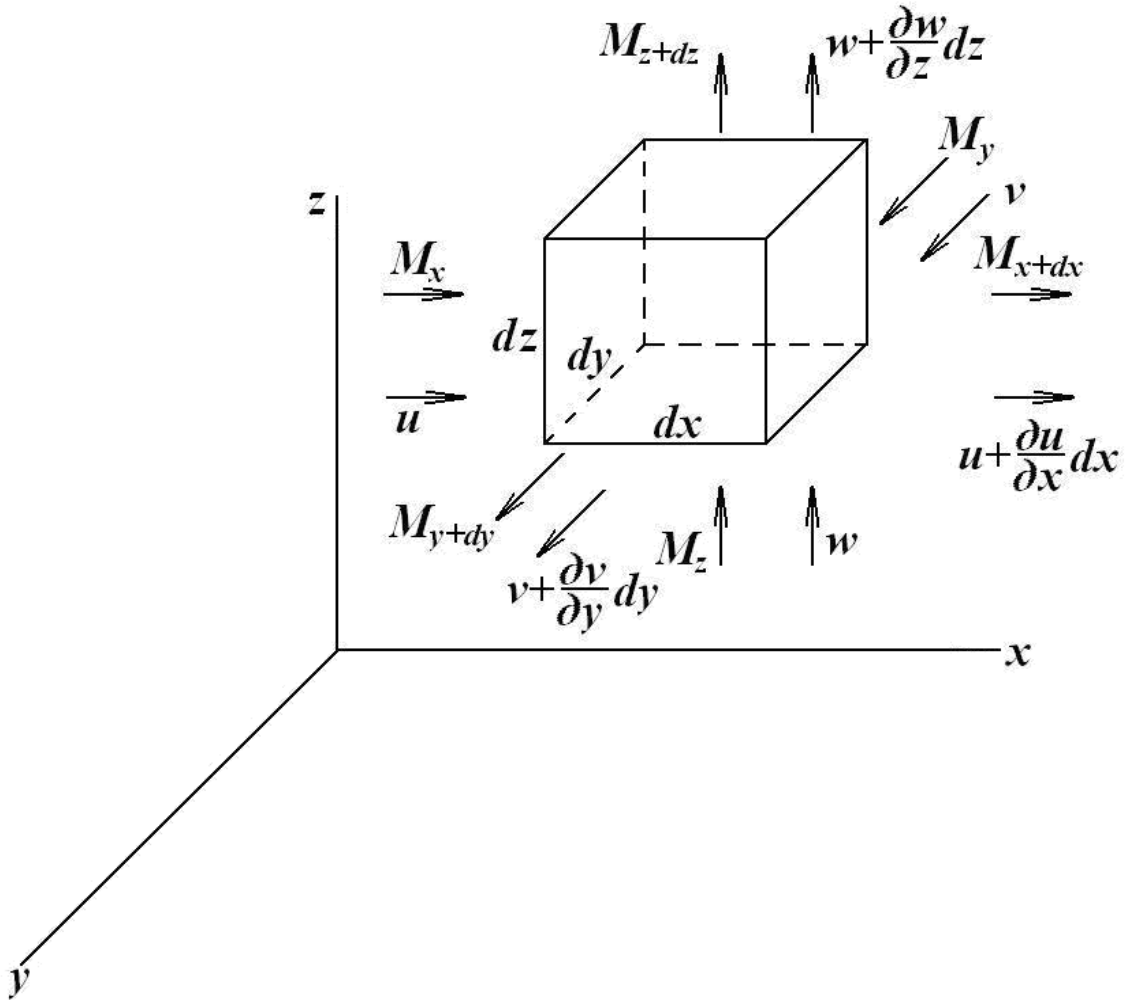


Рис. 2.3. Контрольный объем внутри помещения

По истечении времени dt через правую грань рассматриваемого объема выйдет масса ионов, равная:

$$\left(uC + \frac{\partial uC}{\partial x} dx \right) dydzdt. \quad (2.4)$$

В общем случае процесс переноса ионов осуществляется путем как конвективного переноса, так и за счет диффузионного переноса. Пусть

коэффициент диффузии в направлении оси x равен μ_x , тогда масса ионов, вошедшая через левую грань контрольного объема, может быть определена как:

$$M_x = -\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} dzdydt, \quad (2.5)$$

в то время как масса ионов, уходящая через правую грань параллелепипеда, будет равна:

$$M_{x+dx} = M_x + \frac{\partial M_x}{\partial x} dx = \left(-\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) dx \right) dzdydt. \quad (2.6)$$

Тогда для суммарного переноса ионов за счет конвекции и диффузии в направлении оси x можем записать следующее выражение для изменения массы ионов в выделенном объеме:

$$\begin{aligned} \left(uC + \frac{\partial uC}{\partial x} dx + M_x + \frac{\partial M_x}{\partial x} dx \right) dydzdt - (uC + M_x) dydzdt = \\ = \left(\frac{\partial uC}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right) dx dy dz dt. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Аналогично можно записать выражения для изменения массы ионов в рассматриваемом объеме за счет суммарного конвективного и диффузионного переноса в направлении координатных осей y и z :

$$\left(\frac{\partial vC}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right) dx dy dz dt, \quad (2.8)$$

$$\left(\frac{\partial wC}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right) dx dy dz dt, \quad (2.9)$$

где v , w – компоненты вектора скорости потока ионов;

μ_y, μ_z – коэффициенты диффузии в направлении координатных осей y и z соответственно.

С другой стороны, это же накопление массы ионов в рассматриваемом объеме может быть выражено через изменение концентрации ионов во времени:

$$\frac{\partial C}{\partial t} dx dy dz. \quad (2.10)$$

Тогда, учитывая последнее выражение, а также полученные выше выражения для определения потока ионов через грани рассматриваемого объема, запишем уравнение переноса массы ионов в выделенном объеме как [62]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right). \quad (2.11)$$

Численное решение уравнения (2.11) представляет собой существенную трудность, поэтому имеет смысл упростить его, и вместо уравнения (2.11) рассматривать его двухмерный аналог [62]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right). \quad (2.12)$$

Отметим, что для данного уравнения (2.12) ось y направлена вертикально, а усредненная по ширине помещения концентрация ионов может быть определена следующим образом:

$$C = \frac{1}{B} \int_0^B C(x, y, z) dy, \quad (2.13)$$

где B – ширина помещения.

Полученное уравнение (2.12), учитывающее основные физические факторы, влияющие на формирование аэроионного поля, в дальнейшем будет использоваться для исследования процесса рассеивания аэроионов в помещении.

2.4. Разработка математической модели рассеивания аэроионов и пыли в помещениях с учетом взаимодействия ионов различной полярности

Известно, что на формирование концентрационного поля аэроионов в помещении оказывает влияние комплекс физических факторов: поток воздуха, вызванный работой вентиляции, диффузия, воздействие электрического поля. В предыдущем разделе, опираясь на закон сохранения массы, было получено уравнение, описывающее распространение ионов за счет диффузии и конвекции. Кроме этих процессов, происходит взаимодействие ионов различной полярности и взаимодействие их с частицами пыли. Для учета этих процессов, при моделировании рассеивания аэроионов, в работе применено уравнение рассеивания в виде, приведенном в работе [131]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(u + bE)C}{\partial x} + \frac{\partial(v + bE)C}{\partial y} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \alpha CB - \beta CD + \\ & \quad + \sum Q_{C_i}(t) \delta(x - x_c) \delta(y - y_c), \end{aligned} \quad (2.14)$$

где C , B , D – концентрация отрицательных, положительных аэроионов и частиц пыли соответственно;

u , v – компоненты вектора скорости движения воздушного потока в помещении;

$\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициенты диффузии;

t – время;

α – скорость рекомбинации ионов, имеющих различную полярность;

β – скорость комбинации ионов с частицами пыли;

Q_{C_i} – интенсивность эмиссии отрицательных ионов в соответствующих

точках с координатами x_c, y_c ;

$\delta(x - x_c)\delta(y - y_c)$ – дельта-функция Дирака;

b – коэффициент мобильности ионов;

E – напряженность электрического поля.

Для описания процессов рассеивания положительных ионов и пыли будем использовать уравнение переноса вида (2.14), тогда уравнение, моделирующее рассеивание положительных аэроионов в помещении, будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial B}{\partial t} + \frac{\partial uB}{\partial x} + \frac{\partial vB}{\partial y} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial B}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial B}{\partial y} \right) - \alpha CB - \beta BD + \\ & + \sum Q_{B_i}(t) \delta(x - x_B) \delta(y - y_B). \end{aligned} \quad (2.15)$$

Уравнение, моделирующее перенос пыли, может быть записано следующим образом:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial uD}{\partial x} + \frac{\partial vD}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial D}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial D}{\partial y} \right) + \\ & + \sum Q_{D_i}(t) \delta(x - x_D) \delta(y - y_D). \end{aligned} \quad (2.16)$$

Обозначение физических параметров в этих уравнениях совпадает с аналогичными обозначениями, приведенными для уравнения (2.14).

В отличие от моделей, используемых в настоящее время, например, в Великобритании [131], в рассмотренных выше моделирующих уравнениях (2.14) – (2.16) учтено моделирование источника эмиссии отрицательных, положительных ионов и пыли, а также произведен учет рекомбинации ионов различной полярности друг с другом и частицами пыли. Кроме того, в работе [131] рассмотрено моделирование только процесса рассеивания отрицательных ионов, в то время как в диссертационной работе рассмотрено моделирование процесса рассеивания положительных аэроионов и переноса пыли.

Рассмотрим постановку граничных условий для уравнения переноса вида (2.14). Будем считать, что распространение ионов происходит в области R , которая имеет форму прямоугольника со сторонами L_x, L_y . На той границе расчетной области, где в помещение входит воздушный поток, ставится условие [62]:

$$C|_{\text{ex}} = C_\epsilon, \quad (2.17)$$

где C_ϵ – известное значение концентрации ионов (например, равное 0).

На той границе расчетной области, где происходит выход воздушного потока из помещения, ставится «мягкое» граничное условие [62, 71, 103] вида:

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0, \quad (2.18)$$

где n – единичный вектор внешней нормали к границе.

В численной модели это граничное условие записывается так [62, 71, 103]:

$$C(i+1, j) = C(i, j), \quad (2.19)$$

где $C(i+1, j)$ – концентрация ионов в последней, граничной ячейке;

$C(i, j)$ – концентрация ионов в предпоследней разностной ячейке.

На поверхности пола – уровень $Y = 0$, на твердых поверхностях – стены помещения, стулья и т.п., а также на верхней границе расчетной области (потолок) ставится граничное условие [62, 71, 103] вида:

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0, \quad (2.20)$$

где n – единичный вектор внешней нормали к границе.

Данное условие физически означает, что на этих границах поток ионов равен 0. В численной модели данное условие реализуется путем использования фиктивных ячеек [71].

В качестве начального для уравнения (2.14) ставится условие вида [71]:

$$C|_{t=0} = C_0(x, y). \quad (2.21)$$

Здесь C_0 – известное значение концентрации ионов в расчетной области, например, равное 0.

Крайне важно отметить, что при использовании модели (2.14) компоненты скорости $u(x, y)$, $v(x, y)$ должны удовлетворять уравнению неразрывности [62]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (2.22).$$

Для обеспечения этого условия необходимо решить аэродинамическую задачу по определению поля скорости воздушного потока в помещении.

В заключение раздела, следует подчеркнуть, что в предлагаемой модели рассеивания аэроионов будут учитываться процессы взаимодействия ионов различной полярности друг с другом и взаимодействие их с частицами пыли.

2.5. Разработка математической модели электрического поля в помещении с учетом препятствий

Поскольку каждый ион представляет собой электрически заряженную частицу, то в процессе рассеивания аэроионов в помещении они генерируют электрическое поле E , которое описывается следующим уравнением [131]:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} = \frac{q_e}{\varepsilon_0}, \quad (2.23)$$

где ε_0 – электрическая постоянная;

q_e – плотность объемного заряда.

От уравнения (2.23) можно перейти к скалярному потенциалу, если учесть такую зависимость:

$$E_x = -\frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial \phi}{\partial y}. \quad (2.24)$$

Тогда получим уравнение Пуассона следующего вида [131]:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = -\frac{q_e}{\varepsilon_0}, \quad (2.25)$$

где $q_e = -eC(x, y)$,

$C(x, y)$ – концентрация отрицательных аэроионов;

ϕ – скалярный потенциал;

e – элементарный заряд.

На базе данного уравнения осуществляется моделирование электрического поля.

Как известно, уравнения в дифференциальной форме дают описание моделируемого процесса только в общем виде и основной задачей при

исследовании является решение этого уравнения для конкретных краевых условий. Такое решение может быть получено только численным путем, если рассматривается не модельная, а реальная техническая задача. Поэтому в данной работе было осуществлено решение моделирующего уравнения электрического поля численным путем, то есть была построена численная модель, реализация которой осуществлялась на основе разработанной компьютерной программы.

В качестве граничного для уравнения (2.25) на твердых поверхностях (препятствия, мебель, установленное оборудование, пол, потолок, сьены помещения) ставится условие электрической изоляции:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0, \quad (2.26)$$

где n – единичный вектор внешней нормали к рассматриваемой границе.

Таким образом, в предлагаемой модели прогноза аэроионного режима в помещениях будет произведен учет дрейфа ионов за счет формирования электрического поля. Кроме того, при моделировании предусмотрен учет расположения отверстий вентиляции, наличия в помещении мебели и установленного оборудования.

2.6. Разработка математической модели аэродинамики воздушных потоков в помещении с учетом препятствий

Для расчета аэродинамики воздушных потоков и определения поля скорости воздушного потока в помещении будем применять модель потенциального течения. Моделирующим уравнением, в этом случае, будет уравнение Лапласа для потенциала скорости:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (2.27)$$

где P – потенциал скорости.

Компоненты вектора скорости воздушной среды связаны с потенциалом скорости следующими зависимостями:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (2.28)$$

Поскольку для исследования потенциала скорости и последующего нахождения компонент вектора скорости необходимо провести решение уравнения (2.27) численным путем при краевых условиях, соответствующих поставленной задаче, то была построена численная модель для решения моделирующего уравнения (2.27), реализованная с помощью разработанной компьютерной программы.

Рассмотрим постановку граничных условий для уравнения (2.27). Они формулируются следующим образом [59, 103]:

– на верхней, нижней границах (пол, потолок) расчетной области, на поверхности стен помещения и на твердых поверхностях внутри помещения (мебель и т.п.) ставятся условия непротекания [59, 103]:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0,$$

где n – единичный вектор внешней нормали к рассматриваемой границе;

– на границе «выхода» потока из расчетной области ставится граничное условие вида $P = const$ (условие Дирихле);

– на тех границах, где происходит «втекание» потока в расчетную область ставится граничное условие вида $\frac{\partial P}{\partial n} = V$, где V – известная скорость втекания.

Таким образом, для расчета скорости воздушного потока в помещении, используются фундаментальные уравнения аэродинамики (2.27) и (2.28).

Численная модель, построенная на основе уравнений (2.27) и (2.28) позволяет, в отличие от существующих, учесть при моделировании положение вентиляционных отверстий, наличие регулирующих экранов, мебели, оборудования и препятствий, расположенных в помещении, а также взаимодействие воздушных потоков в помещении с направленной струей воздуха при организации персонализированной подачи ионизированного воздуха в рабочую зону.

2.7. Разработка экспресс-оценки параметров аэроионного режима в помещении с использованием балансовой модели

Перенос аэроионов в помещении обусловлен воздействием многих факторов. Для построения экспресс-метода расчета концентрации аэроионов в помещении применим следующие уравнения [127]:

$$\frac{dn}{dt} = q_n(t) - \alpha np - \beta nA + n_0(t) \frac{Q(t)}{V} - n \frac{Q(t)}{V} - \lambda_i n \quad (2.29)$$

$$\frac{dp}{dt} = q_p(t) - \alpha np - \beta pA + p_0(t) \frac{Q(t)}{V} - p \frac{Q(t)}{V} - \lambda_i n \quad (2.30)$$

где q_n , q_p – скорость генерации соответственно отрицательных и положительных ионов в помещении;

n_0 , p_0 – концентрации отрицательных и положительных ионов, поступающих извне в помещение;

α – скорость рекомбинации ионов с ионами противоположной полярности;

β – скорость комбинации ионов с частицами пыли;

A – концентрация пыли;

V – объем помещения;
 Q – объем воздуха, входящий в помещение в единицу времени;
 λ_i – электростатическое осаждение ионов;
 t – время,
 n, p, A – текущие концентрации отрицательных, положительных аэроионов и пыли соответственно.

Для описания массопереноса пыли используется уравнение вида [127]:

$$\frac{dA}{dt} = q_A(t) + A_0(t) \frac{Q(t)}{V} - A \frac{Q(t)}{V} - \lambda_p n \quad (2.31)$$

где q_A – скорость генерации частиц в пространстве;

A_0 – концентрация частиц пыли, поступающих извне в помещение;

λ_p – электростатическое осаждение частиц.

Приведем ряд формул, которые необходимы для расчета некоторых параметров модели. Например, параметр λ_i рассчитывается согласно зависимости [127]:

$$\lambda_i = \frac{b}{\varepsilon_0} (q_e + q_c eA), \quad (2.32)$$

где b – коэффициент мобильности ионов;

ε_0 – электрическая постоянная;

q_e – плотность пространственного заряда, которая может быть выражена как:

$$q_e = en - ep, \quad (2.33)$$

где e – элементарный заряд.

Электростатическое осаждение частиц можно определить по формуле, приведенной в работе [127]:

$$\lambda_p = \frac{D_p}{D_i} q_c \lambda_i, \quad (2.34)$$

где D_p и D_i коэффициенты диффузии частиц и ионов соответственно;

q_c – характеристическое число зарядов.

Характеристическое число зарядов определяется из выражения:

$$q_c = \frac{4\pi\epsilon_0 d_p kT}{e^2} \left[\ln \left[1 + \frac{d_p c p e^2 t}{4\epsilon_0 kT} \right] - \ln \left[1 + \frac{d_p c n e^2 t}{4\epsilon_0 kT} \right] \right], \quad (2.35)$$

где k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура;

c – тепловая скорость ионов;

d_p – диаметр частиц;

t – время.

Здесь отметим, что в отличие от классической модели Маура У. [127] в уравнениях (2.29) – (2.31) учитывается зависимость эмиссии отрицательных, положительных аэроионов и пыли в помещении от времени и зависимость от времени кратности воздухообмена. Система приведенных уравнений замыкается заданием начальных условий вида:

$$A|_{t=0} = A_0, \quad (2.36)$$

$$n|_{t=0} = n_0, \quad (2.37)$$

$$p|_{t=0} = p_0. \quad (2.38)$$

Данные условия определяют начальные значения величин концентрации пыли, отрицательных и положительных ионов соответственно перед началом ионизации воздуха в помещении. Следует отметить, что уравнения (2.29) – (2.31) определяют концентрацию отрицательных, положительных аэроионов и пыли не в самом помещении, а на выходе из

него, что определено условием вывода этих балансовых соотношений. Но, данная модель будет иметь определенное соответствие действительности, если предположить, что внутри помещения происходит хорошее перемешивание воздушной среды («well mixed air»).

Таким образом, рассмотренная в данном параграфе балансовая модель, предложенная для экспресс-оценки параметров аэроионного режима в помещениях, учитывает зависимость эмиссии отрицательных, положительных аэроионов и пыли в помещении от времени.

Выводы по разделу 2

1. Для математического моделирования аэроионного режима в помещениях предложено использовать уравнение массопереноса, позволяющее учитывать взаимодействие ионов разной полярности друг с другом и с частицами пыли, а также наличие точечных источников эмиссии ионов.

2. Для учета миграции ионов под действием электрических сил предложено использовать уравнение электростатики для скалярного потенциала, позволяющее определять скалярный потенциал в любой точке пространства комнаты и тем самым учитывать дрейф ионов в электрическом поле.

3. Для учета миграции аэроионов, пыли вследствие движения воздуха внутри помещения предложено использовать модель потенциального течения, которая учитывает положение приточных и вытяжных отверстий вентиляции в комнате.

4. Для экспресс-оценки и контроля аэроионного режима в помещении предложена балансовая модель, позволяющая определять концентрацию аэроионов на выходе из помещения с учетом зависимости эмиссии отрицательных, положительных аэроионов и пыли в помещении от времени, а также с учетом зависимости от времени кратности воздухообмена.

РАЗДЕЛ 3

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ РАССЕЙВАНИЯ АЭРОИОНОВ В ПОМЕЩЕНИИ И МЕТОДОВ ИХ РЕШЕНИЯ С УЧЕТОМ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОЦЕСС

В данном разделе рассмотрены разностные схемы, используемые для численного интегрирования уравнений массопереноса, аэродинамики и электростатики, на базе которых построена новая численная CFD модель. Для численного интегрирования уравнений переноса (2.3) – (2.5) первоначально проводится их физическое и геометрическое расщепление, затем используется неявная попеременно – треугольная разностная схема, реализуемая по методу бегущего счета [7, 74, 103]. Для численного решения уравнения Лапласа и уравнения Пуассона применяется метод Либмана. Расчет выполняется на прямоугольной разностной сетке. Также в данном разделе рассмотрено численное решение уравнений балансовой модели и приведено описание разработанного программного кода для анализа, прогноза и контроля параметров аэроионного режима в помещениях.

3.1. Разработка дискретной модели массопереноса ионов в помещении с учетом взаимодействия ионов разной полярности

Рассмотрим построение неявной разностной схемы для численного интегрирования уравнения переноса (2.3). Каждое разностное уравнение неявной попеременно – треугольной схемы в данном случае будет представлять собой запись закона сохранения массы для конкретной разностной ячейки на каждом шаге расщепления. Данная схема является абсолютно устойчивой [7, 74, 103].

Численное решение данного уравнения будет определяться в прямоугольной области $G = \{0 \leq t \leq T, 0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y\}$, разбитой равномерной прямоугольной сеткой. Неизвестное значение концентрации будем определять в центре разностных ячеек.

Рассмотрим аппроксимацию производных, входящих в данное уравнение. Производную по времени аппроксимируем разделенной разностью «назад» [103]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}. \quad (3.1)$$

Конвективные производные запишем в виде:

$$\frac{\partial u C}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}; \quad \frac{\partial v C}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}, \quad (3.2)$$

где

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}; \quad u^- = \frac{u - |u|}{2}; \quad v^+ = \frac{v + |v|}{2}; \quad v^- = \frac{v - |v|}{2}. \quad (3.3)$$

Аппроксимируем конвективные производные разделенными разностями «против потока» на верхнем временном слое следующим образом:

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1}; \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1}; \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{ij}^{n+1} - v_{i,j}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1}; \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}. \quad (3.7)$$

Компоненты скорости u будем определять на вертикальных гранях разностных ячеек, а компоненты скорости v – на горизонтальных гранях. Индексы этих граней отвечают индексам ячеек, расположенных правее или выше соответствующей грани.

Для аппроксимации вторых производных используются такие зависимости:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}; \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \approx \mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_y \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}. \quad (3.9)$$

В данных зависимостях $L_x^+, L_x^-, L_y^+, L_y^-, M_{xx}^-, M_{xx}^+, M_{yy}^-, M_{yy}^+$ – условные обозначения разностных операторов. Используя эти обозначения, запишем разностную аппроксимацию уравнения переноса:

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} = \\ = (M_{xx}^+ C^{n+1} + L_{xx}^- C^{n+1} + L_{yy}^+ C^{n+1} + L_{yy}^- C^{n+1}) + Q_{ij} \delta_{ij}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Здесь использовано обозначение $\delta_{i,j}$ – это число 1 или 0, в зависимости от того, расположен или нет в разностной ячейке « i, j » источник Q_c .

Выполним расщепление полученного разностного уравнения на четыре разностных уравнения следующим образом:

на первом шаге расщепления $k = \frac{1}{4}$:

$$\frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_{ij}}{4\Delta x \Delta y} \delta_l; \quad (3.11)$$

на втором шаге расщепления $k = n + \frac{1}{2}$; $c = n + \frac{1}{4}$:

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k) = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_{ij}}{4\Delta x \Delta y} \delta_l; \quad (3.12)$$

на третьем шаге расщепления $k = n + \frac{3}{4}$; $c = n + \frac{1}{2}$:

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^- C^k) = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_{ij}}{4\Delta x \Delta y} \delta_l; \quad (3.13)$$

на четвертом шаге расщепления $k = n + 1$; $c = n + \frac{3}{4}$:

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^+ C^k) = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_{ij}}{4\Delta x \Delta y} \delta_l. \quad (3.14)$$

В дискретном виде дельта-функция Дирака $\delta(x - x_i)\delta(y - y_i)$ «размазывается» на одну разностную ячейку [62, 74].

На пятом шаге осуществляется расчет по зависимости:

$$\frac{C_{ij}^{n+A} - C_{ij}^n}{\Delta t} = -\alpha C^n B - \beta C^n D, \quad (3.15)$$

где C^n – значение концентрации после четвертого шага,

C^{n+A} – значение концентрации после нового (пятого) шага.

Таким образом, для определения концентрации аэроионов и пыли в помещении используется неявная разностная схема, при этом расчет ведется по явным формулам, что обеспечивает простую программную реализацию данной схемы.

3.2. Разработка дискретной модели для определения потенциала скорости воздушного потока в помещении с учетом препятствий

Для численного интегрирования уравнения Лапласа выполним следующую аппроксимацию производных [71]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2}, \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = \frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2}, \quad (3.17)$$

где $\Delta x, \Delta y$ – шаг разностной сетки в направлении OX, OY соответственно.

Тогда в разностном виде уравнение Лапласа можно записать следующим образом:

$$\frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0. \quad (3.18)$$

Отсюда можно определить неизвестную величину $P_{i,j}$:

$$P_{i,j} = \left[\frac{P_{i+1,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2} \right] / A, \quad (3.19)$$

где $A = \left(\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta y^2} \right)$.

Значение потенциала P будем определять в центре разностных ячеек.

Тогда численное решение уравнения Лапласа сводится к выполнению расчетной процедуры по формуле (3.19). Процесс расчета заканчивается при выполнении условия:

$$\left| P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n \right| \leq \eta, \quad (3.20)$$

где $P_{i,j}^{n+1}$ – новое приближение величины потенциала скорости;

$P_{i,j}^n$ – предыдущее значение величины потенциала скорости;

η – малое число (например, $\eta \approx 0,001$).

Для практической реализации данного численного метода необходимо предварительно задать некоторое «начальное» значение потенциала скорости расчетной области, например, положить $P_{ij} = 0$. Рассмотренная процедура численного интегрирования уравнения Лапласа называется методом Либмана [71].

При решении задачи по анализу аэроионного режима в случае персонализированной подачи ионизированного воздуха непосредственно в рабочую зону используется метод суммарной аппроксимации [74] для численного интегрирования уравнения для потенциала скорости, то есть для решения аэродинамической задачи. Предварительно уравнение Лапласа для потенциала скорости записывается в виде:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (3.21)$$

где t – фиктивное время [74].

Решение данного уравнения при $t \rightarrow \infty$ будет стремиться к решению уравнения Лапласа.

Использование такого эволюционного уравнения позволяет применить метод расщепления по времени; в этом случае разностные уравнения записываются в виде [74]:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right], \quad (3.22)$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right]. \quad (3.23)$$

Неизвестное значение потенциала скорости на каждом шаге расщепления определяется следующим образом:

– на первом шаге:

$$P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \left[P_{i,j}^n + \Delta t \left[\frac{P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right] \right] / A, \quad (3.24)$$

где $A = \left(1 + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} + \frac{\Delta t}{\Delta y^2} \right)$;

– на втором шаге:

$$P_{i,j}^{n+1} = \left[P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \Delta t \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right] \right] / A. \quad (3.25)$$

Для расчета по методу суммарной аппроксимации также необходимо задать начальное поле потенциала скорости, например, положить $P_{ij} = 0$. Расчет заканчивается при выполнении условия (3.20).

После расчета поля потенциала скорости воздушного потока в помещении выполняется расчет компонент вектора скорости на гранях разностных ячеек по зависимостям:

$$u_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad v_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}. \quad (3.26)$$

Рассмотренные неявные разностные схемы позволяют рассчитывать потенциал скорости воздушного потока в помещении с учетом препятствий, находящихся внутри помещения, то есть мебели, оборудования и т.д.

3.3. Разработка дискретной модели скалярного потенциала электростатического поля, создаваемого ионами в помещении, при наличии препятствий

Для численного интегрирования уравнения Пуассона для скалярного потенциала электрического поля применим метод Либмана. Выполним следующую аппроксимацию производных [71]:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \frac{\phi_{i+1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i-1,j}}{\Delta x^2}, \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = \frac{\phi_{i,j+1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j-1}}{\Delta y^2}, \quad (3.28)$$

где $\Delta x, \Delta y$ – шаг разностной сетки в направлении OX, OY соответственно.

Тогда в разностном виде уравнение Пуассона будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\phi_{i+1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{\phi_{i,j+1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j-1}}{\Delta y^2} = -\frac{q_e(ij)}{\varepsilon_0}. \quad (3.29)$$

Отсюда можно определить неизвестную величину $\phi_{i,j}$:

$$\phi_{i,j} = \left[\frac{\phi_{i+1,j} + \phi_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{\phi_{i,j+1} + \phi_{i,j-1}}{\Delta y^2} - K \right] / A, \quad (3.30)$$

где $A = \left(\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta y^2} \right)$, $K = -\frac{q_e(ij)}{\varepsilon_0}$.

Значение потенциала ϕ будем определять в центре разностных ячеек, там же, где и определяются концентрации аэроионов и пыли.

Численное решение уравнения Пуассона сводится к выполнению расчетной процедуры по формуле (3.30) на каждом шаге по времени. Процесс расчета заканчивается при выполнении условия:

$$|\phi_{i,j}^{n+1} - \phi_{i,j}^n| \leq \eta, \quad (3.31)$$

где $\phi_{i,j}^{n+1}$ – новое приближение величины скалярного потенциала;

$\phi_{i,j}^n$ – предыдущее значение величины скалярного потенциала;

η – малое число (например $\eta \approx 0,001$).

Для практической реализации данного численного метода необходимо предварительно задать некоторое «начальное» значение потенциала скорости расчетной области, например, положить $\phi_{ij} = 0$. Отметим особенность моделируемого процесса: численное решение уравнения для электрического потенциала находится на каждом шаге по времени, поскольку, если происходит изменение концентрации ионов в каждой разностной ячейке, то, соответственно, происходит изменение потенциала электрического поля, которое необходимо учесть при моделировании.

3.4. Экспресс-оценка параметров аэроионного режима в помещении с использованием балансовой модели

Балансовые уравнения (2.29) – (2.31) численно решаются с помощью метода Эйлера [74]. Приведем основную идею данного метода на примере модельного обыкновенного дифференциального уравнения, которое в общем виде иллюстрирует уравнения системы (2.29) – (2.31):

$$\frac{dC}{dt} = A, \quad (3.32)$$

где A – свободные члены, входящие в уравнения (2.29) – (2.31) балансовой модели;

C – концентрация примеси.

Выполним следующую аппроксимацию:

$$\frac{C^{n+1} - C^n}{\Delta t} = A. \quad (3.33)$$

В итоге получаем рекуррентную формулу для расчета концентрации примеси (в данном случае положительных, отрицательных ионов и пыли):

$$C^{n+1} = C^n + \Delta t \cdot A. \quad (3.34)$$

Зная концентрацию C^n для момента времени $t = 0$, исходя из известного начального условия, выполняем расчет по зависимости (3.34) для различных моментов времени. Таким образом, на основании достаточно простой зависимости осуществляется расчет отрицательных, положительных ионов и пыли на базе балансовой модели.

3.5. Разработка программного обеспечения для оценки, прогноза и управления параметрами аэроионного режима в помещениях

В связи со значительным объемом вычислений, на основе построенных численных моделей разработан программный код для анализа и прогноза параметров аэроионного режима в помещениях. Составляющие программного кода показаны на рисунке 3.1. Функционирующей платформой разработанного программного обеспечения являются компьютерные программы, которые реализуют расчет моделирующих уравнений (раздел 2) с последующей обработкой результатов расчета.

Особенностью разработанного программного обеспечения является возможность учета в помещении мебели и других препятствий, т.е. объектов, влияющих на формирование концентрационного поля ионов. Для «воспроизведения» этих и других объектов в процессе формирования вида

расчетной области в численной модели используется технология «porosity technique», называемая также методом маркирования [7]. Суть данной технологии заключается в кодировке разностных ячеек, которые относятся к таким объектам и реализацией в них соответствующих граничных условий. Вид расчетной области задается в файле исходных данных, при этом изменение вида расчетной области не требует корректировки разработанного программного кода.

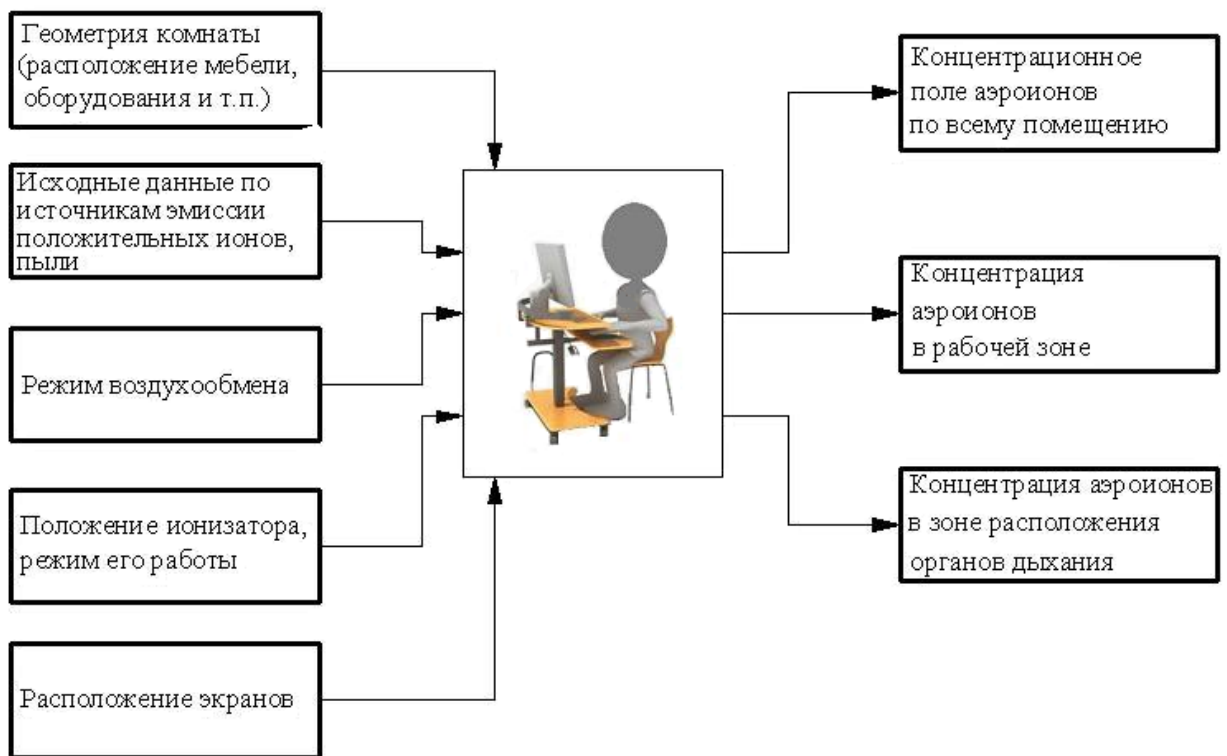


Рис. 3.1. Архитектура программного обеспечения (кода) для анализа и прогноза аэроионного режима в помещениях

Функции и задачи разработанного программного обеспечения (кода) для анализа и прогноза параметров аэроионного режима в помещениях:

1. Расчета полей концентрации отрицательных, положительных ионов и пыли как в помещении, так и на рабочих местах.
2. Прогнозирование концентрационного режима ионов и пыли в зоне расположения органов дыхания человека.

3. Учета различных режимов искусственной ионизации воздуха (подача в помещение предварительного ионизированного воздуха, установка ионизатора внутри помещения).

4. Учет различных режимов вентиляции помещения.

5. Быстрота расчета (2-3 мин).

Компьютерные программы, осуществляющие численное моделирование рассеивания отрицательных, положительных аэроионов и пыли в помещении, рабочей зоне реализованы на алгоритмическом языке FORTRAN. Эти программы являются подпрограммами типа SUBROUTINE. Ниже приведены названия данных подпрограмм:

1. TSH33 – расчет переноса отрицательных аэроионов в помещении.
2. TSH57 – расчет переноса положительных аэроионов в помещении.
3. TSH67 – расчет переноса пыли в помещении.

Для подпрограмм TSH33, TSH57, TSH67 входными данными являются:

- поле скорости в помещении;
- размеры расчетной области;
- коэффициенты диффузии;
- интенсивность эмиссии отрицательных, положительных ионов и пыли;
- коэффициенты взаимодействия частиц;
- размеры разностной сетки;
- шаг по времени разностной сетки;
- шаг по пространственным координатам разностной сетки.

Выходными данными являются концентрации отрицательных, положительных ионов и пыли.

4. TSH77 – расчет электрического поля.

Для подпрограммы TSH77 входными данными являются:

- концентрация отрицательных ионов в помещении;
- размеры расчетной области;
- размеры разностной сетки;

- шаг по времени разностной сетки;
- текущее время;
- шаг по пространственным координатам разностной сетки.

В результате расчета получаем поле скалярного электрического потенциала.

5. TSH87 – расчет поля потенциала скорости.

6. TSH89 – расчет поля потенциала скорости методом суммарной аппроксимации.

Для подпрограмм TSH87 и TSH89 входными данными являются:

- размеры расчетной области;
- кратность воздухообмена;
- размеры разностной сетки;
- шаг по пространственным координатам разностной сетки.

В результате расчета получаем поле потенциала скорости.

7. TSH98 – расчет компонентов вектора скорости.

Для подпрограммы TSH98 входными данными являются:

- поле потенциала скорости;
- размеры расчетной области;
- размеры разностной сетки;
- шаг по пространственным координатам разностной сетки.

В результате расчета получаем значение компонентов вектора скорости.

8. TSH21 – представление результатов моделирования в виде матрицы.

9. TSS – численное решение уравнений балансовой модели по методу Эйлера.

Для подпрограммы TSS входными данными являются:

- объем помещения;
- кратность воздухообмена;
- интенсивность эмиссии отрицательных, положительных ионов и пыли;
- коэффициенты взаимодействия частиц.

В результате расчета получаем концентрации отрицательных, положительных ионов и пыли в помещении.

10. TS.dat – файл ввода данных, необходимых для проведения вычислительного эксперимента. Это следующие данные:

- размеры помещения;
- координаты расположения аэроионизатора в помещении;
- концентрация ионов, пыли в воздухе, который поступает в помещение;
- режим эмиссии ионов;
- значение коэффициентов диффузии;
- расположение мебели и других объектов в помещении;
- положение рецептора (органов дыхания);
- положение регулирующих экранов в помещении;
- режим воздухообмена.

Взаимодействие подпрограмм осуществляет основная программа. Ввод исходных данных для моделирования осуществляется с помощью файла начальных данных типа DAT.

Алгоритм решения задачи определения параметров аэроионного режима в помещениях заключается в следующем:

1. Пользователь вносит исходную информацию в файл начальных данных (файл типа DAT) о данном помещении: геометрическую форму помещения, его размеры, местоположение и размеры вентиляционных отверстий, данные о режиме и кратности воздухообмена, режиме ионизации, наличии точечных источников эмиссии ионов различной полярности, наличии мест выброса пыли, местоположение препятствий в помещении (пол, потолок, твердые поверхности – мебель, установленное оборудование) и.т.д. Формирование вида расчетной области осуществляется с помощью маркеров. При необходимости пользователь может осуществлять корректировку размера разностной сетки.

2. Выполняется запуск подпрограммы численного интегрирования уравнения для потенциала скорости воздушного потока в помещении с учетом препятствий. На печать выдается поле потенциала скорости воздушного потока через определенное число выполненных итераций. Компьютерная программа производит контроль процедуры расчета потенциала скорости, при этом расчет завершается при выполнении условия вида (3.20). Осуществляется вывод на печать поля потенциала скорости воздушного потока в помещении.

3. Выполняется расчет компонент вектора скорости воздушного потока в помещении по зависимостям вида (3.26).

4. Осуществляется запуск подпрограмм численного интегрирования уравнений переноса отрицательных, положительных ионов и пыли в помещении и уравнения скалярного электрического потенциала поля, создаваемого ионами. На печать выдаются поле скалярного электрического потенциала, а также поля концентрации положительных, отрицательных ионов и пыли в помещении через заданное число шагов по времени.

5. Результаты моделирования заносятся в файл расчетных данных типа DAT.

6. Осуществляется анализ концентрационных полей положительных, отрицательных ионов и пыли в помещении.

7. В случае необходимости, пользователь вносит корректировку в файл начальных данных (например, изменяет местоположение ионизатора, места размещения оборудования) и осуществляет повторный расчет при измененных начальных данных.

Основные шаги разработанного алгоритма показаны на блок – схеме (рис. 3.2).

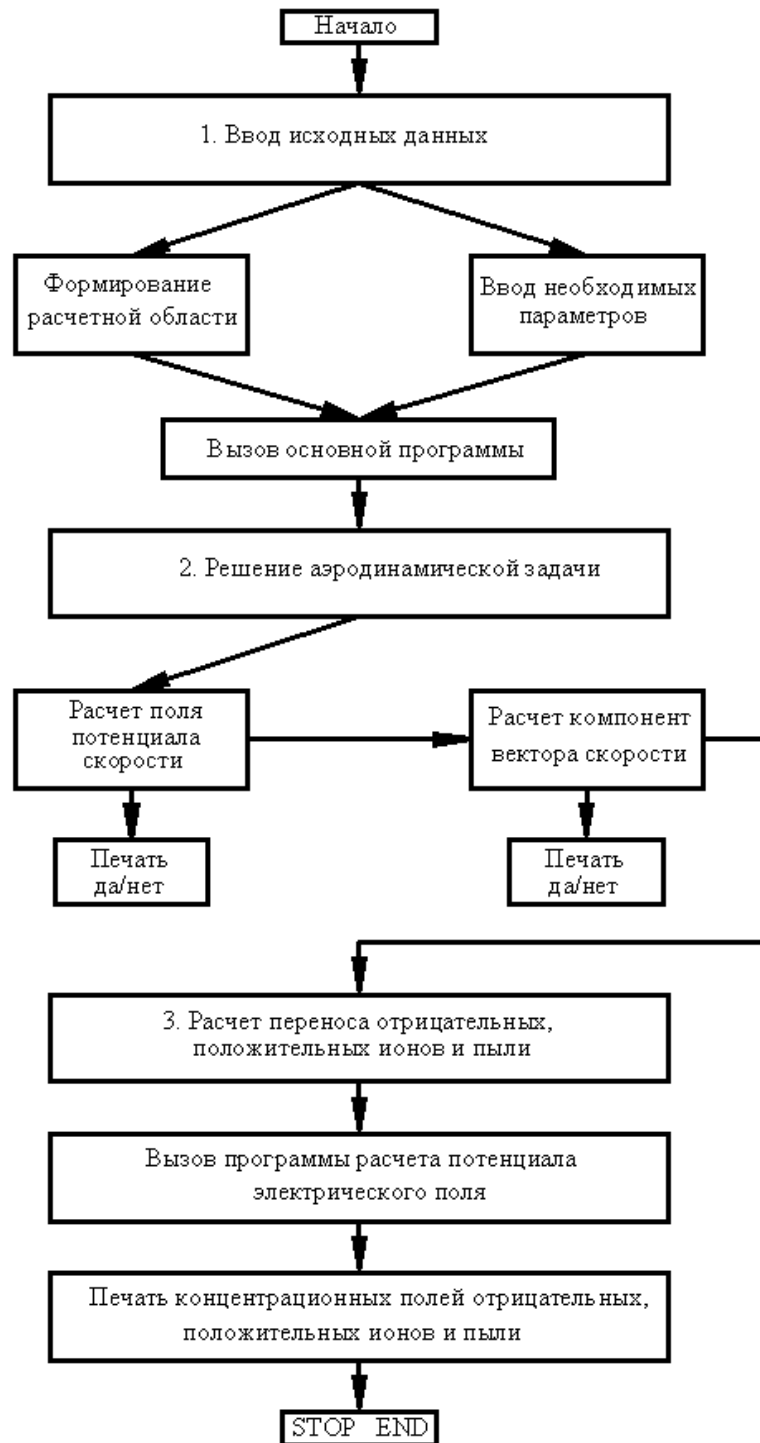


Рис. 3.2. Алгоритм решения задачи определения параметров аэроионного режима в помещении

Таким образом, проводя расчет параметров аэроионного режима в помещениях для различных вариантов размещения компьютеризованных рабочих мест, установленного оборудования мест расположения

ионизаторов, режима ионизации и т.д., пользователь разработанного компьютерного кода может определить наиболее рациональный вариант для конкретных условий. Учитывая, что для расчета параметров аэроионного режима на базе разработанного пакета программ требуются сравнительно малые затраты компьютерного времени (порядка нескольких минут), то для подбора рациональных параметров аэроионного режима в помещении, обеспечивающих комфортные условия работы персонала, понадобится вполне приемлемый для проектных либо редилайнерских работ временной промежуток.

3.6. Оценка адекватности (верификация) и достоверности разработанных моделей

Методология оценки адекватности численных моделей в настоящее время достаточно хорошо отработана и, следуя современной терминологии, включает в себя следующие этапы [5, 53, 72–75, 120, 129–131, 138, 140]:

1. *verification* – сравнение численных данных, полученных на основе разработанных моделей с решениями, полученными с помощью других методов;

2. *validation* – сравнение численных данных с экспериментальными данными.

Эти два подхода были использованы для тестирования построенных численных моделей. Для проверки адекватности построенных численных моделей приведен ряд тестовых задач, изложенных в научно-технической литературе, и соответствующих описанным выше требованиям, что обеспечивает проверку разработанных моделей на независимых данных.

3.6.1. Оценка адекватности разработанных моделей на независимых данных

Тестовая задача 1

Рассматривается задача об определении осевой скорости воздушного потока в камере в случае вдува струи в камеру, то есть осуществляется проверка решения моделирующего уравнения Лапласа для потенциала скорости. Размеры камеры $1,08 \times 1,50$ м (рис. 3.3). Экспериментальные данные по определению скорости воздушного потока в плоской камере приведены в работе [46].

Задача решалась с помощью разработанной численной модели при следующих исходных данных: ширина входного и выходного отверстий составляла $0,04$ м, скорость на входе – $0,6$ м/с.

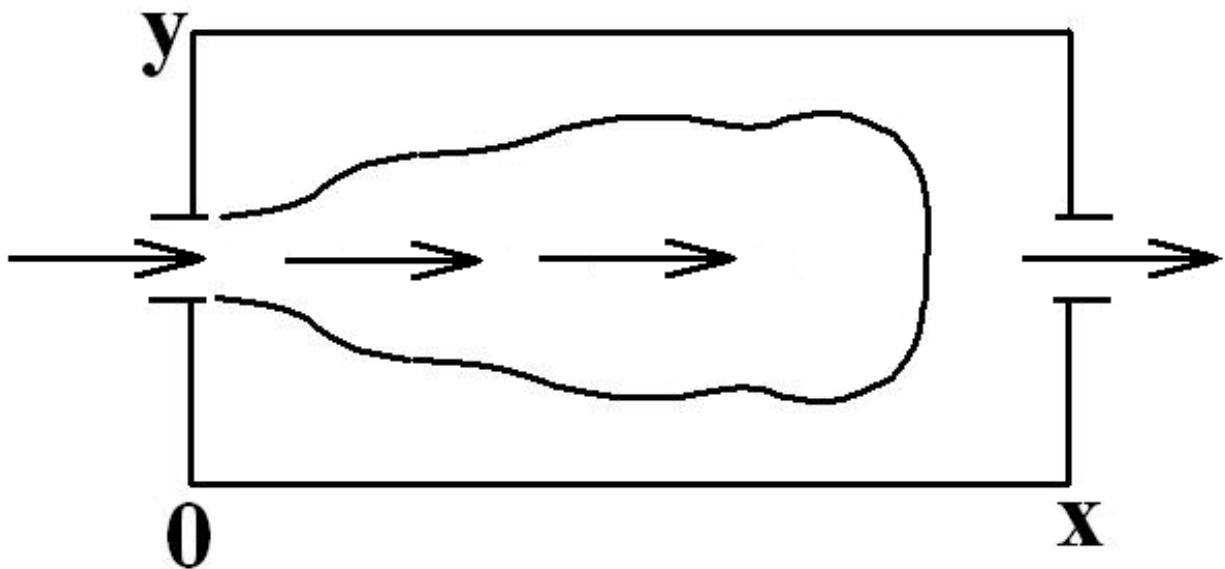


Рис. 3.3. Схема расчетной области

Результаты решения рассматриваемой задачи с помощью разработанной модели и сравнение полученных результатов с данными работы [46] приведены в представленной ниже таблице 3.1.

Таблица 3.1

Значения осевой скорости

Расстояние от входа, м	0	0,2	0,4	0,6	1
Расчет по построенной численной модели, м/с	0,62	0,49	0,42	0,39	0,30
Эксперимент [46], м/с	0,60	0,47	0,40	0,38	0,25
Расчет [46], м/с	0,60	0,40	0,41	0,38	0,31

Анализируя данные, приведенные в таблице 3.1, можно утверждать, что имеет место удовлетворительное согласование данных, полученных на базе разработанной численной модели аэродинамики с данными эксперимента и расчетами других авторов.

Тестовая задача 2

Ниже представлены результаты решения тестовой задачи по оценке осевой скорости потока возле щелевидного отсоса. Такая задача рассматривалась как тестовая в работе [58]. Схема расчетной области представлена ниже (рис. 3.4). Граничные условия: условие непроницаемости на границах ВСМ и АДМ; на участке АВ задается скорость ($v_{\infty} = 1$ м/с). Данное сечение находится на расстоянии одного калибра от входа в щель ($AB=AD$); ширина щели равна $2B$.

Результаты расчета величины осевой скорости воздуха, полученные с помощью построенной численной модели и с помощью ряда теоретических методов [58] представлены в таблице 3.2.

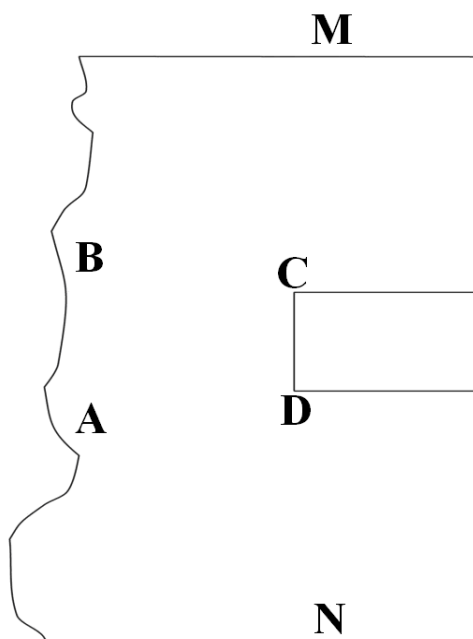


Рис. 3.4. Схема расчетной области

Таблица 3.2

Значение осевой скорости

X/B	Величина скорости, м/с, рассчитанная по методу граничных интегральных уравнений [58]	Величина скорости, м/с, рассчитанная по методу конформных отображений уравнений [58]	Величина скорости, м/с, рассчитанная по разработанной численной модели
0,5	0,631	0,645	0,647
1,0	0,470	0,471	0,474
1,5	0,362	0,365	0,367
2,0	0,290	0,290	0,293
2,5	0,240	0,240	0,244
3,0	0,205	0,202	0,205
3,5	0,176	0,176	0,178
4,0	0,158	0,155	0,157

Анализируя данные, представленные в таблице 3.2, можно сделать вывод о том, что имеет место удовлетворительное согласование расчетных

данных, полученных с помощью построенной численной модели и данными, полученными с помощью других теоретических методов.

Тестовая задача 3

Уравнение для потенциала скорости, записанное в эволюционном виде, аналогично уравнению теплопроводности (с коэффициентом температуропроводности равным единице $a = 1$). Поэтому для тестирования численной модели для потенциала скорости можно использовать аналитическое решение для уравнения теплопроводности. Такое решение существует для следующей задачи.

Рассмотрим [70] прямоугольную область, длиной A (например, $A = 9,2$ м) и шириной B (например, $B = 7,6$ м). На границах области задано условие первого рода – температура, равная $T_0 = 100^\circ\text{C}$. Начальная температура в области – 0°C . Исследуется процесс изменения температуры в точке с координатами $x = 1$ м, $y = 1$ м с течением времени t . Аналитическое решение задачи имеет вид [70]

$$T = T_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right) \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{y}{2\sqrt{at}} \right) \right], \quad (3.34)$$

где t – время.

В таблице 3.3 представлены данные расчета температуры по разработанной численной модели и на основе аналитического решения.

Таблица 3.3

Сравнение численных и аналитических расчетных данных

Время t , сек	Расчет по аналитической зависимости, $^\circ\text{C}$	Расчет по разработанной численной модели, $^\circ\text{C}$
9,76	96,79	97,48
12,76	97,56	98,62
17,30	98,20	99,47

Как видно из таблицы 3.3 – наблюдается удовлетворительное согласование результатов, полученных на основе численного и аналитического решения.

3.6.2. Оценка адекватности разработанных моделей на основе физического эксперимента

Тестовая задача 4

Для верификации разработанной в диссертационной работе CFD модели был проведен физический эксперимент, целью которого являлось подтверждение адекватности полученных в результате выполнения задач диссертационной работы данных. В ходе эксперимента проводилось измерение концентрации отрицательных ионов вблизи действующего ионизатора. Поток воздуха создавался за счет работы воздуходувки. Ионизатором воздуха являлось устройство Airnasa KJF03 (рис. 3.5) Для измерения концентрации ионов использовался счетчик AIR ION TESTER KT-401 (рис. 3.6). Измерение скорости воздушного потока осуществлялось с помощью анемометра GM 8908 (рис. 3.7).

Целью эксперимента являлось тестирование численной модели по принципам, изложенным в работах [46, 62, 67, 120, 129, 130]. Поскольку в диссертационной работе рассматривалась проблема CFD моделирования распределения аэроионов при наличии преград, то при проведении физического эксперимента была установлена вертикальная пластина, моделирующая наличие препятствий вблизи источника ионизации.

Моделируемая область показана на рисунке 3.8. Как видно из данного рисунка, ионизатор установлен на определенной высоте ($h = 0,15$ м), на втором этапе эксперимента (рис. 3.8б) на расстоянии 1,2 м от ионизатора была размещена вертикальная пластина (высота пластины 0,2 м). Концентрация отрицательных ионов измеряется в ряде точек на конкретной высоте.

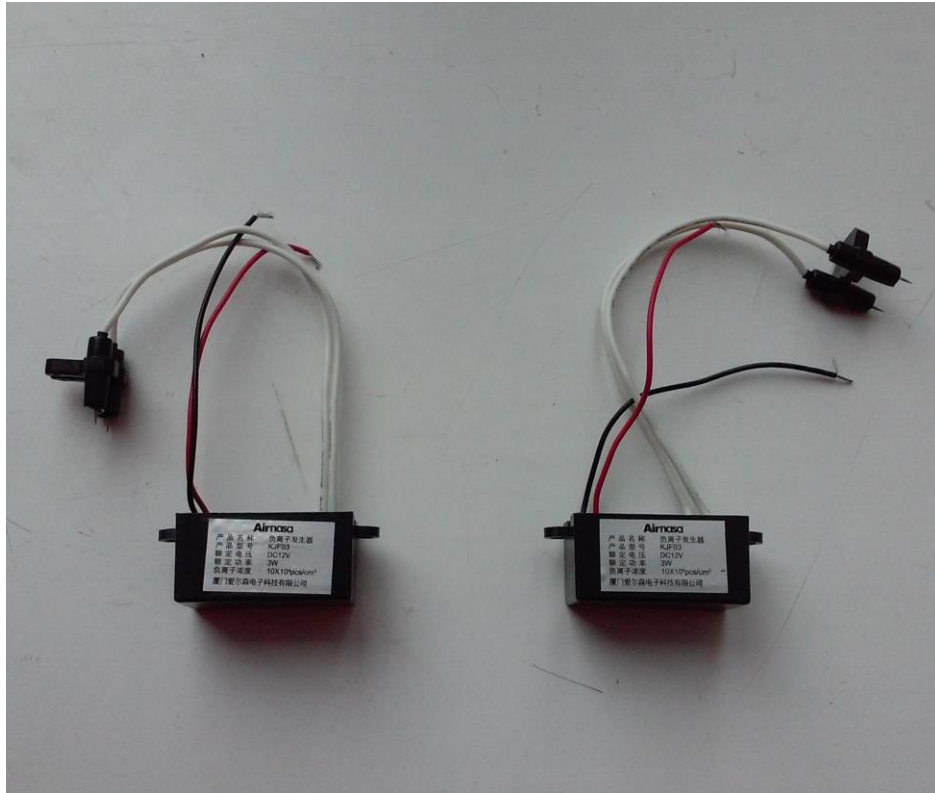


Рис. 3.5. Ионизатор воздуха Airnasa KJF03



Рис. 3.6. Счетчик ионов AIR ION TESTER KT-401



Рис. 3.7. Анемометр GM8908

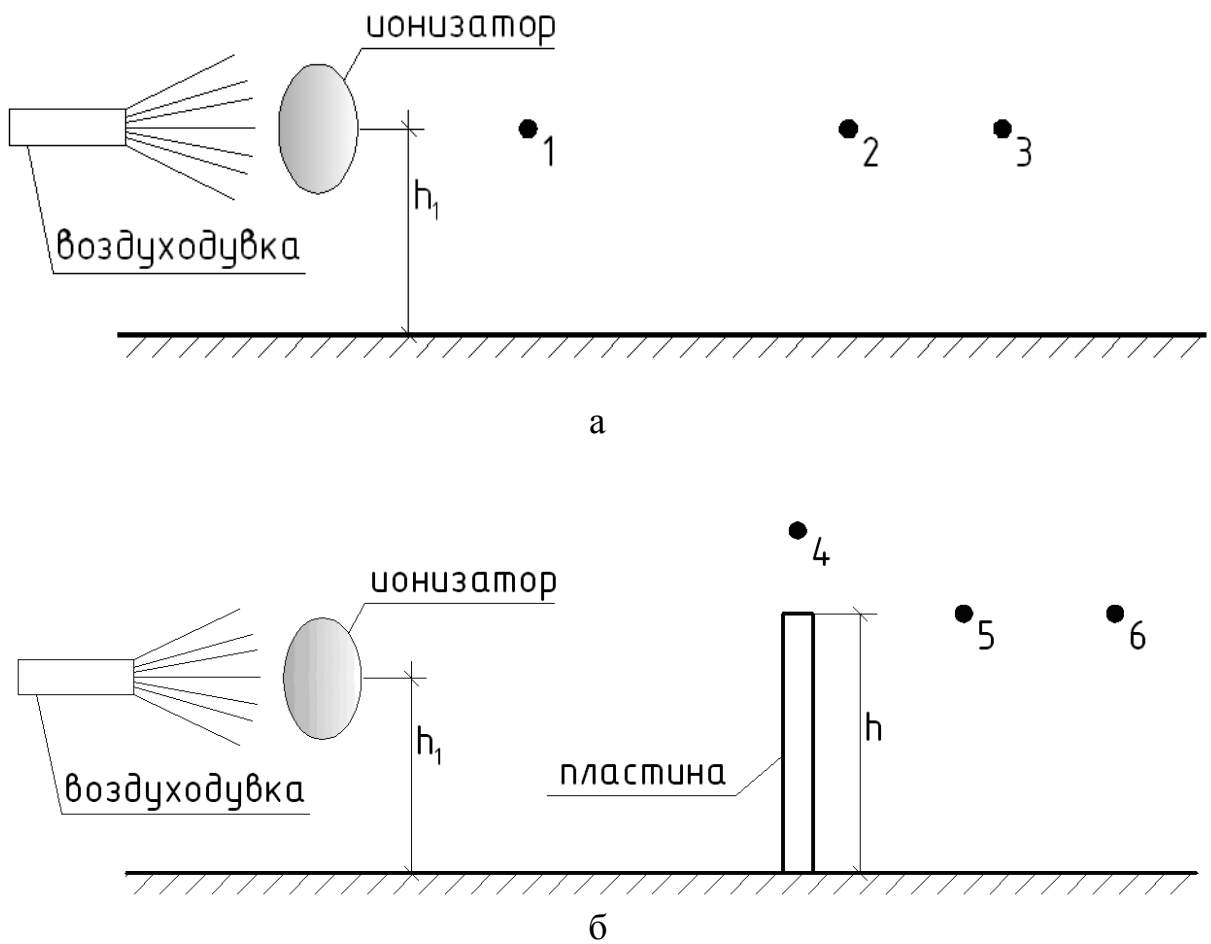


Рис. 3.8. Схема расположения оборудования при проведении эксперимента:

а – вариант, соответствующий таблице 3.4;

б – вариант, соответствующий таблице 3.5

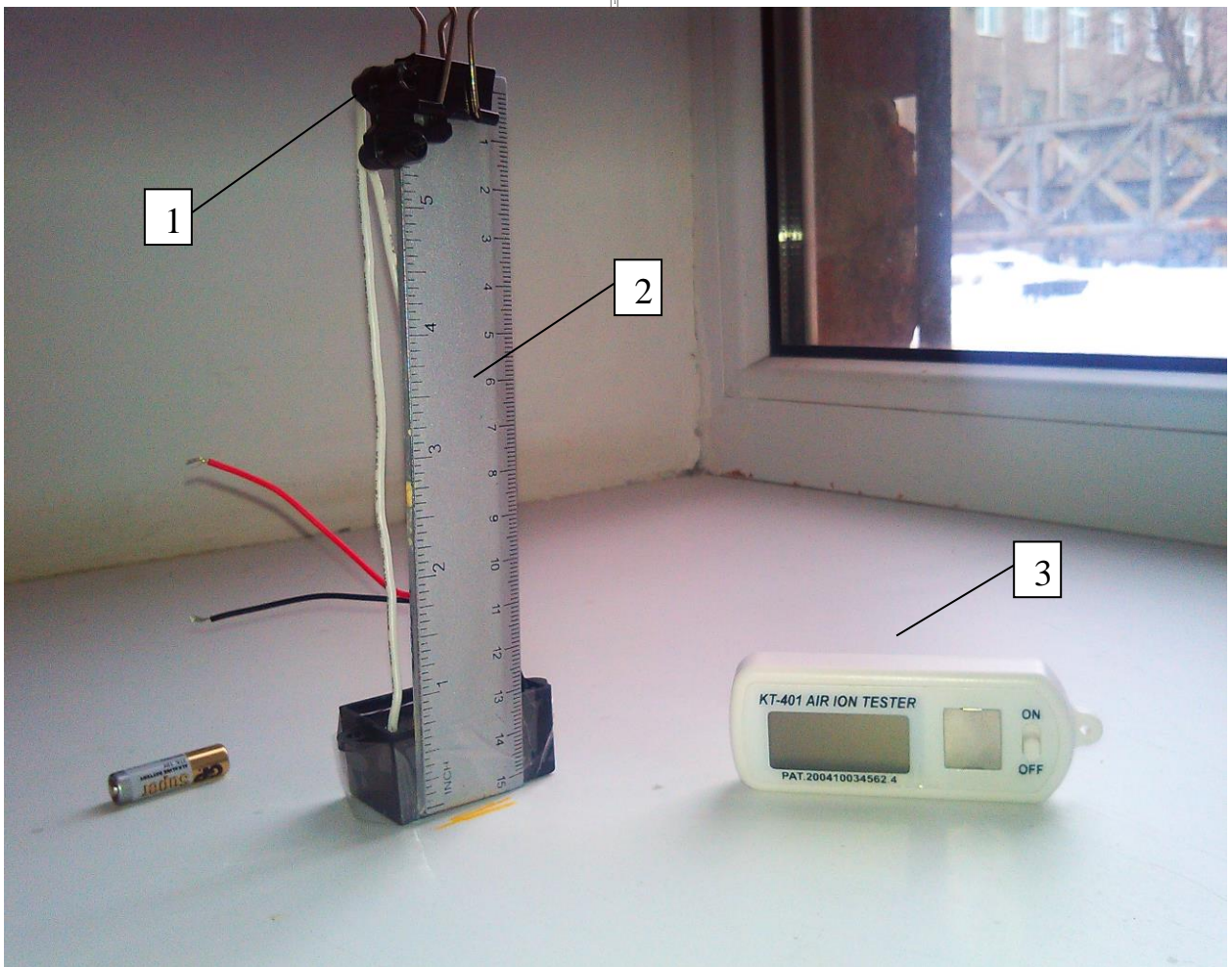


Рис. 3.9. Оборудование для проведения эксперимента: 1 – ионизатор;
2 – линейка; 3 – счетчик ионов

Эксперимент проводился в два этапа. На первом этапе (рис. 3.8а; рис. 3.9) ставилась задача определить интенсивность эмиссии отрицательных ионов. Для этого проводилось измерение концентрации ионов в трех точках на высоте $h_1 = 0,15$ м, при отсутствии экрана. Эти данные заносились в таблицу в виде «вилки» (табл. 3.4). Далее выбиралось среднее значение из этих данных. Полученные данные использовались в разработанной численной модели для определения интенсивности эмиссии ионов расчетным путем методом подбора величины Q_C . Скорость воздушного потока возле ионизатора составляла 0,5 м/с.

Таблица 3.4

Экспериментальное и расчетное значения концентрации
отрицательных ионов

Расстояние, х	Эксперимент	Расчетное значение
12 см	$(1,34-1,44) \times 10^7$ ион/см ³	$1,39 \times 10^7$ ион/см ³
96 см	$(0,88-1,12) \times 10^7$ ион/см ³	$0,97 \times 10^7$ ион/см ³
144 см	$(0,77-0,83) \times 10^7$ ион/см ³	$0,80 \times 10^7$ ион/см ³

На основе такого подхода определено, что $Q_C = 0,0191 \times 10^{11}$ ионов/с.

На втором этапе проводилось измерение концентрации ионов в различных точках при наличии экрана (рис. 3.8б; рис. 3.9). Были выбраны точки №4 (вверху на высоте 0,12 м над экраном); точка №5 за экраном на расстоянии 0,12 м на уровне 0,2 м; точка №6 на расстоянии 0,24 м от экрана на уровне 0,20 м. Результаты измерений и расчета концентраций ионов для данных точек показаны в таблице 3.5.

Таблица 3.5

Экспериментальное и расчетное значения концентрации
отрицательных ионов

Точка измерения (расчета)	Эксперимент, ион/см ³	Расчетное значение, ион/см ³
Над экраном, высота 0,26 м	$(0,06-0,11) \times 10^7$	$0,09 \times 10^7$
За экраном, на расстоянии 0,12 м	$(0,23-0,32) \times 10^7$	$0,28 \times 10^7$
За экраном, на расстоянии 0,24 м	$(0,19-0,26) \times 10^7$	$0,23 \times 10^7$

Как видно из данных, представленных в таблице 3.5, наблюдается удовлетворительное согласование между экспериментальными и расчетными данными.

Тестовая задача 5

Для верификации разработанной в диссертационной работе CFD модели был проведен физический эксперимент, заключающийся в измерении концентрации отрицательных ионов в офисном помещении, общий вид которого показан на рисунке 3.10.



Рис. 3.10. Офисное помещение: 1 – ионизатор воздуха Янтарь 5А;
2 – рабочий стол

В ходе физического эксперимента было проведено измерение концентрации ионов в трех точках на ровной поверхности стола шириной 1,5 м. Скорость воздушного потока в помещении составляла 0,21 м/с. На основании разработанной CFD модели был проведен численный расчет. Результаты измерений и расчета концентраций ионов приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6

Экспериментальное и расчетное значения концентрации отрицательных ионов

Номер точки, расстояние от ионизатора, м	Эксперимент, ион/см ³	Расчетное значение, ион/см ³
№1, 0,5	$(0,89-0,96) \times 10^7$	$0,92 \times 10^7$
№2, 1	$(0,47-0,49) \times 10^7$	$0,46 \times 10^7$
№3, 1,5	$(0,21-0,28) \times 10^7$	$0,25 \times 10^7$

Согласно данным, приведенным в таблице 3.6, получено удовлетворительное согласование между экспериментальными и расчетными результатами.

Тестовая задача 6

Эксперимент проводился в аэродинамической трубе Т5 (лаборатория аэродинамики Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара, рис. 3.11). Параметры аэродинамической трубы следующие: длина рабочей части 1115 мм, диаметр выходного сечения сопла $D = 750$ мм. Измерение скорости потока проводилось трубкой Пито, имеющей диаметр приемного отверстия 8 мм.

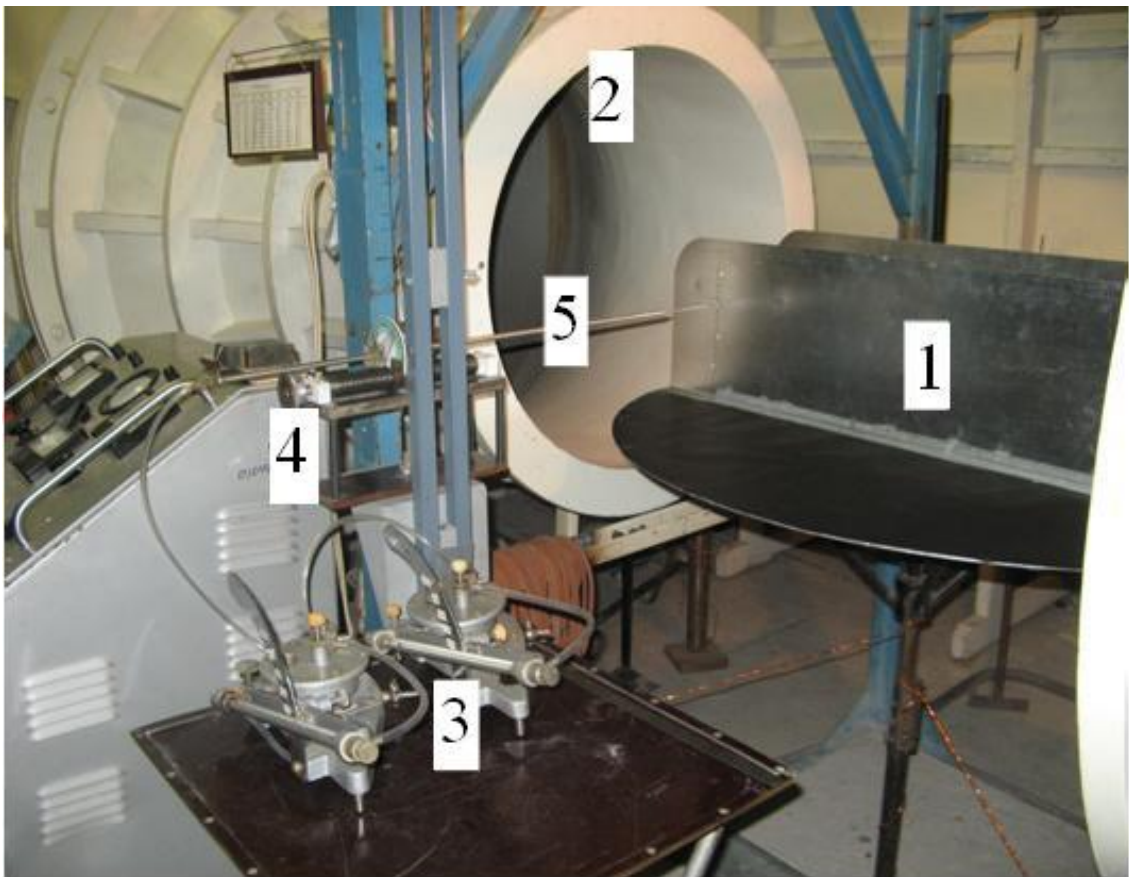


Рис. 3.11. Вид рабочей части аэродинамической трубы Т5:
1 – ограничительные шайбы; 2 – аэродинамическая труба;
3 – микроманометры; 4 – координатник; 5 – трубка Пито

В рабочей части аэродинамической трубы размещались два препятствия – блоки (рис. 3.12 и 3.13), расположенные в тандеме (рис. 3.14). Модели препятствий были изготовлены из нержавеющей стали. Их размеры: 100 мм × 100 мм × 200мм (рис. 3.12). Скорость воздушного потока в аэродинамической трубе $V = 22$ м/с; атмосферное давление 747 мм. рт. ст.; температура воздуха $t = 25$ °С.

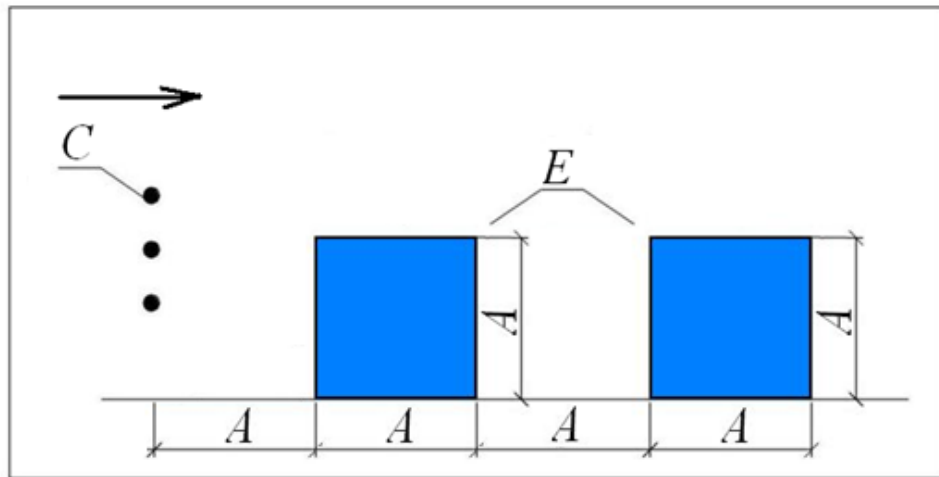


Рис. 3.12. Схема моделируемой области: E – блоки (модели препятствий);
C – точки измерения скорости воздушного потока ($A=100$ мм)

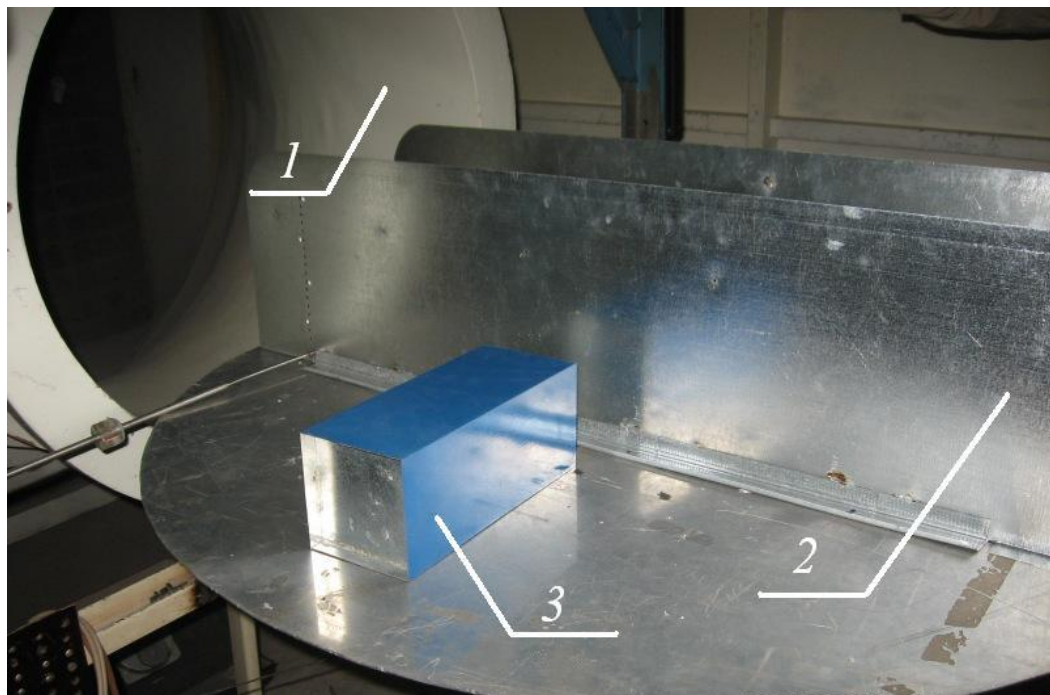


Рис.3.13. Вид модели: 1 – аэродинамическая труба; 2 – ограничительная шайба; 3 – модель препятствия

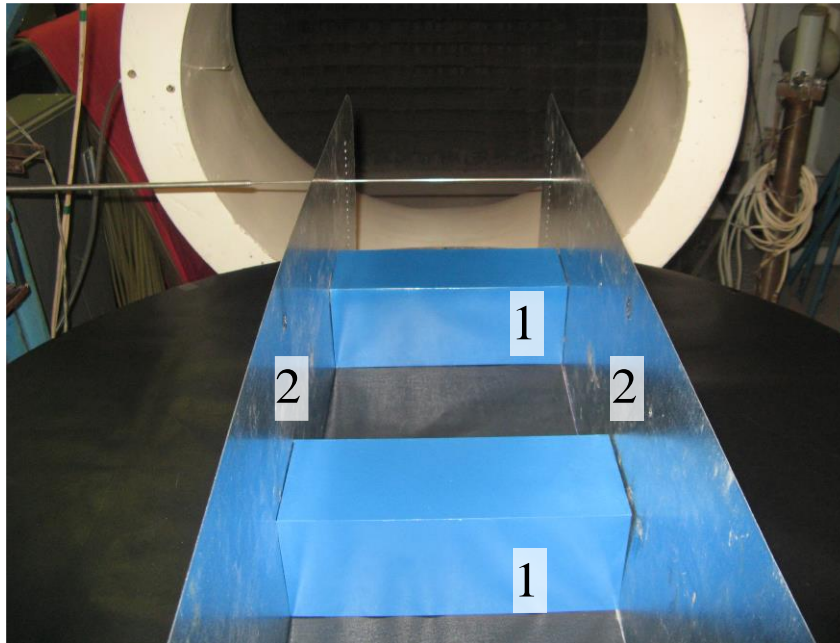


Рис. 3.14. Размещение моделей препятствий в рабочей части аэродинамической трубы: 1 – модели препятствий; 2 – пространство между моделями

Измерение скорости воздушного потока проводилось перед первым препятствием. Результаты измерения скорости воздушного потока в трубе и результаты расчета по разработанной численной модели приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7

Скорость воздушного потока перед моделью первого препятствия

Высота от основания трубы, м	Эксперимент, м/с	Расчет, м/с
0,01	19,22–19,38	19,43
0,03	19,44–19,67	19,73
0,05	20,12–20,44	20,48
0,07	20,65–20,84	20,87

Как видно из данных, представленных в таблице 3.7, наблюдается удовлетворительное согласование между экспериментальными и расчетными данными.

Выводы по разделу 3

1. Для построения дискретных моделей массопереноса, электростатики, аэродинамики использованы разностные аппроксимации, удобные для программирования и кодирования. Это удобство основывается на применении явных расчетных зависимостей при разработке данных моделей.

2. Выполнена программная реализация предложенных численных моделей. Для программной реализации использовались современные версии алгоритмического языка FORTRAN-2008 и FORTRAN POWER STATION.

3. Проведено тестирование разработанных программ (generic codes) путем расчета задач, имеющих аналитическое решение. Проведен физический эксперимент по верификации модели аэродинамики и переноса аэроионов. На основе полученных данных верификации подтверждается адекватность построенных численных моделей.

4. Описана структура разработанного программного обеспечения (кода), которая показывает, что предложенный программный пакет обладает логической простотой, универсальностью и наглядностью, а также удобством для анализа результатов расчета параметров аэроионного режима в помещениях, что позволяет осуществить выбор наиболее рационального варианта.

РАЗДЕЛ 4

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В ПОМЕЩЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В данном разделе рассмотрено применение разработанных пакетов программ для анализа, оценки и контроля аэроионного режима на компьютеризованных рабочих местах и в помещениях. Здесь рассматриваются новые задачи в области охраны труда, которые ранее в научной литературе не встречались, а именно – формирование аэроионного режима в помещении при подаче ионизированного воздуха в помещение и при установке ионизатора внутри помещения, с учетом основных физических факторов, влияющих на процесс рассеивания аэроионов.

4.1. Прогноз аэроионного режима на базе разработанной CFD модели при стационарной подаче в помещение ионизированного воздуха

В данном подразделе рассмотрено решение комплекса задач по оценке аэроионного режима при подаче в помещение предварительно ионизированного воздуха.

Задача 1. Оценка аэроионного режима в помещении с двумя рабочими местами

Разработанный на базе численной CFD модели пакет программ был применен для моделирования аэроионного режима в помещении с расположенными в нем двумя рабочими местами. На рисунке 4.1 представлена схема расчетной области – помещения, в которое поступает воздух через систему вентиляции, содержащий отрицательные ионы с

концентрацией $C_0 = 55 \times 10^9$ частиц/м³. Выход воздуха из помещения происходит через отверстие на потолке. Рабочая зона представлена двумя столами и размещенными рядом стульями. Возле правой стенки помещения располагается стол, над которым находятся полки.

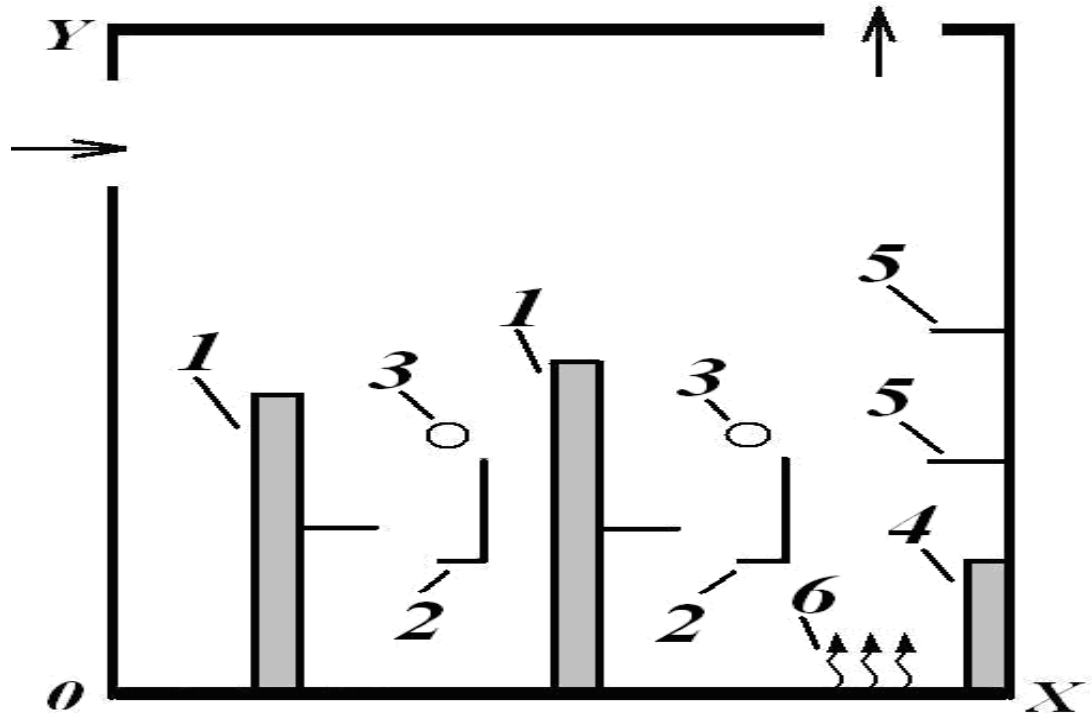


Рис. 4.1. Схема расчетной области: 1 – рабочий стол; 2 – стул; 3 – место эмиссии положительных ионов (положение органов дыхания); 4 – стол; 5 – полки; 6 – место эмиссии пыли

Источником эмиссии положительных ионов в помещении являются люди, поэтому в зоне расположения их органов дыхания (рис. 4.1, позиция 3) задаются точечные источники эмиссии положительных ионов с интенсивностью $Q_B = 8 \times 10^5$ частиц/с. Остальные параметры задачи таковы: размеры расчетной области 12,20 м × 3,50 м; кратность воздухообмена 2 час⁻¹; положение входного и выходного отверстий вентиляции показано стрелками на рисунке 4.1; $\alpha = 1,5 \times 10^{-12}$ м³/с, $\beta = 1 \times 10^{-12}$ м³/с [131]; коэффициенты турбулентной диффузии по всем направлениям приняты равными $\mu_x = \mu_y = kV$ (здесь $k = 0,1$ – параметр, V – местная скорость в

конкретной расчетной точке; данная скорость определяется из решения аэродинамической задачи). В помещении происходит эмиссия пыли, $Q_D = 25 \times 10^6$ частиц/с (положение выброса пыли показано на рисунке 4.1 волнистой линией).

Цель численного моделирования – определить концентрацию отрицательных ионов в помещении и в зоне расположения органов дыхания людей.

Результаты численного моделирования приведены на последующих рисунках 4.2 – 4.3. На данных рисунках показано концентрационное поле отрицательных ионов внутри помещения. Результаты моделирования приведены в безразмерном виде: каждое число – это величина концентрации в процентах от величины максимальной концентрации ионов в помещении C_{\max} . Вывод на печать чисел осуществлен по формату «целое число», т.е. дробная часть числа не выдается на печать, также приводится максимальное значение концентрации в расчетной области C_{\max} . Отметим, что такой формат печати означает, что если в какой – либо точке концентрация составляет, например, величину 32,55 %, то на печать будет выведено число «32». Следует уточнить, что разработанный программный пакет позволяет при необходимости вывод на печать значений концентрации с сохранением дробной части числа. Выбранный подход к представлению результатов моделирования в виде печати матрицы концентрации ионов в расчетной области позволяет легко определить уровень ионизации воздуха в любой подзоне помещения. Данный подход является особенно эффективным при реализации задачи перебора различных вариантов для выбора оптимального сочетания определяемых параметров. В рассмотренных ниже задачах применяется аналогичная форма вывода полученных результатов на печать.

Как видно из рисунка 4.2, концентрация отрицательных ионов в первой рабочей зоне составляет порядка 53 – 57 % от концентрации ионов во входящем ионизированном потоке, а на втором рабочем месте это будет величина порядка 26 – 31 % от концентрации ионов во входящем потоке. Данная величина может быть изменена не только путем, например, снижения концентрации отрицательных ионов во входящем потоке, но и путем геометрического воздействия на воздушный поток в помещении. Такое воздействие можно осуществить с помощью регулирующего экрана, если установить его в определенной части помещения. Например, если экран расположить вблизи входящего воздушного потока (рис. 4.3а), то произойдет снижение концентрации ионов в рабочей зоне. Она составит в первой рабочей зоне порядка 46 – 51 % от концентрации ионов во входящем ионизированном потоке, а на втором рабочем месте это будет величина порядка 23 – 27 %.

На рисунке 4.4 показано распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении на уровне расположения органов дыхания человека, каждое значение – это величина концентрации в процентах от величины максимальной концентрации ионов в помещении C_{\max} .

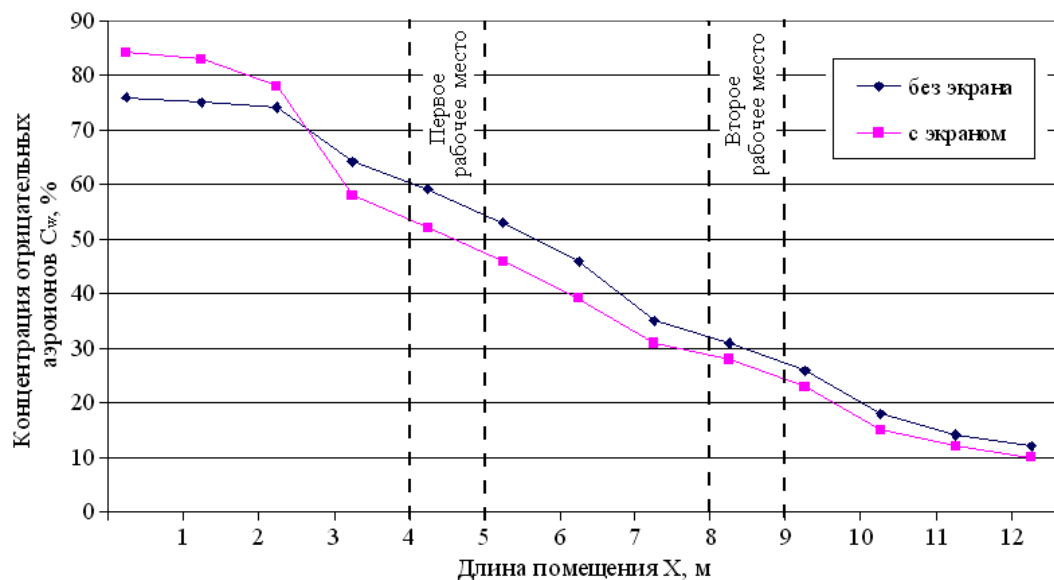


Рис. 4.4. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении на уровне расположения органов дыхания человека

Из рисунка 4.4 видно изменение значений концентрации отрицательных ионов на рабочих местах после установки регулирующего экрана. Таким образом, варьируя размерами экрана и его положением, можно управлять концентрацией отрицательных ионов в рабочей зоне.

Для решения задачи потребовалось порядка 3 минут компьютерного времени.

Задача 2. Анализ аэроионного режима в помещении с одним рабочим местом

Рассматривалось моделирование аэроионного режима в помещении, в котором предусмотрено расположение одного рабочего места. Схема расчетной области показана на рисунке 4.5. Воздух, поступающий в помещение через систему вентиляции, содержит отрицательные ионы с концентрацией $C_0 = 55 \times 10^9$ частиц/м³. Выход воздуха из помещения происходит через выпускное отверстие в стене. Рабочая зона включает в себя рабочий стол и стул, расположенный рядом.

Источником положительных ионов в помещении являются люди. В зоне расположения органов дыхания человека (рис. 4.5, позиция 4) расположен источник эмиссии положительных ионов интенсивностью $Q_B = 7 \times 10^5$ частиц/с. Остальные параметры задачи таковы: размеры расчетной области 12,25 м × 3,50 м; кратность воздухообмена 3 час⁻¹; положение входных и выходного отверстий вентиляции показано стрелками на рисунке 4.5; $\alpha = 1,5 \times 10^{-12}$ м³/с, $\beta = 1 \times 10^{-12}$ м³/с [131]; коэффициенты турбулентной диффузии по всем направлениям приняты равными $\mu_x = \mu_y = kV$ (здесь $k = 0,1$ – параметр, V – местная скорость в конкретной расчетной точке, данная скорость определяется из решения аэродинамической задачи). В помещении происходит эмиссия пыли,

$Q_D = 52 \times 10^6$ частиц/с (положение выброса пыли показано на рисунке 4.5 волнистой линией).

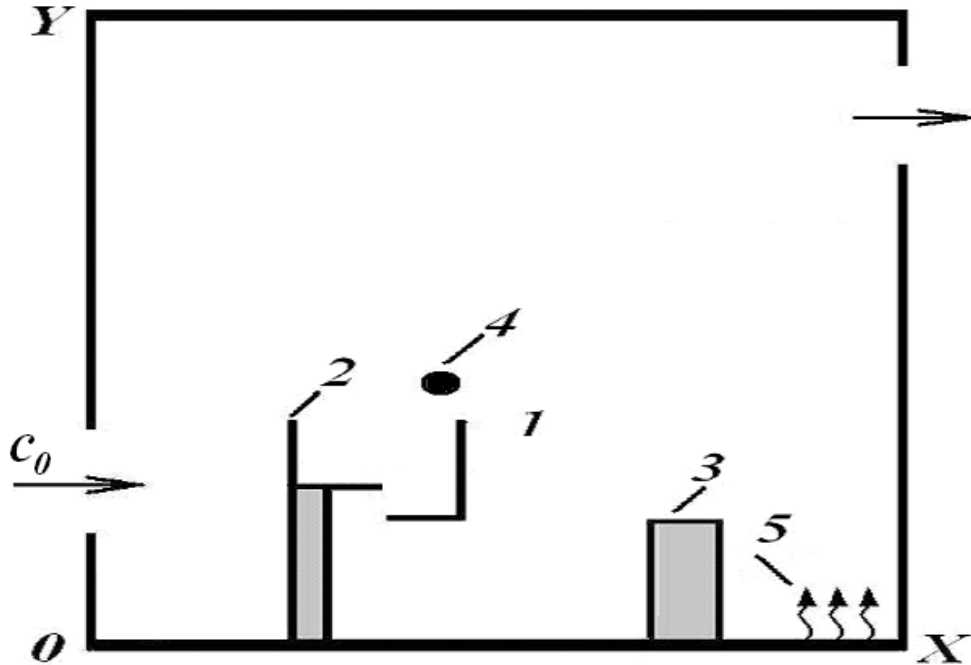


Рис. 4.5. Расчетная область: 1 – стул; 2 – рабочий стол; 3 – стеллаж;
4 – место эмиссии положительных ионов (положение органов дыхания);
5 – место эмиссии пыли

Целью численного моделирования является определение концентрации отрицательных ионов в помещении и в области расположения органов дыхания человека.

Результаты численного моделирования представлены на рисунке 4.6, где приведено концентрационное поле отрицательных аэроионов в помещении.

В результате проведенного вычислительного эксперимента установлено, что концентрация отрицательных ионов в помещении в рабочей зоне над стулом (в месте положения головы работника) составляет 21×10^9 частиц/м³. Известно, что максимальный уровень отрицательных ионов в рабочих зонах должен составлять 50×10^9 частиц/м³. Таким образом, для предлагаемого режима ионизации концентрация отрицательных ионов

удовлетворяет данному условию. Следует отметить, что расположение вентиляционных отверстий существенно влияет на формирование аэроионного режима.

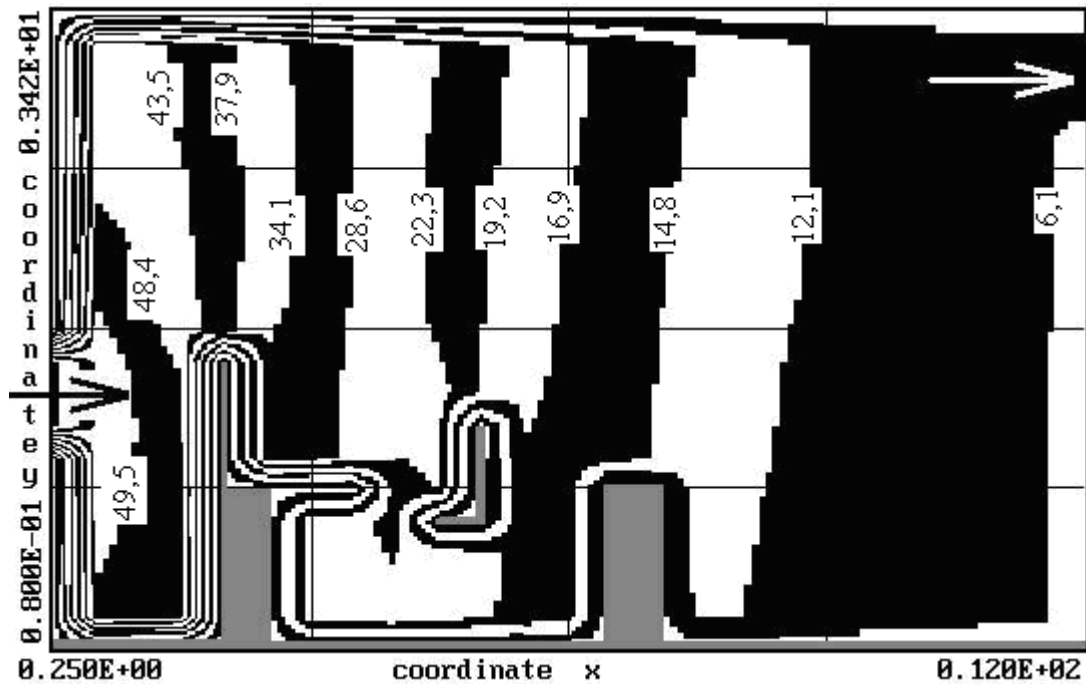


Рис. 4.6. Концентрационное поле отрицательных аэроионов в помещении
($C_w \cdot 10^{-9}$, частиц/м³)

Для решения задачи потребовалось около 1 минуты машинного времени.

4.2. Оценка параметров аэроионного режима в помещении на базе разработанной CFD модели при установке ионизатора непосредственно внутри помещения

В данном подразделе представлены результаты решения комплекса задач по оценке аэроионного режима в помещении при установке в нем ионизатора.

Задача 1. Анализ аэроионного режима в помещении с одним рабочим местом

В данном примере рассмотрено моделирование аэроионного режима в помещении, внутри которого расположен ионизатор, генерирующий отрицательные аэроионы.

На рисунке 4.7. показана схема расчетной области – помещения, в котором моделируется аэроионный режим.

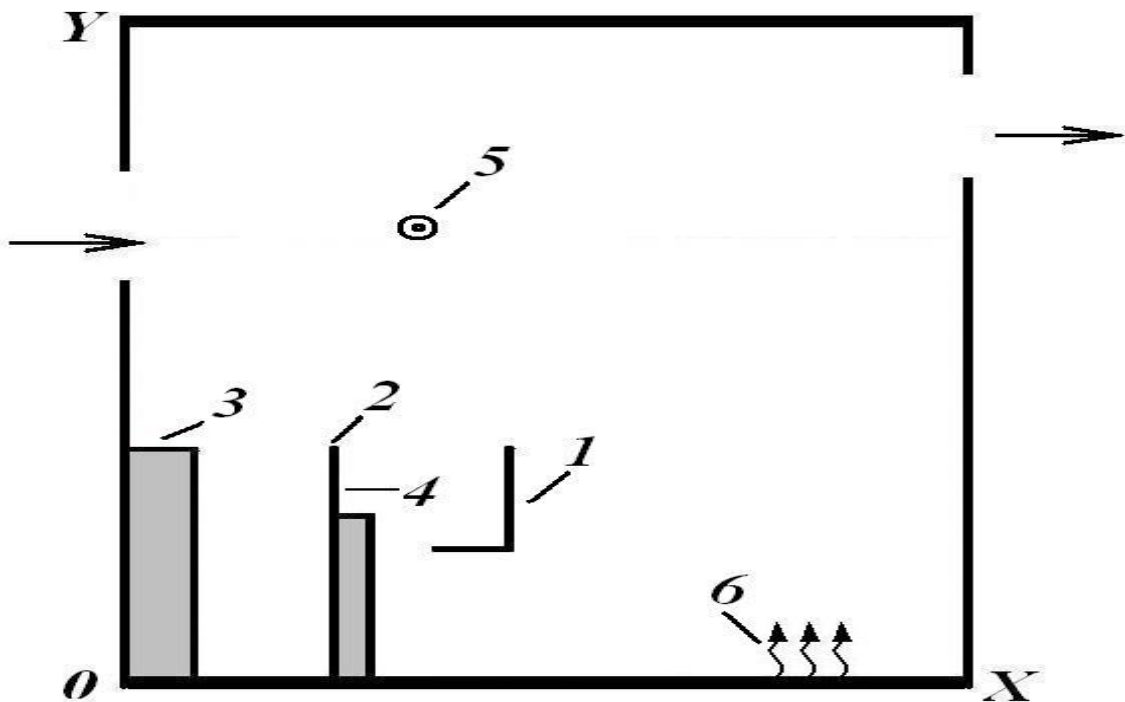


Рис. 4.7. Схема расчетной области: 1 – стул; 2 – рабочее место; 3 – шкаф; 4 – источник эмиссии положительных ионов; 5 – ионизатор воздуха; 6 – место эмиссии пыли

В рабочей зоне (рис. 4.7, позиция 4) происходит эмиссия положительных ионов с интенсивностью $Q_B = 6 \times 10^4$ частиц/с. Поступление отрицательных ионов в помещение происходит от ионизатора (рис. 4.7) интенсивностью $Q_C = 20 \times 10^{11}$ частиц/с. В помещении происходит выброс пыли в количестве $Q_D = 2 \times 10^6$ частиц/с (зона пылевыведения условно

показана волнистыми стрелками на рисунке 4.7). Остальные параметры задачи таковы: размеры комнаты 6,0 м × 4,0 м; кратность воздухообмена 3 час⁻¹; $\alpha = 1,5 \times 10^{-12}$ м³/с, $\beta = 1 \times 10^{-12}$ м³/с [131], коэффициенты турбулентной диффузии по всем направлениям приняты равными 10⁻⁷ м²/с [131]. Расчет выполнен для трех различных расположений ионизатора в помещении.

Результаты вычислительного эксперимента приведены на рисунках 4.8 – 4.16. На данных рисунках показаны матрицы значений концентрации отрицательных ионов внутри помещения (место размещения ионизатора представлено условно «кружком»), распределение положительных аэроионов и пыли в помещении. Вычислительный эксперимент проводился для трех различных вариантов расположения ионизатора внутри помещения.

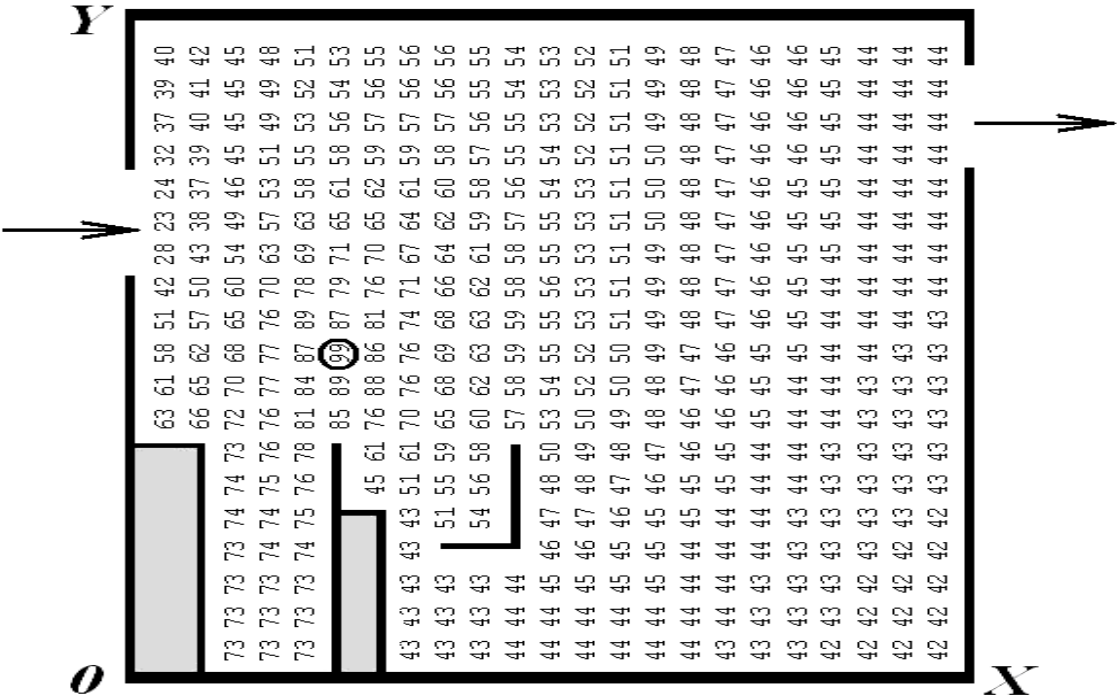


Рис. 4.8. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении (первый вариант расположения ионизатора,

$$C_{\max} = 0,17 \times 10^{12} \text{ частиц/м}^3$$

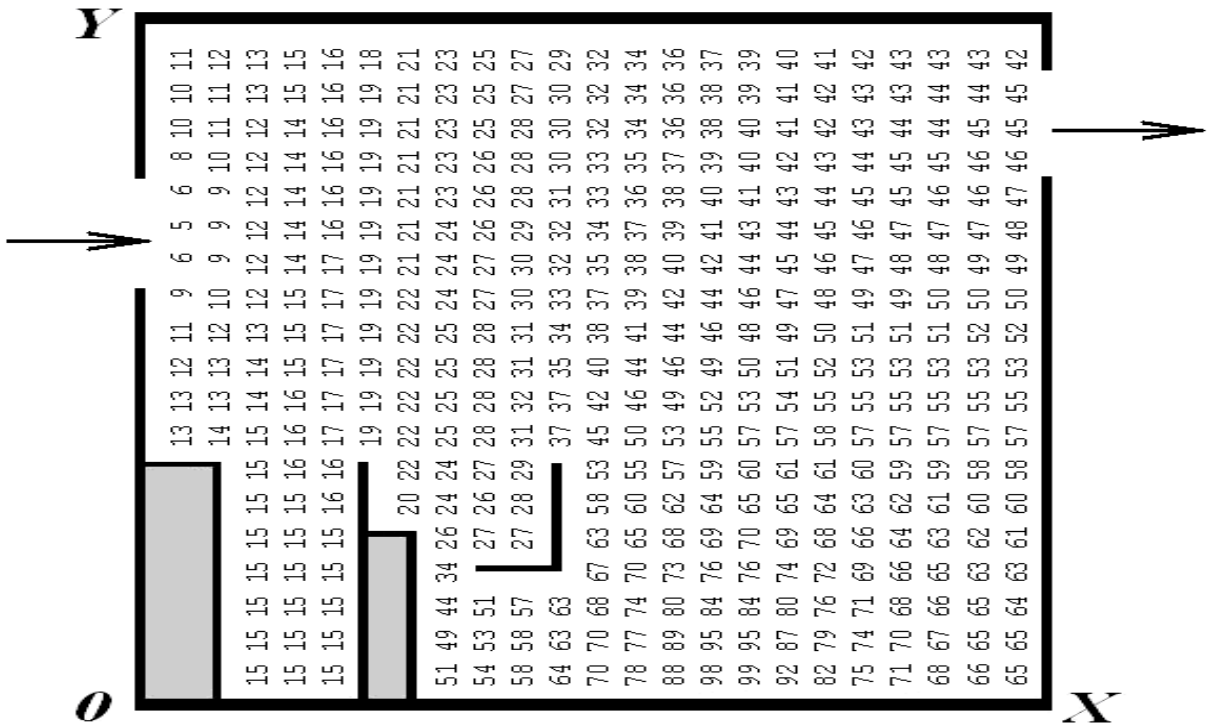


Рис. 4.13. Распределение концентрации пыли в помещении (второй вариант расположения ионизатора)

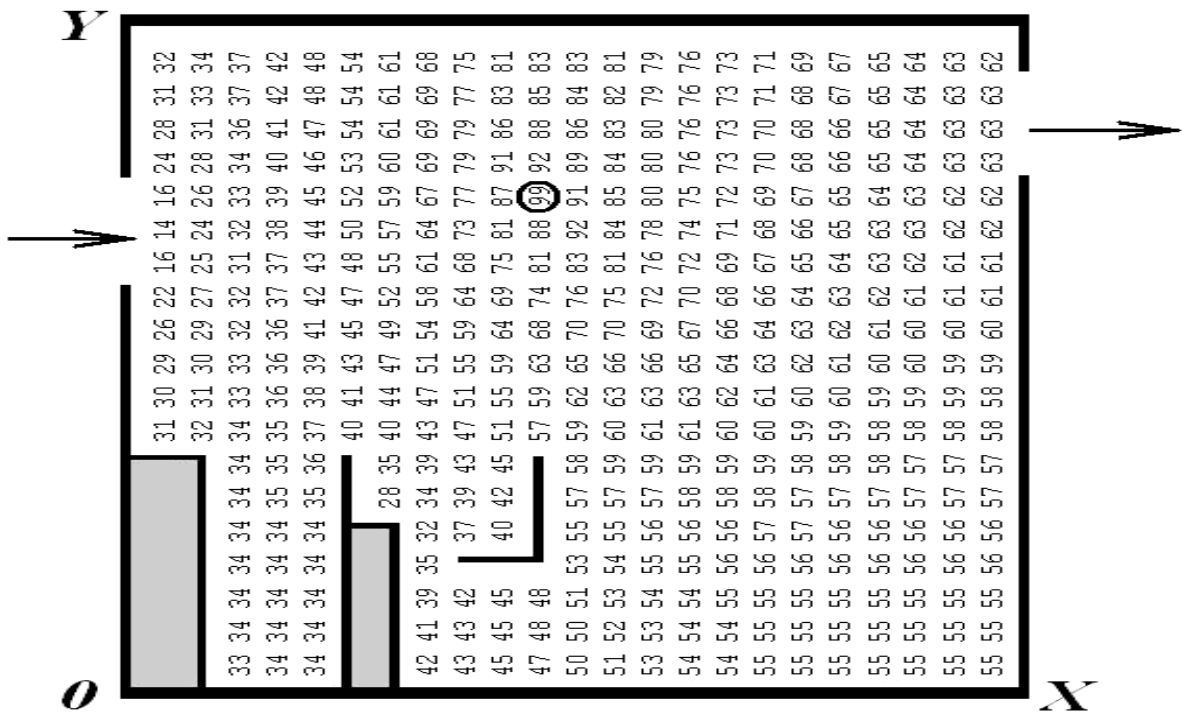


Рис. 4.14. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении (третий вариант расположения ионизатора,

$$C_{\max} = 0,22 \times 10^{12} \text{ частиц/м}^3$$

Практический интерес представляет прогноз аэроионного режима в рабочих зонах, в частности, там, где находятся органы дыхания работников. Из рисунков 4.8, 4.11 и 4.14 видно, что картина распределения отрицательных аэроионов в помещении имеет существенно неравномерный характер. Для оценки аэроионного режима выбрана позиция над спинкой стула, т.е. там, где находится голова работника.

Результаты расчета концентрации C_w отрицательных аэроионов для каждой такой зоны таковы: первый вариант – $C_w = 0,09 \times 10^{12}$ частиц/м³; второй вариант – $C_w = 0,07 \times 10^{12}$ частиц/м³; третий вариант – $C_w = 0,12 \times 10^{12}$ частиц/м³. Так как максимально допустимая концентрация отрицательных ионов не должна быть более $0,05 \times 10^{12}$ частиц/м³, то очевидно, что в каждом варианте имеет место превышение этой нормы. Для достижения этой нормы необходимо, например, уменьшить интенсивность их эмиссии. Так, в случае третьего варианта, интенсивность эмиссии ионов следует уменьшить примерно в три раза.

На рисунке 4.17 показано распределение концентрации отрицательных ионов на уровне расположения органов дыхания работника для трех вариантов размещения ионизатора в помещении. Видно, как изменяется концентрация отрицательных ионов в зависимости от изменения местоположения ионизатора.

Подобным образом, варьируя местом размещения ионизатора в помещении, можно обеспечить нормативные значения концентраций аэроионов в месте расположения органов дыхания работника.

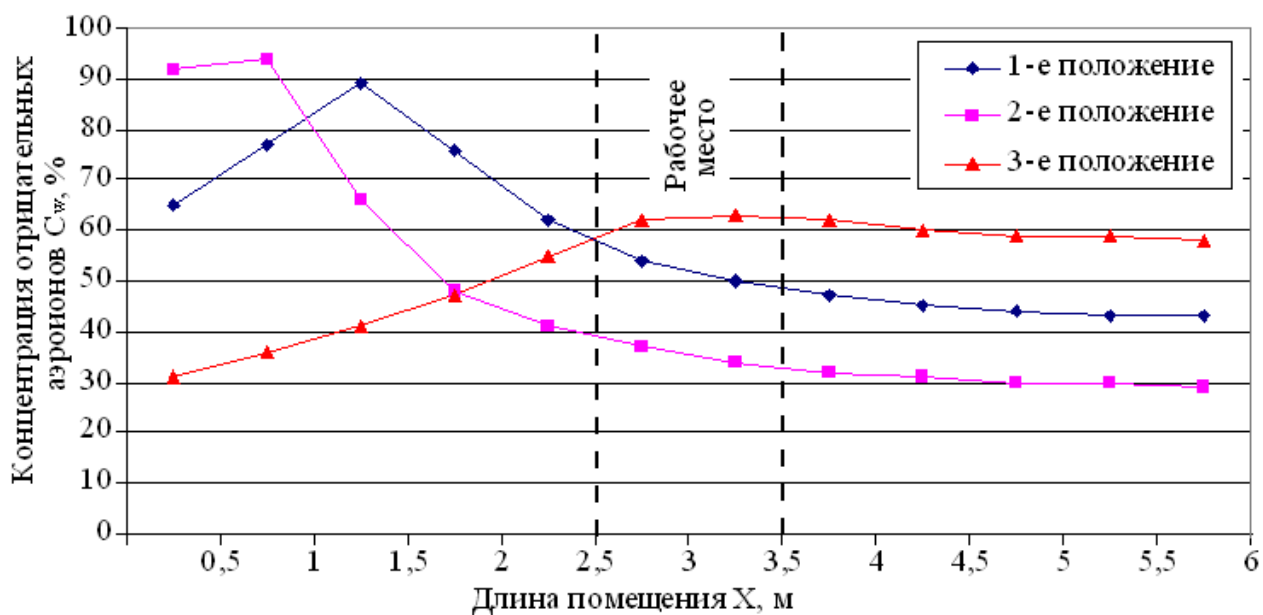


Рис. 4.17. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении на уровне расположения органов дыхания человека для трех положений ионизатора, соответствующих рисункам 4.8, 4.11 и 4.14

Отметим, что расчет одного варианта задачи на базе разработанной CFD модели составил порядка 3 минут компьютерного времени.

Задача 2. Анализ аэроионного режима в помещении при установке ионизатора в верхней части помещения и эмиссии положительных ионов внутри мебели

Разработанная численная CFD модель была применена для расчета аэроионного режима в помещении, внутри которого располагалось устройство, генерирующее отрицательные ионы.

На рисунке 4.18 показана схема расчетной области – помещения, в котором моделируется аэроионный режим. В помещении расположены два рабочих места (рис. 4.18).

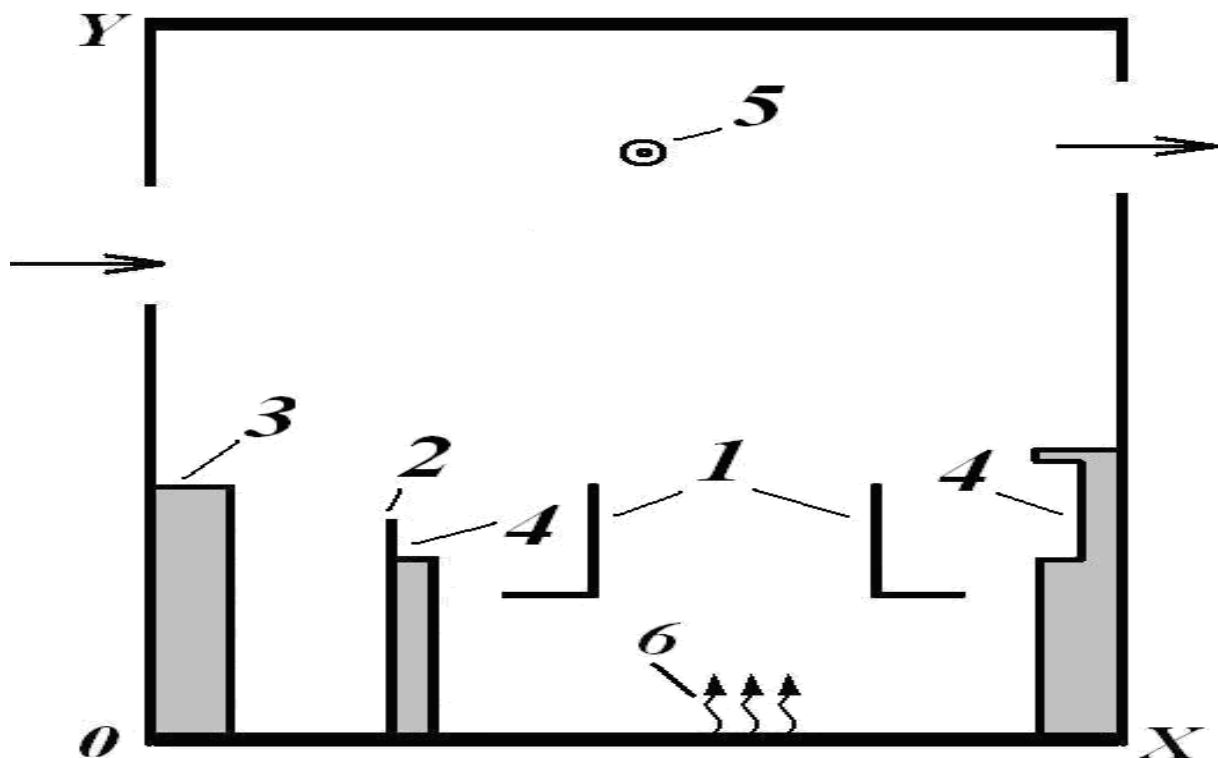


Рис. 4.18. Схема расчетной области (два рабочих места): 1 – стул; 2 – рабочее место (компьютер); 3 – шкаф; 4 – источник эмиссии положительных ионов; 5 – ионизатор воздуха; 6 – место эмиссии пыли

Эмиссия положительных ионов происходит в обеих рабочих зонах, причем эмиссия их на втором рабочем месте происходит внутри мебели, как бы внутри «выемки». Интенсивность эмиссии положительных ионов составляет $Q_B = 3 \times 10^3$ частиц/с. Поступление отрицательных ионов в помещение происходит от ионизатора (рис. 4.18) интенсивностью $Q_C = 15 \times 10^{11}$ частиц/с. В помещении происходит выброс пыли в количестве $Q_D = 10^6$ частиц/с (зона пылевыделения условно показана волнистыми стрелками на рисунке 4.18). Физические параметры задачи таковы: размеры комнаты $6,0 \text{ м} \times 4,0 \text{ м}$; кратность воздухообмена 3 час^{-1} ; $\alpha = 1,5 \times 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$, $\beta = 1 \times 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$ [131], коэффициенты турбулентной диффузии по всем направлениям приняты равными $10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ [131]. На рисунке 4.18 «стрелками» показаны положения отверстий вентиляции.

Результаты расчета представлены на рисунках 4.19 и 4.20. Концентрационное поле аэроионов представлено в виде матрицы значений концентрации ионов обеих полярностей внутри помещения (место размещения ионизатора показано условно «кружком» на рисунке 4.19).

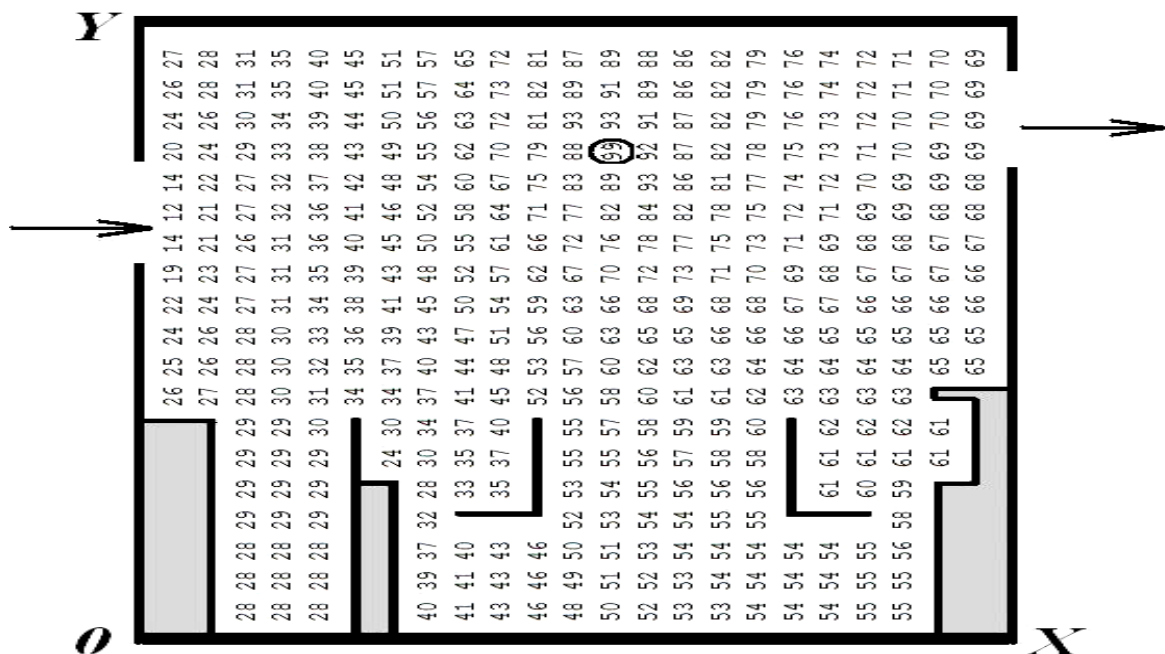


Рис. 4.19. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении ($C_{\max} = 0,18 \times 10^{12}$ частиц/м³)

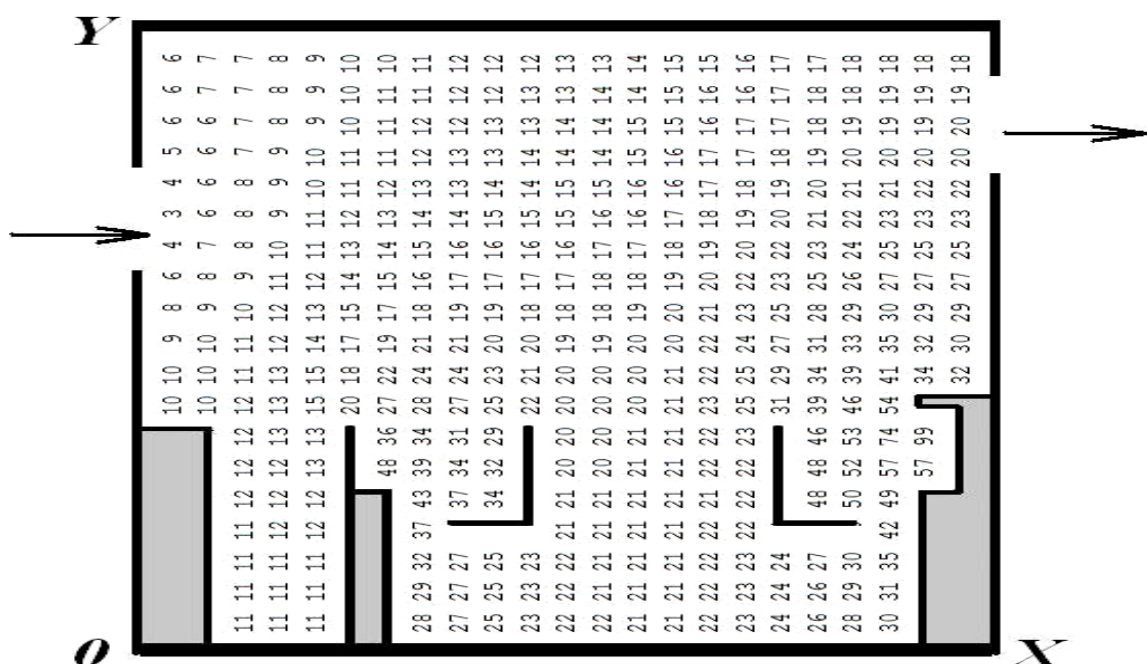


Рис. 4.20. Распределение концентрации положительных аэроионов в помещении ($C_{\max} = 0,86 \times 10^4$ частиц/м³)

На основании полученных расчетных данных можно оценить концентрацию аэроионов в любом месте в помещении. Для оценки концентрации аэроионов в месте расположения органов дыхания работников выбрана позиция над спинкой стула (здесь находится голова работника). Результаты расчета концентрации C_w отрицательных аэроионов для каждой рабочей зоны таковы: первая рабочая зона – $C_w = 0,09 \times 10^{12}$ частиц/м³ (52 % от максимальной концентрации в помещении); вторая рабочая зона – $C_w = 0,11 \times 10^{12}$ частиц/м³; (63 % от максимальной концентрации в помещении). Если учесть, что максимально допустимая концентрация отрицательных ионов не должна быть более $0,05 \times 10^{12}$ частиц/м³, то очевидно, что в каждой рабочей зоне имеет место превышение этой нормы. Для достижения этой нормы необходимо уменьшить интенсивность эмиссии отрицательных аэроионов от ионизатора.

Таким образом, варьируя интенсивность эмиссии отрицательных аэроионов от ионизатора, можно обеспечить нормативные значения концентраций аэроионов в месте расположения органов дыхания работника.

Задача 3. Анализ аэроионного режима в помещении с двумя рабочими местами при установке ионизатора в верхней части помещения

Рассматривалась задача оценки аэроионного режима в помещении, в котором расположено два рабочих места.

Схема расчетной области представлена на рисунке 4.21. В верхней части рассматриваемого помещения установлено устройство для генерирования отрицательных ионов (рис. 4.21, позиция 3). Данное устройство размещено на специальной подставке возле потолка помещения (ее положение и форма задается маркерами). Эмиссия отрицательных ионов составляет $Q_C = 6 \times 10^{11}$ частиц/с. Рабочая зона представлена двумя столами и

размещенными рядом стульями. Между рабочими местами расположен стеллаж, а возле левой стены помещения находится шкаф.

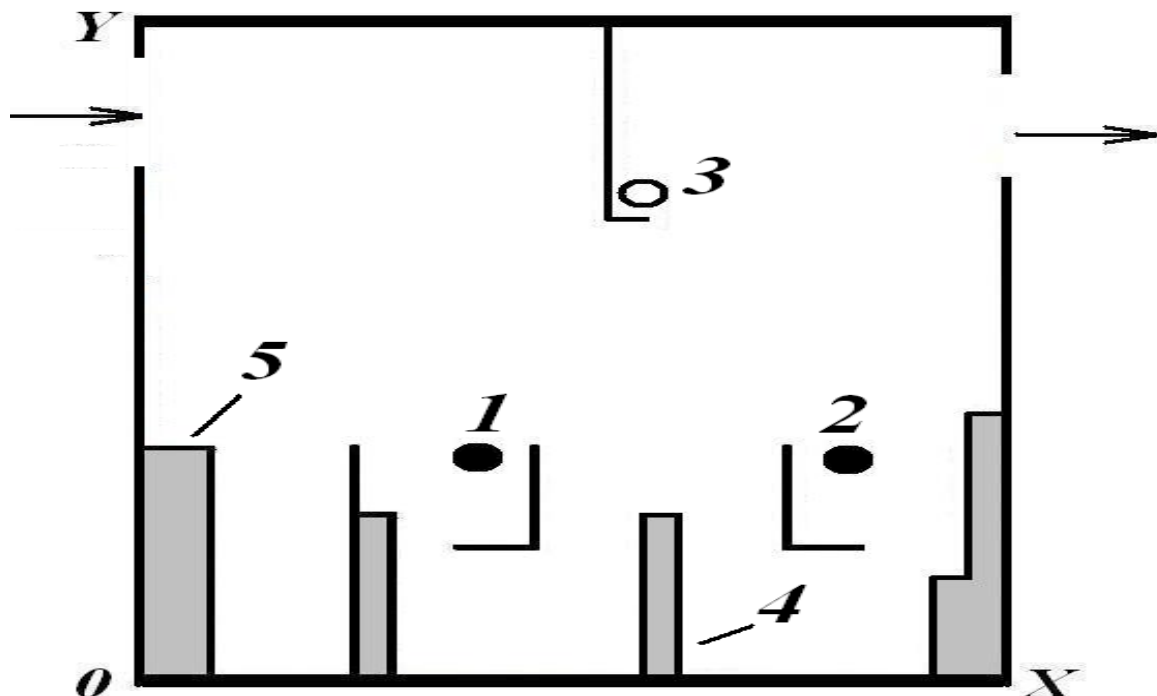


Рис. 4.21. Схема расчетной области: 1, 2 – место эMISSION положительных ионов (голова работника); 3 – место эMISSION отрицательных ионов (положение ионизатора); 4 – стеллаж; 5 – шкаф

Источником эMISSION положительных ионов в помещении являются люди, поэтому в зоне расположения их органов дыхания (рис. 4.21, позиция 1 и 2) задаются точечные источники эMISSION положительных ионов с интенсивностью $Q_B = 4 \times 10^7$ частиц/с. Остальные параметры задачи таковы: размеры расчетной области $6,25 \text{ м} \times 4,20 \text{ м}$; кратность воздухообмена $2,5 \text{ час}^{-1}$; положение входного и выходного отверстий вентиляции показано стрелкой на рисунке 4.19; $\alpha = 1,5 \times 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$, $\beta = 1 \times 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$ [131], коэффициенты турбулентной диффузии по всем направлениям приняты равными $\mu_x = \mu_y = kV$ (здесь $k = 0,1$ – параметр, V – местная скорость в конкретной расчетной точке, данная скорость определяется из решения аэродинамической задачи). В помещении отсутствует эMISSION пыли.

Цель расчета – определить концентрацию отрицательных ионов в помещении и в зоне расположения органов дыхания людей.

Результаты численного моделирования представлены на рисунке 4.22. На данном рисунке показано концентрационное поле отрицательных ионов внутри помещения.

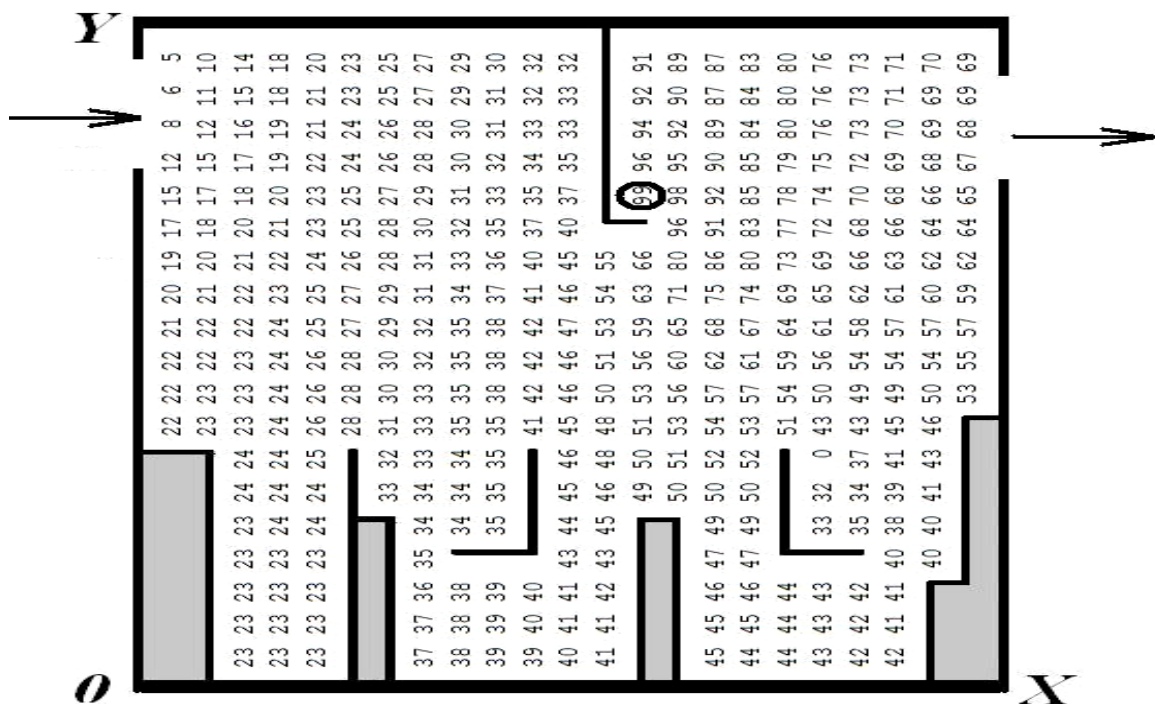


Рис. 4.22. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении ($C_{\max} = 0,12 \times 10^{12}$ частиц/м³)

Как видно, концентрация C_w отрицательных аэроионов в зоне расположения органов дыхания людей (подзона вблизи верхней части стульев) составляет порядка $C_w = 39\%$ ($C_w = 0,046 \times 10^{12}$ частиц/м³) – в первой рабочей зоне и $C_w = 54\%$ ($C_w = 0,065 \times 10^{12}$ частиц/м³) – во второй рабочей зоне. Если принять во внимание, что максимально допустимая концентрация отрицательных ионов не должна быть более $0,05 \times 10^{12}$ частиц/м³, то очевидно, что в первой рабочей зоне имеет место соответствие этой норме, а во второй – нет. Если уменьшить интенсивность эмиссии отрицательных ионов до величины $Q_c = 4 \times 10^{11}$ частиц/с, то расчет показывает, что концентрация отрицательных ионов на первом рабочем

месте составит $C_w = 0,03 \times 10^{12}$ частиц/м³, а на втором рабочем месте $C_w = 0,05 \times 10^{12}$ частиц/м³. Таким образом, варьируя значениями эмиссии отрицательных ионов от ионизатора, можно регулировать параметры аэроионного режима в помещении.

Для решения задачи потребовалось 3 минуты компьютерного времени.

Задача 4. Моделирование аэроионного режима в помещении с учетом влияния на него струи воздушного потока, выходящей из ионизатора

В настоящее время сделан подход к организации персональной подачи воздуха в рабочую зону, как показано на рисунке 4.23 [90, 135]. Ниже приведено решение задачи по оценке аэроионного режима при такой персонифицированной схеме.

На рисунке 4.24 представлена схема расчетной области – помещения, в которое поступает воздух через одно отверстие системы вентиляции. Выход воздуха из помещения происходит через отверстие на противоположной стенке. Рабочая зона представлена рабочим местом (стул и стол), перед и за рабочим местом расположены стеллажи. Ионизатор располагается на крайнем левом стеллаже. При моделировании учитывается скорость выхода ионизированной струи воздуха.

Источником эмиссии положительных ионов в помещении является человек, поэтому в зоне расположения его органов дыхания (рис. 4.24, позиция 4) задается точечный источник эмиссии положительных ионов с интенсивностью $Q_B = 7 \times 10^5$ частиц/с. Остальные параметры задачи таковы: размеры расчетной области 12,25 м × 3,50 м; кратность воздухообмена 2 час⁻¹; положение входного и выходного отверстий вентиляции показано стрелками на рисунке 4.24; $\alpha = 1,5 \times 10^{-12}$ м³/с, $\beta = 1 \times 10^{-12}$ м³/с [131]; коэффициенты турбулентной диффузии по всем направлениям приняты равными $\mu_x = \mu_y = kV$ (здесь $k = 0,1$ – параметр, V – местная скорость в

конкретной расчетной точке, данная скорость определяется из решения аэродинамической задачи). В помещении происходит эмиссия пыли, $Q_D = 52 \times 10^6$ частиц/с (положение выброса пыли показано на рисунке 4.24 волнистой линией).

Скорость вдува ионизированной струи составляет 0,3 м/с, концентрация отрицательных ионов в этой струе 25×10^9 частиц/м³. Таким образом, в данной задаче учитывается аэродинамика взаимодействия вентиляционного потока воздуха со струей ионизированного воздуха.



Рис. 4.23. Принцип подачи «персонализированного воздуха»: небольшое количество чистого ионизированного воздуха мягко подается непосредственно в зону дыхания человека [90, 135]

Результаты численного моделирования приведены на рисунке 4.25. На данном рисунке показано концентрационное поле отрицательных ионов внутри помещения.

Хорошо видна подзона с большим градиентом концентрации ионов возле ионизатора на стеллаже, то есть там, где выходит струя ионизированного воздуха. В рабочей зоне, там, где размещена голова

работника, концентрация отрицательных ионов составляет 16×10^9 частиц/м³, что соответствует принятым нормативам.

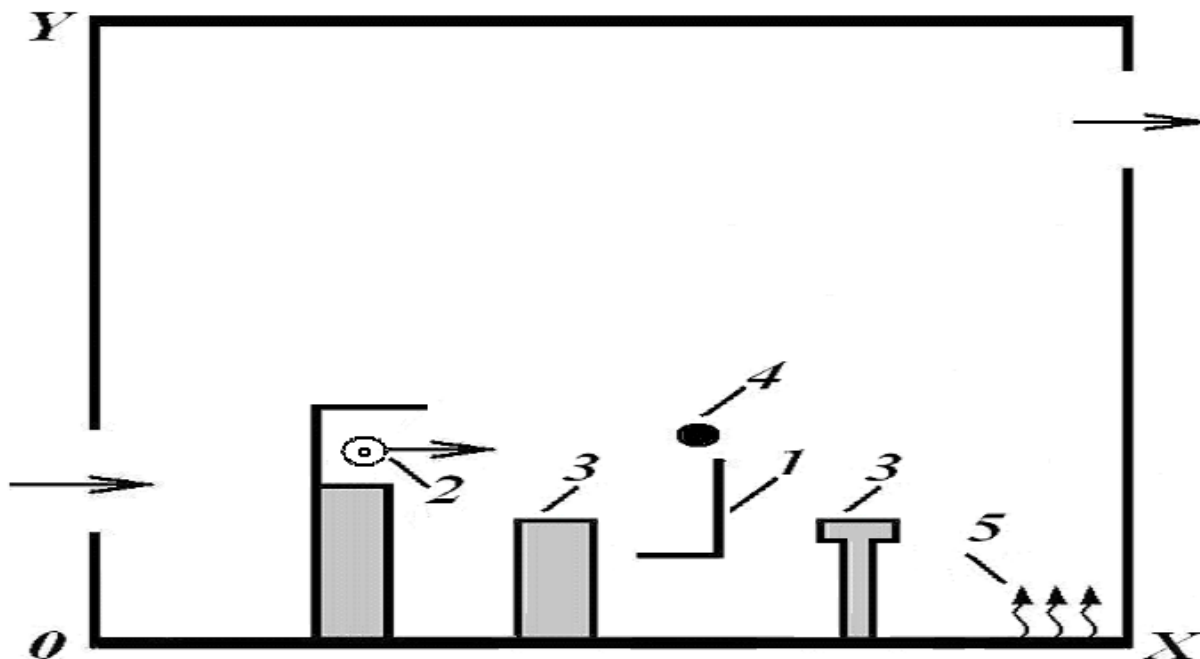


Рис. 4.24. Схема расчетной области: 1 – стул; 2 – ионизатор воздуха; 3 – стеллажи; 4 – место эмиссии положительных ионов (положение органов дыхания); 5 – место эмиссии пыли

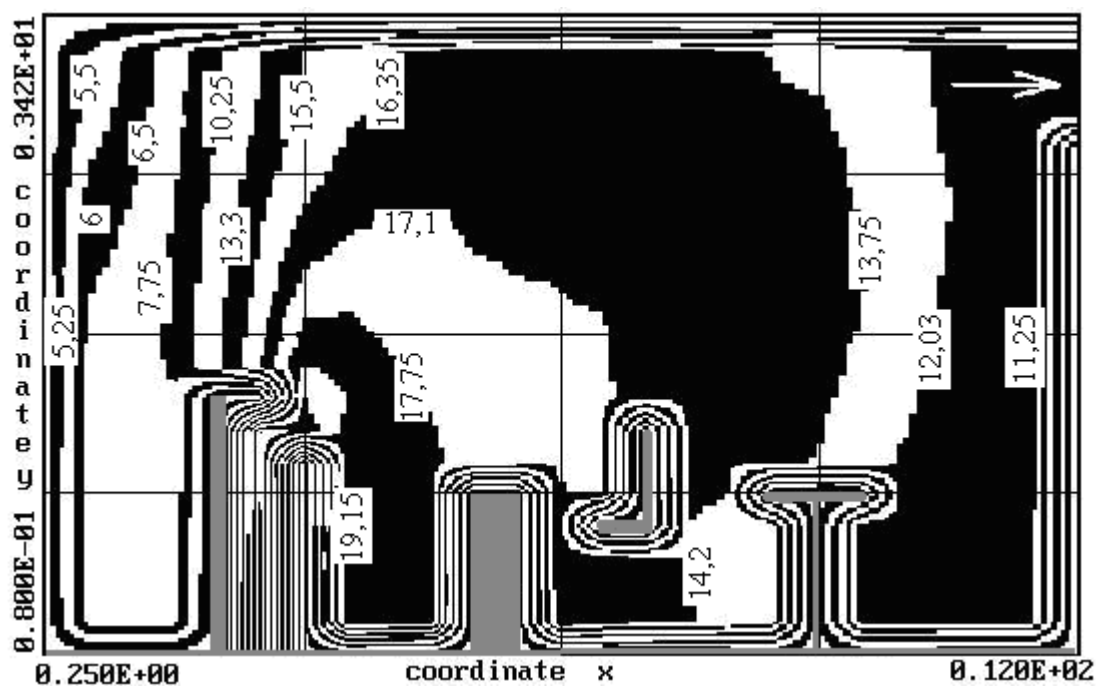


Рис. 4.25. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении ($C_w \cdot 10^{-9}$, частиц/м³)

На рисунке 4.26 показано распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении на уровне расположения органов дыхания работника.

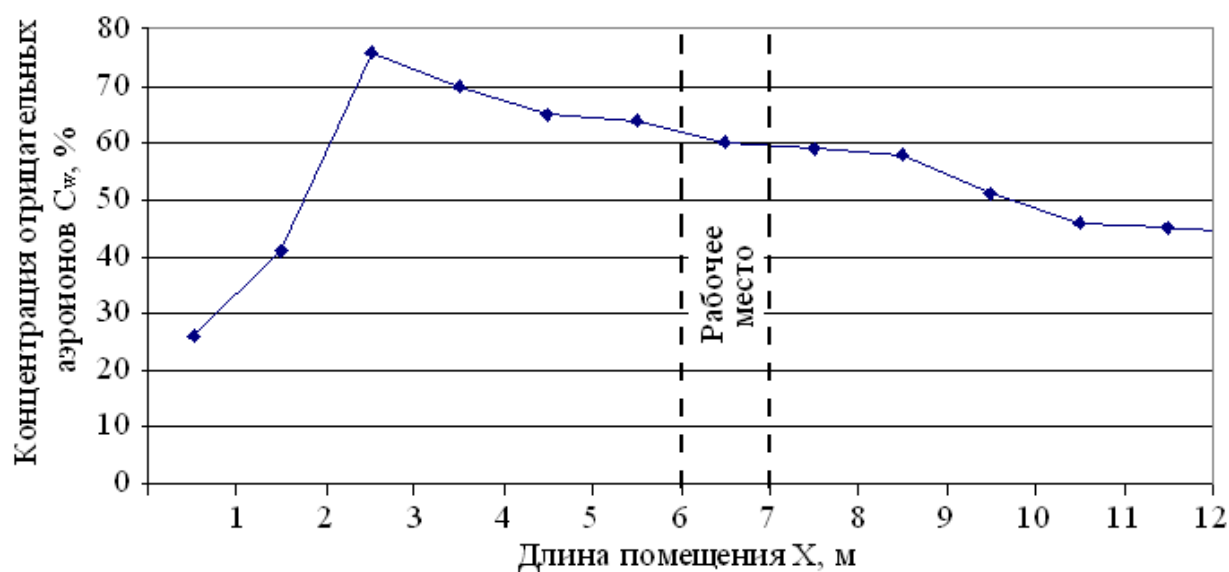


Рис. 4.26. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении на уровне расположения органов дыхания человека

Отметим, что для решения задачи потребовалось порядка 1 минуты компьютерного времени.

Задача 5. Моделирование аэроионного режима при реинжиниринге

Разработанная численная CFD модель была применена для моделирования аэроионного режима в помещении, в котором производилась перестановка мебели, т.е. был выполнен реинжиниринг.

Схема расчетной области показана на рисунке 4.27. Воздух поступает в помещение через вентиляционное отверстие в левой стенке помещения, как показано на рисунке. Выход воздуха из помещения происходит через выпускное отверстие в правой стене. Рабочая зона включает в себя стол и расположенный рядом стул. Размещение ионизатора показано на рисунках 4.27 и 4.28, позиция 5. Интенсивность эмиссии отрицательных ионов от ионизатора составляет $1,3 \times 10^{11}$ частиц/с.

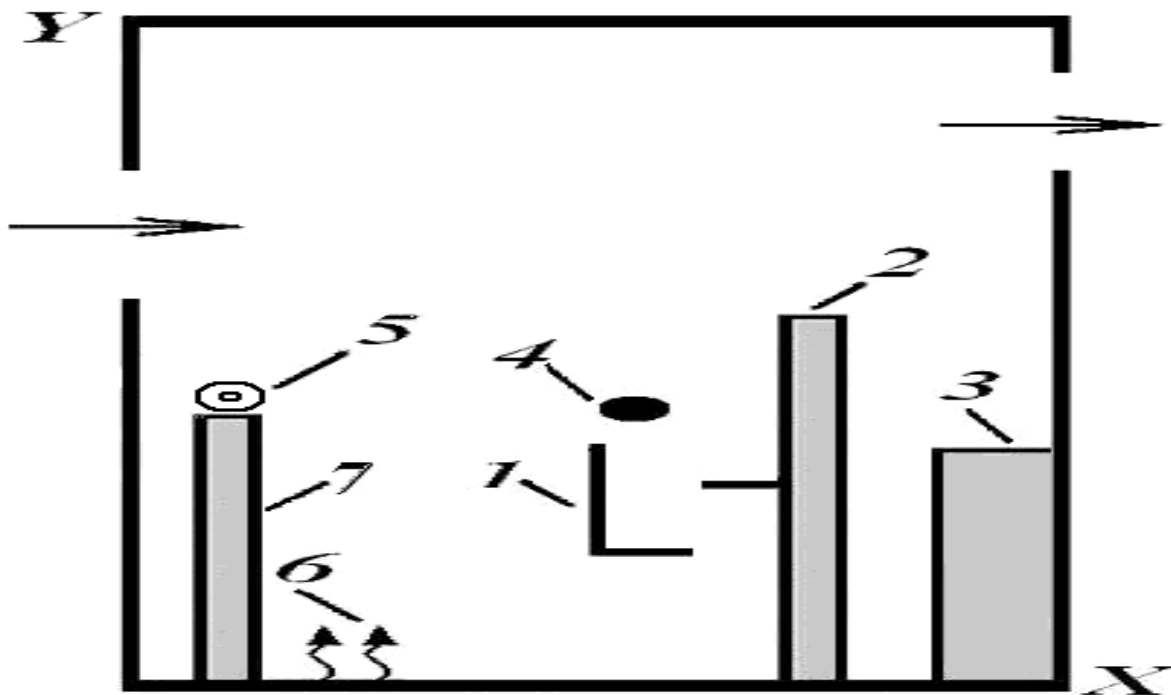


Рис. 4.27. Расчетная область (до реинжиниринга): 1 – стул; 2 – рабочий стол; 3 – стеллаж; 4 – место эмиссии положительных ионов (положение органов дыхания); 5 – ионизатор; 6 – место выброса пыли; 7 – тумба

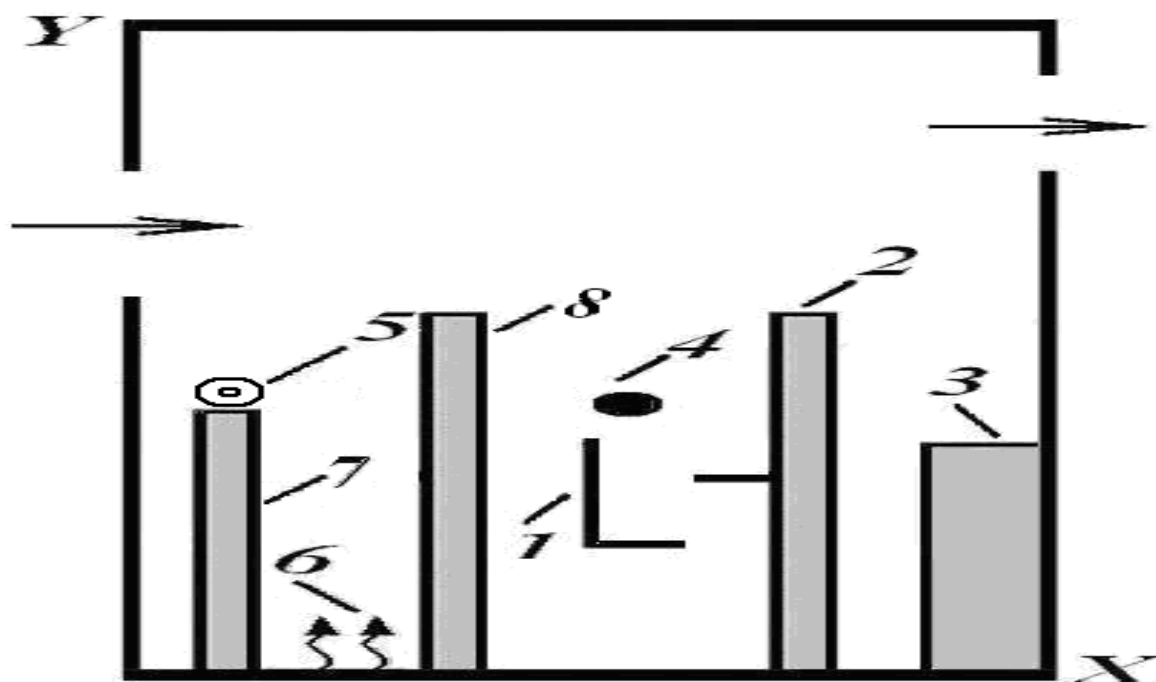


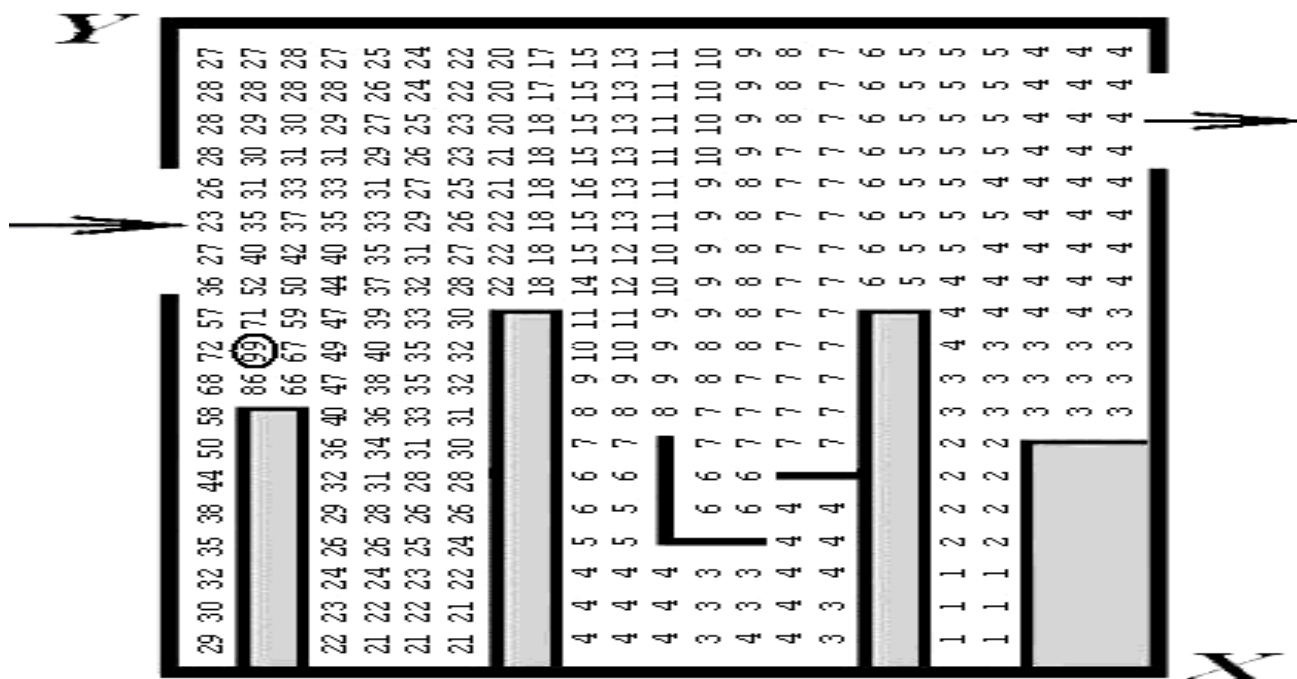
Рис. 4.28. Расчетная область (после реинжиниринга): 1 – стул; 2 – рабочий стол; 3 – стеллаж; 4 – место эмиссии положительных ионов (положение органов дыхания); 5 – ионизатор; 6 – место выброса пыли; 7 – тумба; 8 – шкаф

Источником эмиссии положительных ионов в помещении являются люди. Поэтому в зоне их органов дыхания (рис. 4.27, позиция 4) располагается точечный источник эмиссии положительных ионов интенсивностью $Q_B = 7 \times 10^4$ частиц/с. Остальные параметры задачи: размеры расчетной области $7,25 \text{ м} \times 4,20 \text{ м}$; кратность воздухообмена $2,5 \text{ час}^{-1}$; положение впускного и выпускного вентиляционных отверстий показано стрелками на рисунках 4.27 и 4.28; $\alpha = 1,5 \times 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$, $\beta = 1 \times 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$ [131]; коэффициенты турбулентной диффузии по всем направлениям приняты равными $\mu_x = \mu_y = kV$ (здесь $k = 0,1$ – параметр, V – местная скорость в конкретной расчетной точке, данная скорость определяется из решения аэродинамической задачи). В помещении происходит эмиссия пыли $Q_D = 45 \times 10^4$ частиц/с (положение выброса пыли показано на рисунках 4.27 и 4.28 волнистой линией).

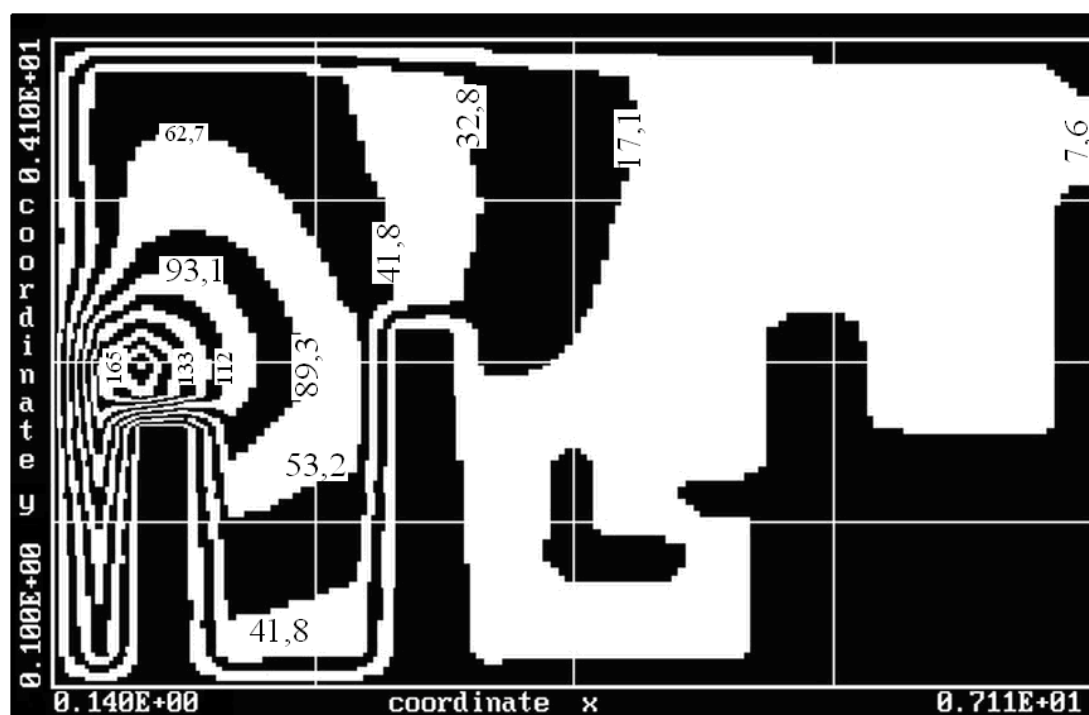
Целью численного моделирования является определение концентрации отрицательных ионов в помещении и в зоне расположения органов дыхания человека.

Результаты численного моделирования показаны на последующих рисунках 4.29 – 4.34. Для полноты картины в результате вычислительного эксперимента были определены концентрации положительных ионов и пыли перед реинжинирингом и после него.

Как показано на рисунках 4.31 и 4.34, концентрация отрицательных ионов в области органов дыхания работников (позиция над стулом) до проведения реинжиниринга составляет около $0,032 \times 10^{12}$ частиц/м³, а после реинжиниринга порядка $0,015 \times 10^{12}$ частиц/м³. То есть, концентрация снизилась в 2 раза, из-за влияния установленного оборудования (рис. 4.28, позиция 8) на формирование концентрационного поля аэроионов.



а



б

Рис. 4.34. Концентрационное поле отрицательных аэроионов в помещении (после реинжиниринга): а – поле концентраций в виде матрицы ($C_{\max} = 0,19 \times 10^{12}$ частиц/м³); б – поле концентраций в виде изолиний ($C_w \cdot 10^{-9}$, частиц/м³)

На рисунке 4.35 показано распределение концентрации отрицательных ионов в помещении на уровне расположения органов дыхания человека до проведения и после проведения реинжиниринговых работ.

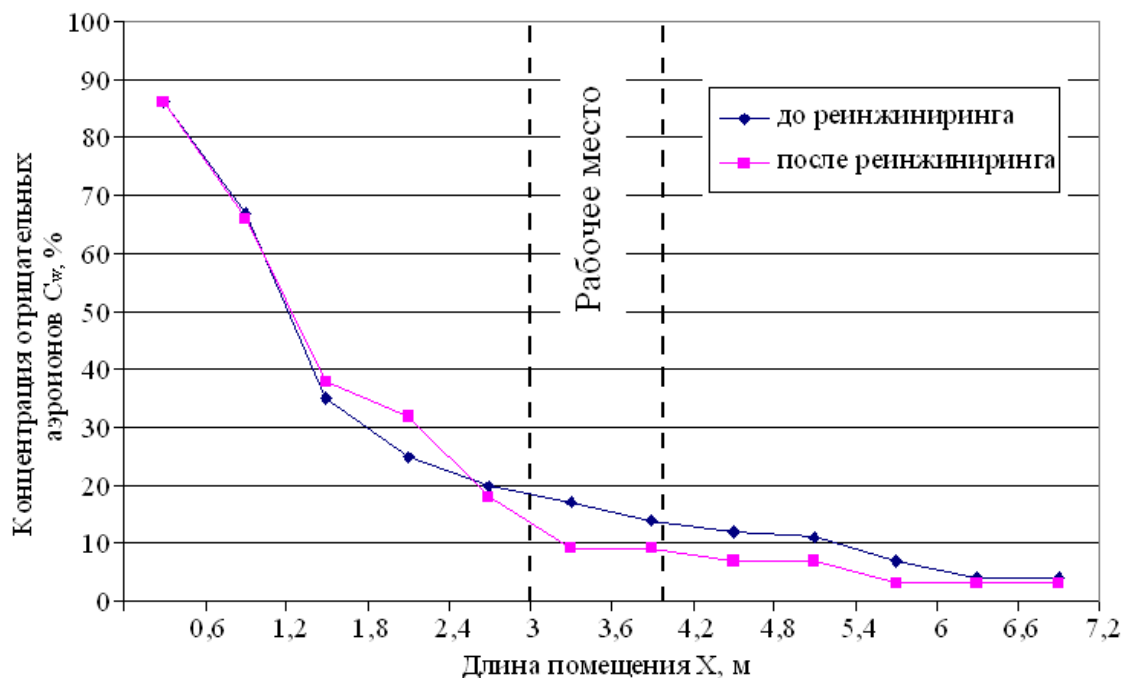


Рис. 4.35. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении на уровне расположения органов дыхания работника

Как показывают полученные результаты, можно влиять на параметры аэроионного режима путем некоторых перестановок мебели и оборудования в помещении, что особенно важно при организации новых рабочих мест, или же при необходимости проведения реинжиниринга либо редизайна помещения.

Для решения задачи потребовалось около 1 минуты машинного времени.

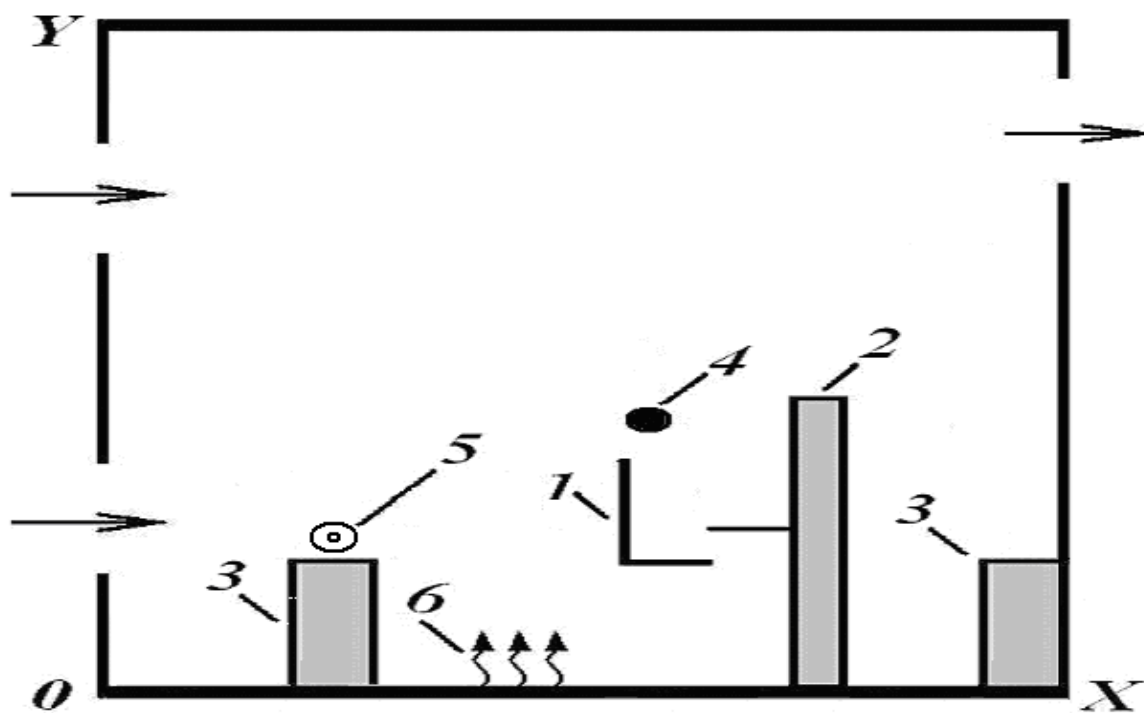
Задача 6. Исследование аэроионного режима в помещении при наличии в нем регулирующего экрана

Рассматривалась задача расчета концентрационного поля аэроионов в помещении с расположенным внутри него ионизатором. В моделируемом

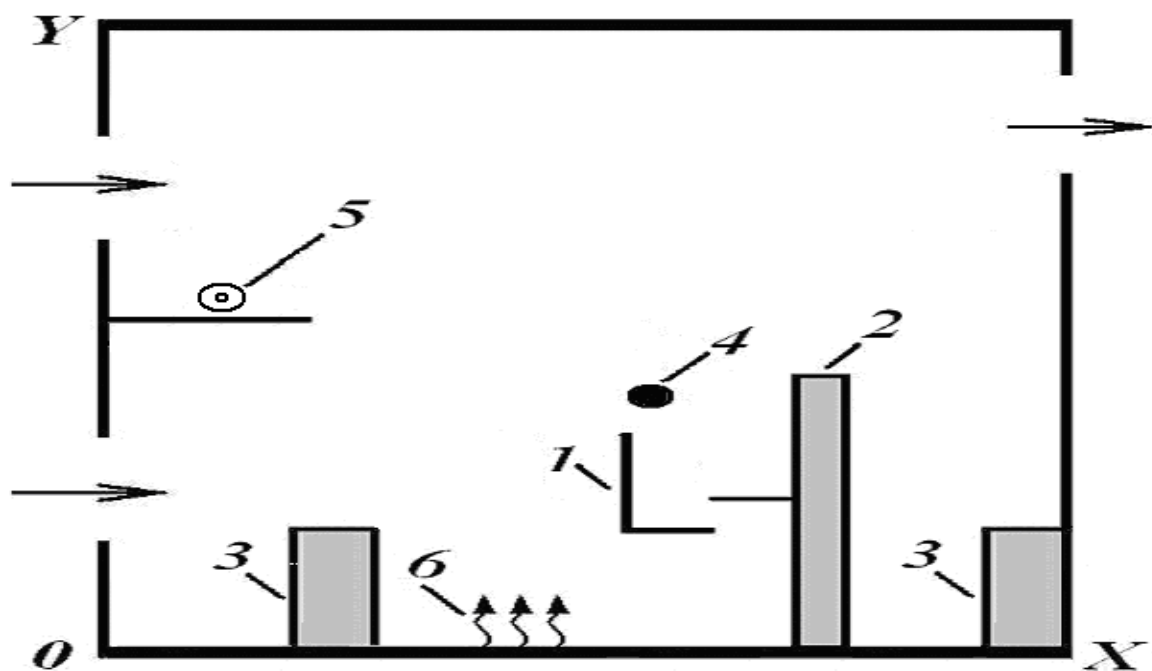
помещении предусматривалась возможность установки экрана для регулирования концентрации аэроионов.

На рисунке 4.36 представлена схема расчетной области – помещения, в которое поступает воздух через два отверстия системы вентиляции. Выход воздуха из помещения происходит через отверстие на противоположной стенке. Рабочая зона представлена рабочим местом (стул и стол), слева и справа расположены стеллажи. Рассмотрены два случая расположения ионизатора: на левом стеллаже (рис. 4.36а) и на полке, которая размещается на левой стенке помещения (рис. 4.36б).

Источником эмиссии положительных ионов в помещении является человек, поэтому в зоне расположения его органов дыхания (рис. 4.36, позиция 4) задается точечный источник эмиссии положительных ионов с интенсивностью $Q_B = 8 \times 10^4$ частиц/с. Остальные параметры задачи таковы: размеры расчетной области $8,25 \text{ м} \times 4,20 \text{ м}$; кратность воздухообмена $2,5 \text{ час}^{-1}$; положение входных и выходного отверстий вентиляции показано стрелками на рис. 4.36; $\alpha = 1,5 \times 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$, $\beta = 1 \times 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$ [131]; коэффициенты турбулентной диффузии по всем направлениям приняты равными $\mu_x = \mu_y = kV$ (здесь $k = 0,1$ – параметр, V – местная скорость в конкретной расчетной точке, данная скорость определяется из решения аэродинамической задачи). В помещении происходит эмиссия пыли, $Q_D = 4 \times 10^4$ частиц/с (положение выброса пыли показано на рисунке 4.36 волнистой линией). Интенсивность эмиссии отрицательных ионов от ионизатора составляет $Q_C = 90 \times 10^{11}$ частиц/с (первый вариант эмиссии) и $Q_C = 70 \times 10^{11}$ частиц/с (второй вариант эмиссии) для случая расположения ионизатора на стеллаже, показанного на рисунке 4.36а. Для варианта расположения ионизатора на закрепленной на стенке помещения полке, соответствующему показанному на рисунке 4.36б, интенсивность эмиссии отрицательных ионов составляет $Q_C = 70 \times 10^{11}$ частиц/с.



а



б

Рис. 4.36. Схема расчетной области: а – первый вариант расположения ионизатора; б – второй вариант расположения ионизатора; 1 – стул; 2 – рабочий стол; 3 – стеллаж; 4 – место эмиссии положительных ионов (положение органов дыхания); 5 – ионизатор воздуха; б – место эмиссии пыли

Цель численного моделирования – определить концентрацию отрицательных ионов в помещении и в зоне расположения органов дыхания человека.

Результаты численного моделирования представлены на рисунках 4.37 и 4.38 в виде концентрационного поля отрицательных ионов внутри помещения.

В результате проведенного вычислительного эксперимента установлено, что концентрация отрицательных ионов в зоне расположения органов дыхания человека составляет $C_w = 0,63 \times 10^{12}$ частиц/м³ (рис. 4.36а, первый вариант эмиссии), $C_w = 0,48 \times 10^{12}$ частиц/м³ (рис. 4.36а, второй вариант эмиссии), и $C_w = 0,27 \times 10^{12}$ частиц/м³ для ионизатора, расположенного на полке (рис. 4.36б). Таким образом, для всех рассмотренных вариантов имеет место превышение допустимой нормы, которая составляет $0,05 \times 10^{12}$ частиц/м³.

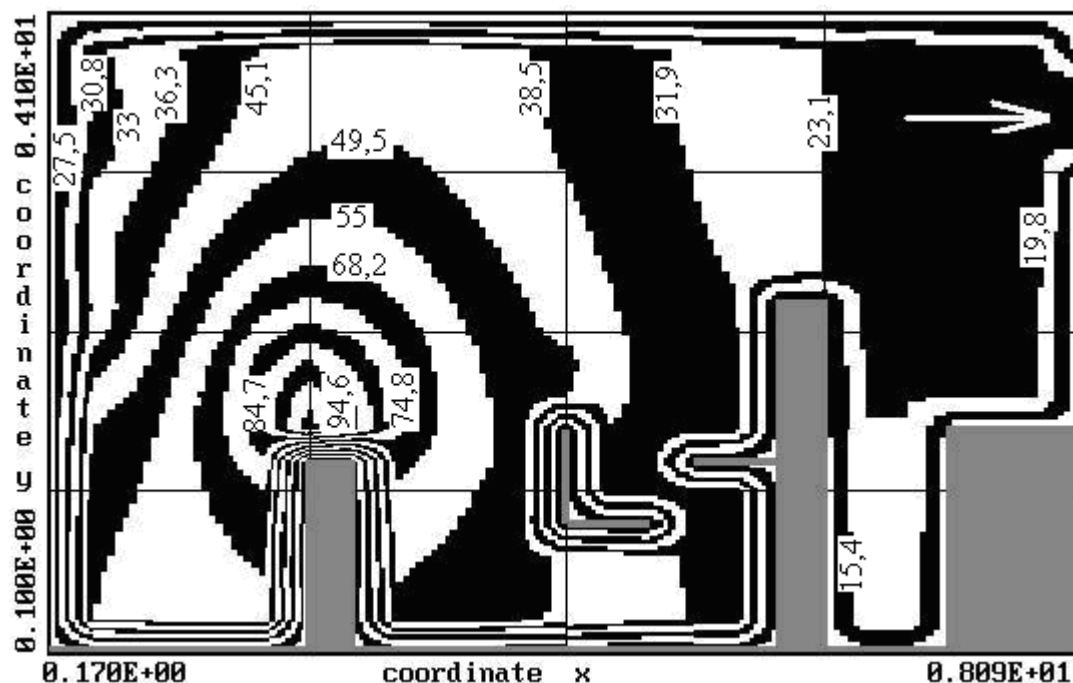


Рис. 4.37. Распределение концентрации отрицательных аэроионов ($C_w \cdot 10^{-10}$, частиц/м³) в помещении для расположения ионизатора, соответствующего рисунку 4.36а ($Q_C = 70 \times 10^{11}$ частиц/с, $C_{\max} = 11,6 \times 10^{11}$ частиц/м³)

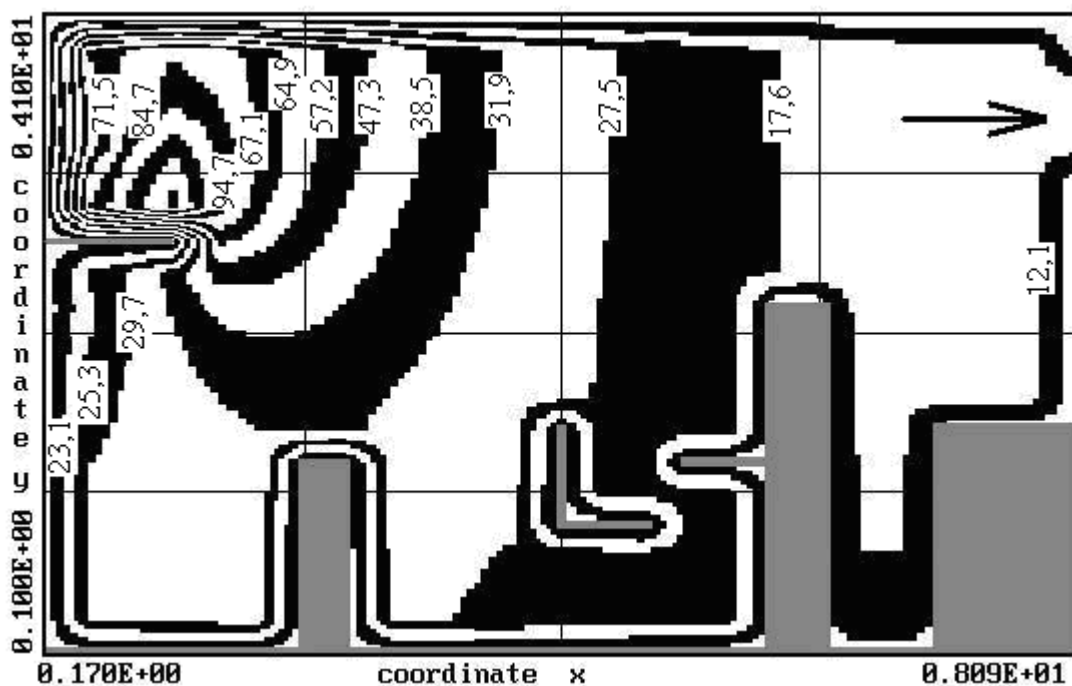


Рис. 4.38. Распределение концентрации отрицательных аэроионов ($C_w \cdot 10^{-10}$, частиц/м³) в помещении для расположения ионизатора, соответствующего рисунку 4.36б ($Q_C = 70 \times 10^{11}$ частиц/с, $C_{\max} = 11,1 \times 10^{11}$ частиц/м³)

Следует отметить, что изменить интенсивность концентрационного поля ионов в помещении можно, не только изменяя положение ионизатора или его интенсивность, но и путем применения регулирующего экрана. Экран может быть расположен различным образом в помещении относительно ионизатора и рабочих зон. Рациональное размещение экрана в помещении может быть определено путем расчета различных вариантов его размещения с помощью разработанной численной модели. Например, выберем вариант размещения экрана перед полкой, где расположен ионизатор (рис. 4.39) и выполним расчет концентрационного поля отрицательных аэроионов.

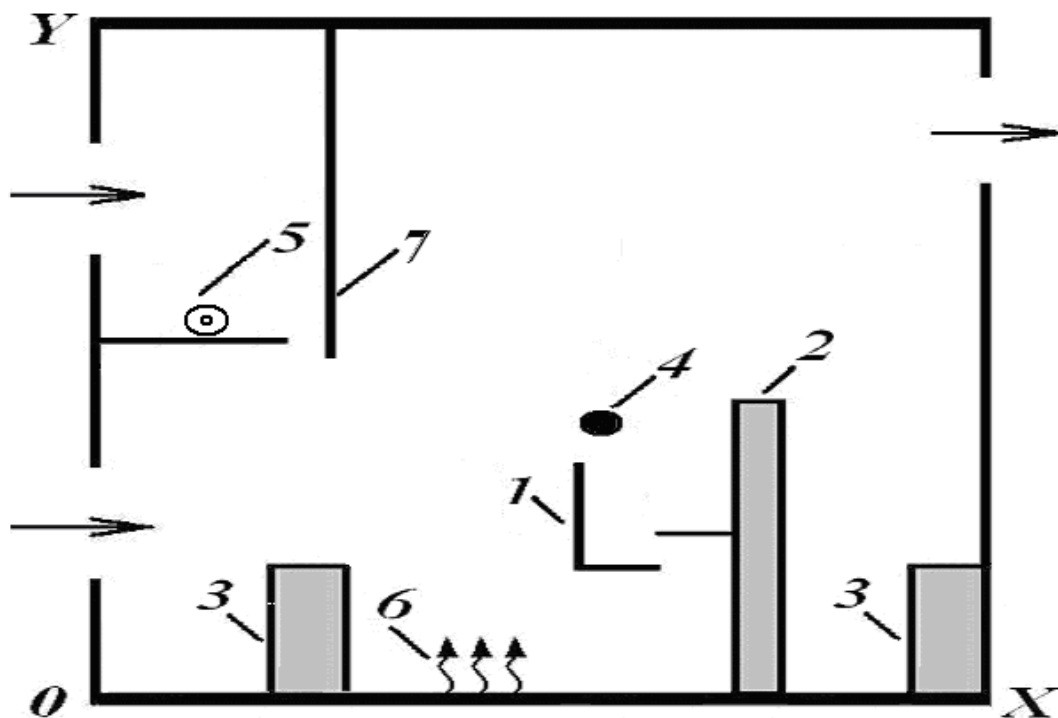


Рис. 4.39. Схема расчетной области: 1 – стул; 2 – рабочий стол; 3 – стеллаж; 4 – место эмиссии положительных ионов (положение органов дыхания); 5 – ионизатор воздуха; 6 – место эмиссии пыли; 7 – экран

Распределение концентрационного поля аэроионов в случае размещения экрана перед полкой, на которой установлен ионизатор, показано на рисунке 4.40. На рисунке 4.41 приведено распределение концентрации отрицательных аэроионов на уровне расположения органов дыхания человека.

Как видно из рисунков 4.40 и 4.41, экран существенно повлиял на форму концентрационного поля в помещении. Это влияние проявляется и в изменении концентрации ионов на рабочем месте. Так, в зоне дыхания концентрации отрицательных ионов составляет $C_w = 0,14 \times 10^{12}$ частиц/м³. То есть, концентрация в рабочей зоне уменьшилась в два раза при использовании экрана.

Таким образом, варьируя формой, размерами, местом размещения экрана, можно регулировать параметры аэроионного режима на рабочем месте и в помещении в целом.

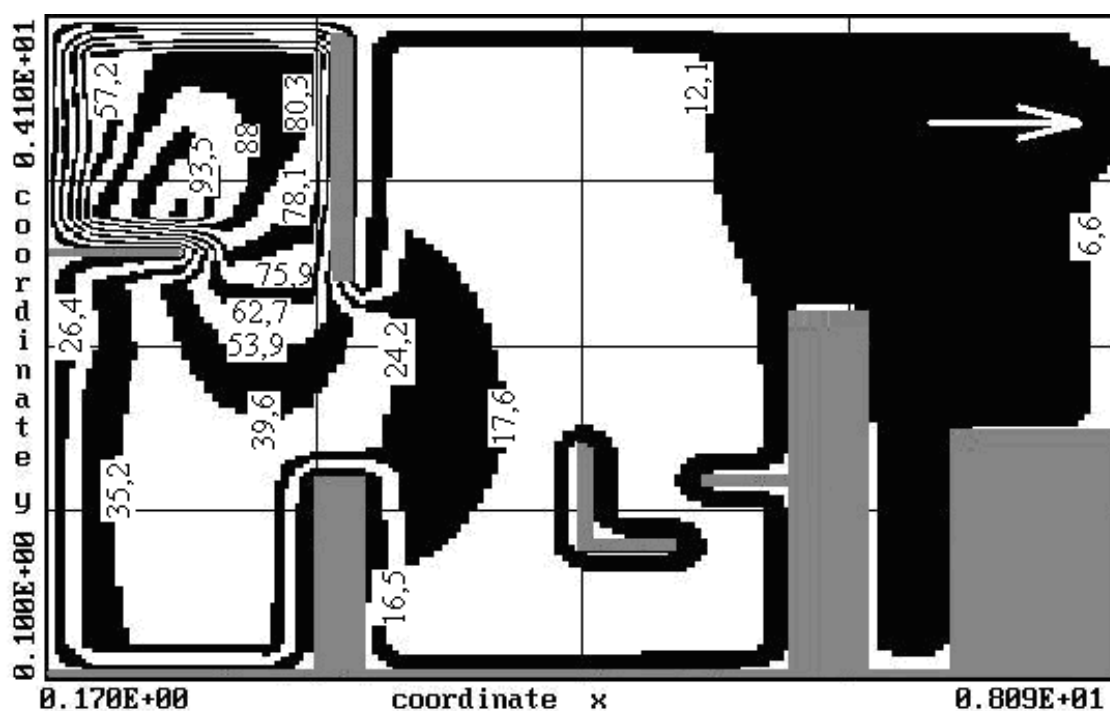


Рис. 4.40. Распределение концентрации отрицательных аэроионов ($C_w \cdot 10^{-10}$, частиц/м³) в помещении для расположения ионизатора, соответствующего рисунку 4.39 ($C_{\max} = 11,1 \times 10^{11}$ частиц/м³)

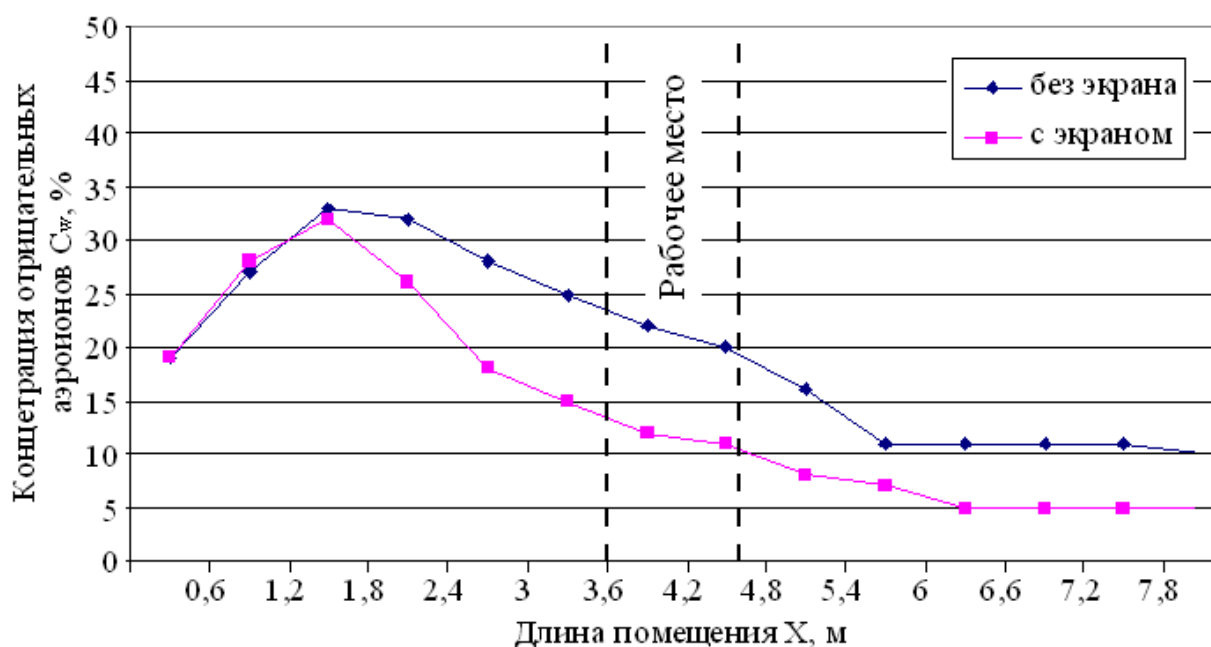


Рис. 4.41. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении на уровне расположения органов дыхания работника

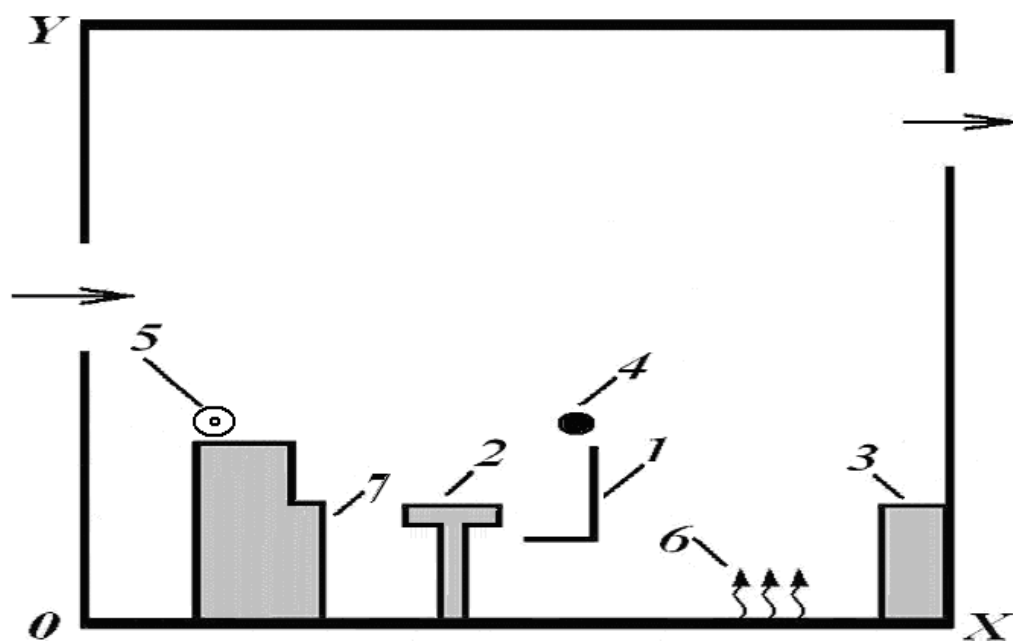
Для решения задачи потребовалось порядка 2 минут компьютерного времени.

Задача 7. Исследование аэроионного режима в помещении при наличии регулирующего экрана, установленного на столе

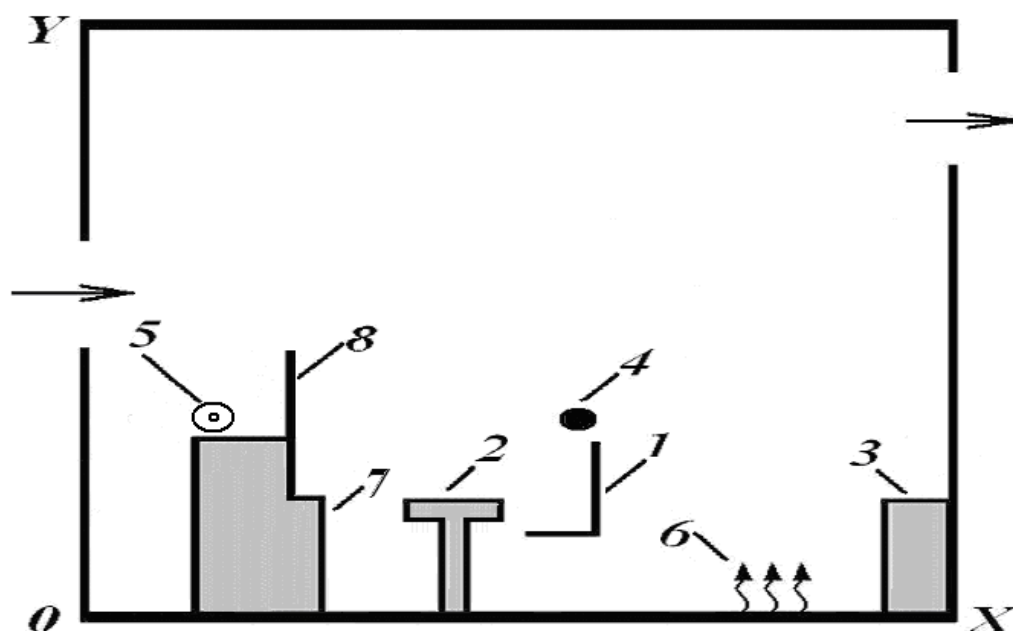
На базе разработанного пакета программ был проведен расчет концентрационного поля отрицательных аэроионов для помещения с одним рабочим местом и установленным внутри помещения ионизатором. В помещении предусмотрена возможность установки экрана для регулирования концентрации аэроионов.

На рисунке 4.42 представлена схема расчетной области. Рабочая зона представлена одним рабочим местом. Кроме этого, в помещении у левой его стены установлен стеллаж, перед рабочим столом – тумба, на которой расположен ионизатор (рис. 4.42, позиция 5). На рисунке 4.42б рассмотрен также вариант с установленным перед ионизатором экраном (рис. 4.42б, позиция 8). В помещении происходит выброс пыли, при этом зона пылевыведения условно показана волнистыми стрелками на рисунке 4.42. Положения отверстий вентиляции показаны на рисунке 4.37 «стрелками».

Расчет выполнен при следующих исходных данных: размеры расчетной области 6,25 м × 4,20 м, интенсивность отрицательных ионов составляет $Q_C = 1,7 \times 10^{11}$ частиц/с, интенсивность положительных ионов $Q_B = 6 \times 10^4$ частиц/с, интенсивность выброса пыли $Q_D = 2 \times 10^6$ частиц/с. Расчет выполнен для двух вариантов – без экрана (рис. 4.42а), и с экраном, установленном на тумбе (рис. 4.42б).



а



б

Рис. 4.42. Схема расчетной области: а – без экрана; б – при наличии экрана;
 1 – стул; 2 – рабочий стол; 3 – стеллаж; 4 – место эмиссии положительных ионов (положение органов дыхания); 5 – ионизатор воздуха;
 6 – место эмиссии пыли; 7 – тумба; 8 – экран

Распределение концентрации отрицательных аэроионов для каждого варианта задачи показано на рисунках 4.43 и 4.44 соответственно.

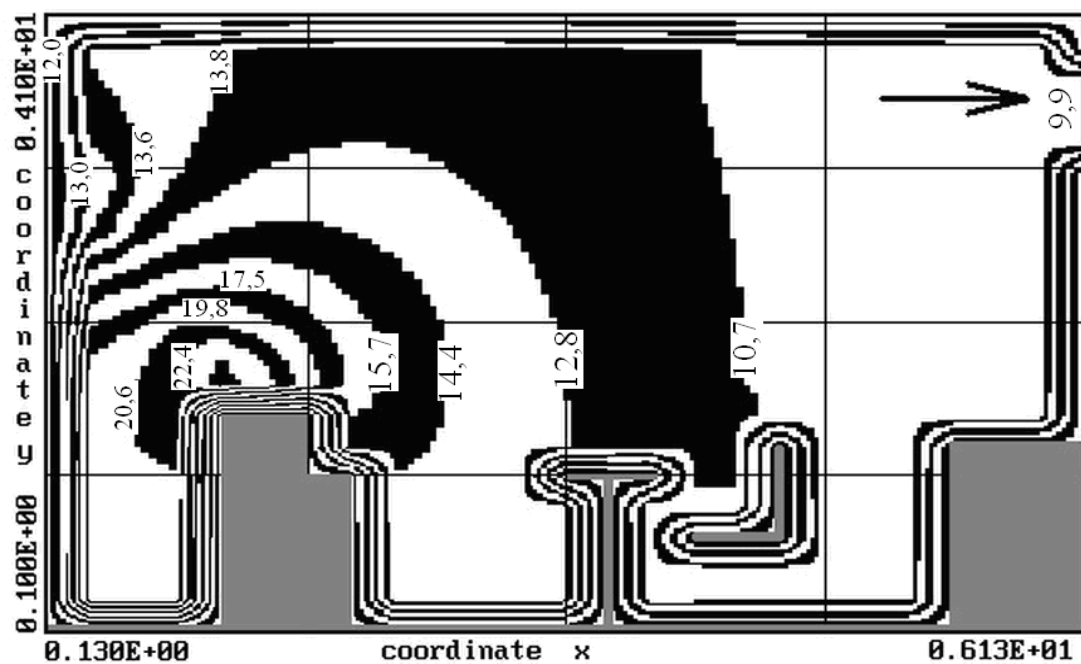


Рис. 4.43. Распределение концентрации отрицательных аэроионов ($C_w \cdot 10^{-9}$, частиц/м³) в помещении (вариант, соответствующий рисунку 4.42а;

$$C_{\max} = 26,1 \times 10^9 \text{ частиц/м}^3$$

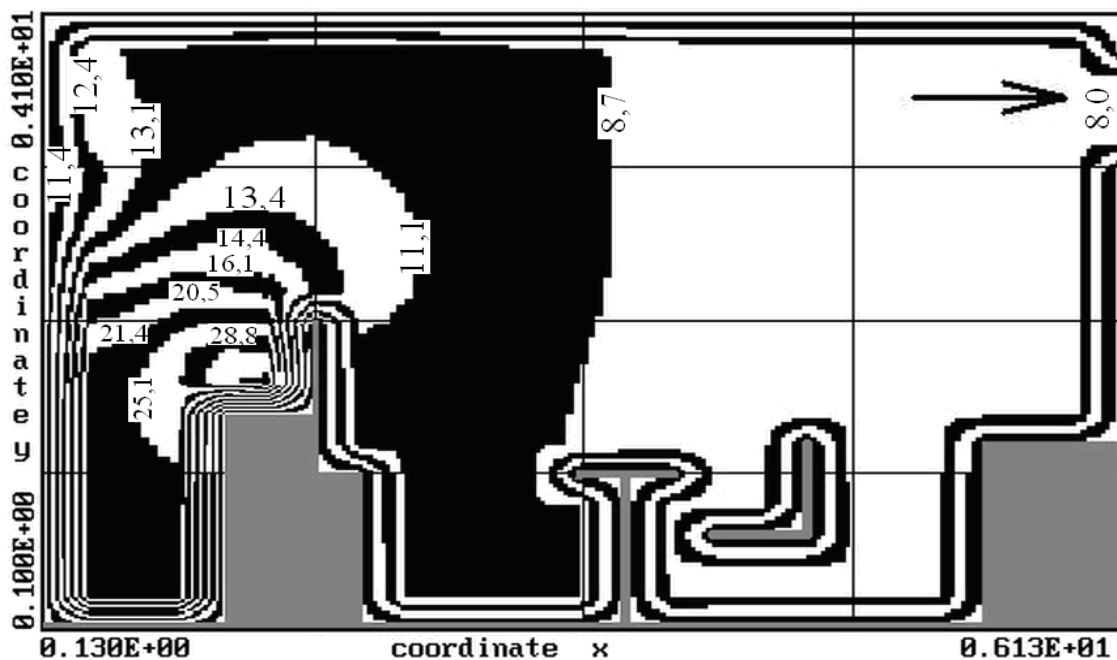


Рис. 4.44. Распределение концентрации отрицательных аэроионов ($C_w \cdot 10^{-9}$, частиц/м³) в помещении (вариант, соответствующий рисунку 4.42б,

$$C_{\max} = 33,5 \times 10^9 \text{ частиц/м}^3$$

На рисунке 4.45 приведено распределение концентрации отрицательных аэроионов на уровне расположения органов дыхания человека.

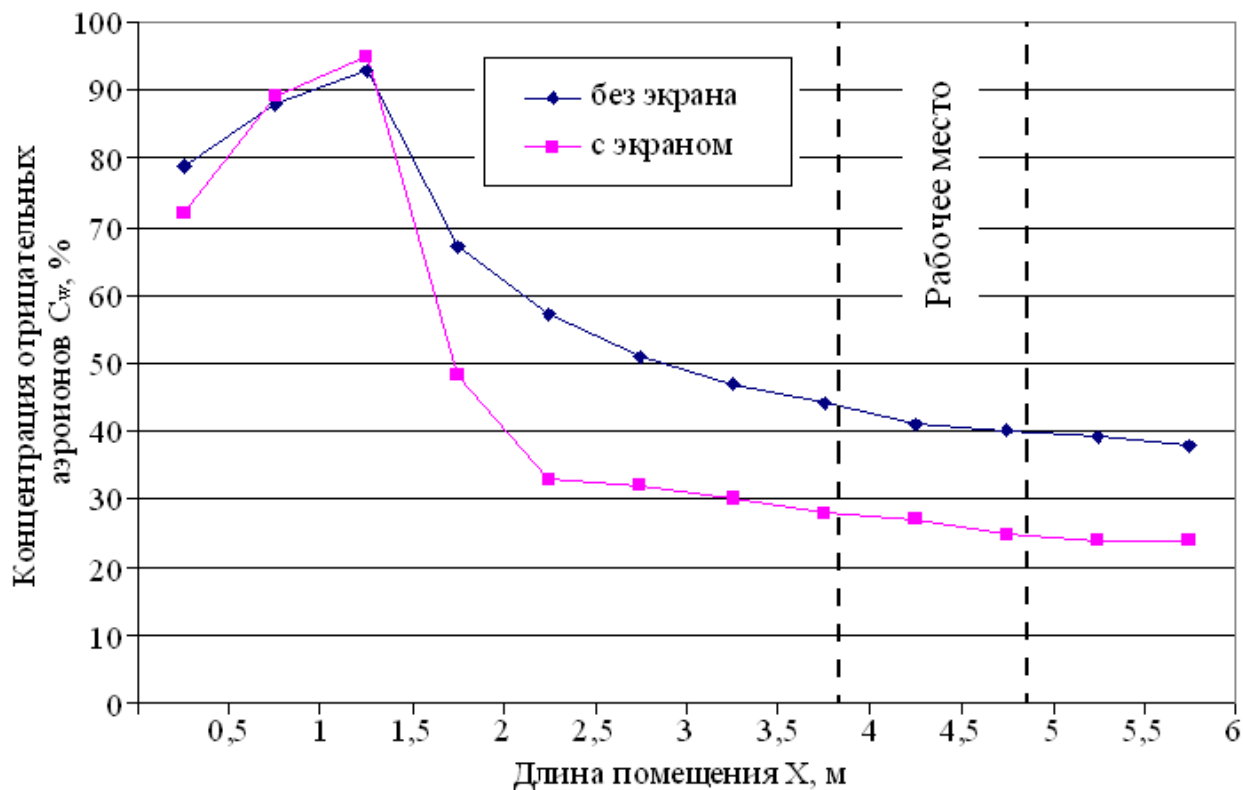


Рис. 4.45. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении на уровне расположения органов дыхания работника

Как видно из представленных рисунков, экран существенно влияет на форму и интенсивность концентрационного поля ионов. Так, при отсутствии экрана, (рис. 4.43), четко виден направленный поток аэроионов в сторону рабочего места. При наличии экрана (рис. 4.44) картина распределения концентрационного поля аэроионов изменяется и видна тенденция направленного движения ионов от ионизатора к потолку. Экран позволяет изменить величину концентрации ионов в помещении и, в частности, на рабочем месте. Так, при отсутствии экрана (рис. 4.45), концентрация отрицательных ионов на месте расположения органов дыхания работника

составляет $0,011 \times 10^{12}$ частиц/м³, а при наличии экрана, $0,0089 \times 10^{12}$ частиц/м³.

Таким образом, варьируя формой, размерами, местом размещения экрана, можно регулировать параметры аэроионного режима не только в самом помещении, но и непосредственно на рабочем месте, что особенно важно в случае организации индивидуальных компьютеризированных рабочих мест.

Для решения задачи требуется порядка 10 секунд компьютерного времени.

4.3. Прогноз аэроионного режима на базе разработанной балансовой численной модели

В данном параграфе представлено решение задач по оценке аэроионного режима в помещении на базе балансовой модели.

Задача 1. Расчет концентрационного уровня аэроионов при постоянной работе ионизатора

Для численного расчета уравнений (2.11) – (2.13) разработана программа TSS, реализованная на языке FORTRAN. Для практического использования данной программы необходимо задать: объем помещения, вентиляционный расход, концентрацию отрицательных, положительных аэроионов и пыли, втекающих в помещение, интенсивность эмиссии отрицательных, положительных аэроионов и пыли в помещении.

На основании разработанной численной балансовой модели были выполнены расчеты по оценке концентрации отрицательных ионов в помещении объемом 62 м³. Следует отметить, что это «чистый объем» помещения за вычетом мебели и других объектов. Внутри помещения происходит выброс положительных ионов в количестве 22×10^3 частиц/с.

Воздух, поступающий в помещение, содержит пыль в количестве 6×10^3 частиц/м³; положительные ионы в количестве 10^4 частиц/м³, и отрицательные ионы в количестве 2×10^3 частиц/м³. В помещении работает ионизатор. Расчет выполнялся для интенсивности излучения отрицательных ионов от ионизатора в количестве 9×10^7 частиц/с (первый вариант эмиссии) и 12×10^7 частиц/с (второй вариант эмиссии). В результате расчета концентрация отрицательных ионов составила $0,029 \times 10^{12}$ частиц/м³ для первого варианта эмиссии и $0,040 \times 10^{12}$ частиц/м³ для второго варианта эмиссии.

Подобным образом можно выполнять экспресс-расчеты параметров аэроионного режима, во всех случаях, когда необходимо осуществлять быстрый перебор возможных вариантов, например, при подборе ионизаторов, либо же выборе интенсивности эмиссии ионов.

Время вычислений составило примерно одну секунду.

Задача 2. Расчет концентрационного уровня аэроионов при импульсной работе ионизатора

На базе численной балансовой модели был проведен вычислительный эксперимент по прогнозу аэроионного режима в помещении при следующих исходных данных: объем помещения – 62 м³; концентрация отрицательных ионов, поступающих в помещение через систему вентиляции составляет 2×10^3 частиц/м³; концентрация положительных ионов, поступающих в помещение через систему вентиляции – 10×10^3 частиц/м³; концентрация пыли, поступающей в помещение также через вентиляционную систему, составляет 6×10^3 частиц/м³; интенсивность эмиссии отрицательных, положительных ионов и пыли $Q_C = 7 \times 10^7$ частиц/с, $Q_p = 6 \times 10^4$ частиц/с, $Q_A = 22 \times 10^3$ частиц/с соответственно. Следует подчеркнуть, что в данной задаче рассматривается периодическое действие ионизатора, то есть эмиссия

отрицательных ионов осуществляется на временных промежутках (рис. 4.46) $[0 - t_1]$, $[t_2 - t_3]$, $[t_4 - t_5]$ и т.д. На временных интервалах $[t_1 - t_2]$ $[t_3 - t_4]$ ионизатор не осуществляет эмиссию. При расчетах принято, что выброс осуществляется в течение трех минут, далее на интервале 3 – 10 минут эмиссии отрицательных ионов нет, затем снова осуществляется выброс и т.д., то есть моделируется сложная реальная ситуация.

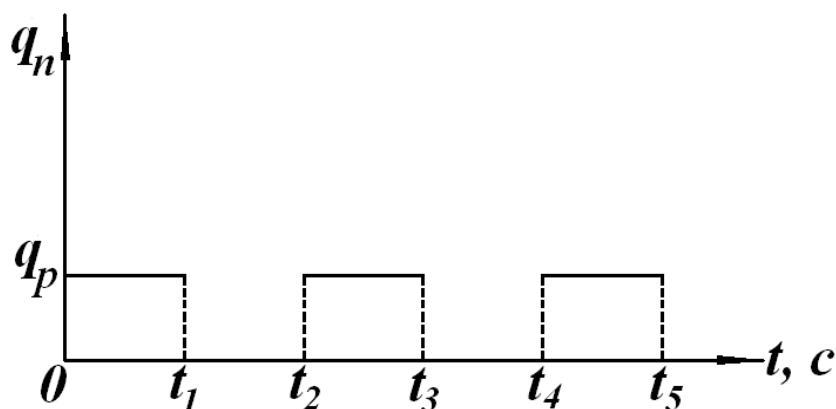


Рис. 4.46. Временные промежутки эмиссии отрицательных ионов

Результаты расчета динамики концентрации отрицательных аэроионов показаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Динамика концентрации отрицательных аэроионов в помещении

t , сек	30	60	180	480
c , частиц/ м^3	$0,18 \cdot 10^{10}$	$0,39 \cdot 10^{10}$	$0,11 \cdot 10^{11}$	$0,99 \cdot 10^{10}$
t , сек	543	597	708	720
c , частиц/ м^3	$0,95 \cdot 10^{10}$	$0,92 \cdot 10^{10}$	$0,15 \cdot 10^{11}$	$0,16 \cdot 10^{11}$

Если принять во внимание, что согласно имеющимся нормам, минимальное значение концентрации отрицательных аэроионов составляет 6×10^2 частиц/ см^3 , а максимальное значение 50×10^3 частиц/ см^3 , то, как следует из анализа данных, представленных в таблице 4.1, в помещении

обеспечиваются требуемые нормативы концентрации отрицательных аэроионов.

Подобным образом можно выполнять расчеты параметров аэроионного режима при импульсной работе ионизаторов, либо при импульсной подаче ионизированного воздуха в помещение, что особенно актуально для специализированных «чистых» помещений.

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

Выводы по разделу 4

1. В разделе представлены результаты решения новых задач в области моделирования аэроионного режима в помещениях при различных способах организации режима искусственной ионизации воздуха.

2. Представленные в разделе результаты моделирования аэроионного режима показывают, что разработанный на основе многомерных CFD моделей программный код позволяет оценивать и контролировать параметры аэроионного режима в помещениях с учетом влияния на него практически всех физических параметров.

3. Представлены результаты моделирования аэроионного режима в помещениях с учетом размещения в нем регулирующих экранов. Показано, что с помощью экранов можно управлять концентрацией аэроионов в помещении.

4. Разработанная численная модель TSS, основанная на применении нуль-мерных уравнений массопереноса, позволяет оперативно оценивать концентрацию ионов в помещении с учетом зависимости от времени эмиссии отрицательных, положительных аэроионов и пыли в помещении, с учетом кратности воздухообмена, а также с учетом импульсной работы ионизатора, то есть возможность данной модели шире, чем у известных зарубежных аналогов.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ научных работ, посвященных проблеме прогнозирования параметров аэроионного режима в помещениях, показал, что в настоящее время отсутствуют методы оценки концентрационных полей аэроионов на компьютеризованных рабочих местах и в помещениях. Поэтому разработка CFD моделей для оценки, прогноза и контроля параметров аэроионного режима в помещениях, а также создание на базе разработанных моделей специального программного обеспечения, является важной актуальной задачей.

2. Впервые установлены закономерности распределения концентрации отрицательных и положительных аэроионов в помещении в зависимости от пространственных характеристик помещения и режима искусственной ионизации.

3. Впервые установлены зависимости изменения параметров аэроионного режима при применении регулирующих экранов внутри помещения с учетом динамики воздушного потока, электрического поля заряженных частиц, диффузии и эмиссии ионов.

4. Впервые разработана численная модель, позволяющая обосновать параметры нормализации аэроионного режима в помещениях при искусственной ионизации воздуха с учетом аэродинамических свойств воздушной среды, рекомбинации ионов и их дрейфа под действием электростатических полей, что позволяет проводить прогноз и управление аэроионным режимом по требованиям санитарных норм при аэроионизации воздуха в помещении.

5. Усовершенствован метод оценки и контроля аэроионного режима в помещениях, основанный на применении балансовой модели, позволяющий учесть кратность воздухообмена и эмиссию аэроионов и пыли в помещении с компьютеризованными рабочими местами.

6. На платформе разработанных численных моделей разработано компьютерное программное обеспечение (код), позволяющее выполнять многовариантные расчеты параметров аэроионного режима в помещениях.

7. Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью постановок задач; использованием апробированных математических моделей рассеивания аэроионов с учетом основных физических факторов, влияющих на формирование поля ионов; экспериментальной проверкой основных положений; удовлетворительным согласованием результатов теоретических исследований и экспериментальных работ; положительными результатами внедрения разработок в практику работы предприятий.

8. Разработанный программный код может быть использован для прогноза аэроионного режима в производственных помещениях без ограничения их функциональной направленности, а также в специализированных «чистых» помещениях.

9. Проведено внедрение результатов работы в практику предприятий Днепровский завод строительных материалов, ООО ПКФ «Биотон» для анализа и прогноза параметров аэроионного режима при разработке мероприятий по нормализации качества воздушной среды в рабочих помещениях предприятий, что позволяет обеспечивать благоприятные гигиенические условия труда персонала при аэроионизации воздуха в помещении.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аргунова А. М. Биотехнические основы и математическое моделирование создания качественного аэроионного состава газовой среды обитаемых герметичных объектов: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.26.02 / Аргунова Анна Михайловна; Государственный научный центр Российской Федерации Институт медико-биологических проблем Российской академии наук. – Москва, 2007. – 30 с.
2. Бабич Н. И. Проблемы аэроионификации при создании рационального микроклимата в помещениях с персональными компьютерами / Н. И. Бабич, В. Г. Панов, С. Г. Антощук, Л. Ф. Бурдыка // Электромашинобудування та електрообладнання. – 2009. – Вип. 74. – С. 41–47.
3. Бакланова А. В. Поиск возможности снижения риска профзаболеваний и повышения продуктивности в процессе обучения путем применения аэроионизации / А. В. Бакланова, В. И. Гаршин, Е. В. Егорушкин // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. – 2015. – №3(16).
4. Бахрушин В. Е. Моделирование распределения концентрации ионов вблизи ионизатора / В. Е. Бахрушин, М. А. Игнахина, Д. В. Вертинский, А. Ю. Евсюков // Складні системи і процеси. – Запоріжжя: Класичний приватний університет, 2002. – №1. – С. 30–36.
5. Белоцерковский О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред / О. М. Белоцерковский. – Москва: Наука, 1984. – 517 с.
6. Беляев Н. Н. Выбор рационального режима искусственной ионизации воздуха в рабочих помещениях / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих вчених, 28–29 жовтня 2015 р. – Харків: ХНАДУ, 2015. – С. 77–79.

7. Беляев Н. Н. Защита зданий от проникновения в них опасных веществ: Монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, Н. В. Росточило. – Днепропетровск: «Акцент ПП», 2014. – 136 с.

8. Беляев Н. Н. К вопросу регулирования аэроионного режима в рабочей зоне / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Теоретичні та прикладні аспекти застосування інформаційних технологій в галузі природничих наук: збірник тез Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, 20–22 квітня 2016 р. – Одеса: ОДЕКУ, 2016. – С. 18 – 19.

9. Беляев Н. Н. Компьютерное моделирование процесса искусственной ионизации воздуха в помещении / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем: матеріали I Всеукраїнської науково-технічної конференції, 3–5 листопада 2015 р. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2015. – Ч. 1 – С. 42.

10. Беляев Н. Н. Математическое моделирование аэроионного режима в помещении при искусственной ионизации воздуха / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск: ГВУЗ ПГАСА, 2015. – Вып. 83. – С. 40 – 46.

11. Беляев Н. Н. Модели для экспресс оценки концентрации аэроионов в помещении при искусственной ионизации воздуха / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Екологія. Довкілля. Молодь: матеріали V Міжнародної наукової конференції молодих вчених та студентів, 22–29 жовтня 2015 р. – Полтава: ПолтНТУ, 2015. – С. 41 – 45.

12. Беляев Н. Н. Моделирование аэроионного режима в помещениях при искусственной ионизации воздуха: [монография] / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова. – Днепропетровск: ГВУЗ ПГАСА, 2016. – 109 с.

13. Беляев Н. Н. Оценка аэроионного режима в рабочей зоне при искусственной ионизации воздуха в помещении / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, 2015. – №3(81). – С. 158 – 161.

14. Беляев Н. Н. Оценка аэроионного режима в рабочих зонах на базе CFD модели / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: НГУ, 2015. – №46. – С. 168 – 173.

15. Беляев Н. Н. Прогноз аэроионного режима в помещениях / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Современные ресурсосберегающие технологии. Проблемы и перспективы: сборник научных докладов III международной научно-практической конференции, 9–13 листопада 2015 р. – Одесса: ОНУ им. И. И. Мечникова, 2015. – С. 182 – 184.

16. Беляев Н. Н. Прогнозирование качества воздушной среды методом вычислительного эксперимента / Н. Н. Беляев, Е. Д. Коренюк, В. К. Хрущ. – Днепропетровск: Наука и образование, 2000. – 208 с.

17. Беляев Н. Н. Расчет аэроионного режима в помещении и в рабочей зоне на базе численной модели / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: НГУ, 2015. – №47. – С. 137 – 143.

18. Беляев Н. Н. Численное моделирование аэроионного режима в рабочих зонах / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Проблеми інформатики і моделювання: тези п'ятнадцятої міжнародної науково-технічної конференції, 14–18 вересня 2015 р. – Харків: НТУ ХПІ, 2015. – С. 21.

19. Беляев Н. Н. Численные модели для прогноза аэроионного режима в помещениях / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем: тези доповідей XIII міжнародної науково-практичної конференції, 18–20 листопада 2015 р. – Дніпропетровськ: ДНУ ім. О. Гончара, 2015. – С. 22 – 23.

20. Беляев Н. Н. Численные модели для экспресс расчета концентрации аэроионов в помещении / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Науковий вісник будівництва: збірник наукових праць. – Харків: ХНУБА, 2015. – №4(82). – С. 190 – 193.

21. Беляев Н. Н. Экспресс расчет концентрации аэроионов в офисном помещении на базе балансовой модели / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: НГУ, 2015. – №49. – С. 213 – 217.

22. Беляев Н. Н. CFD моделирование аэроионного режима в помещениях / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Технічні науки та технології: науковий журнал. – Чернігів: Черніг. нац. технол. ун-т, 2015. – №2(2). – С. 242 – 247.

23. Беляев Н. Н. CFD моделирование аэроионного режима в рабочих зонах в условиях искусственной ионизации воздуха / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна, 2016. – Вип. 1 (61). – С. 39 – 47.

24. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1985. – 273 с.

25. Бурцев С. И. Современные подходы к ионизации и озонированию воздуха вентилируемых помещений / С. И. Бурцев, А. А. Вагузин, А. А. Дударев, Г. Л. Спичкин // Инженерные системы. – Санкт-Петербург: АВОК – Северо-Запад, 2006. – № 4. – С. 46 – 49.

26. Варехов А. Г. Кондиционирование воздуха жилых помещений с использованием аэроионизации / А. Г. Варехов // Технично-технологические проблемы сервиса. – Санкт-Петербург: СПбГЭУ, 2014. – №1(27). – С. 57 – 61.

27. Водяник А. О. Методи визначення концентрацій аероіонів та вмісту пилу у повітрі виробничих приміщень // А. О. Водяник, Т. В. Віднічук // Містобудування та територіальне планування. – Київ: КНУБА, 2013. – Вип. 50. – С. 77 – 81.

28. Водяник А. О. Методи і засоби визначення аероіонного складу повітря та концентрацій пилу у виробничих умовах / А. О. Водяник,

О. М. Бесараб, Л. А. Сербінова // Проблеми охорони праці в Україні. – Київ: ННДПБОП, 2011. – Вип. 20. – С. 66 – 70.

29. Глива В. А. Визначення та прогнозування динаміки зміни аероіонного складу повітря виробничих приміщень / В. А. Глива, В. І. Клапченко, С. М. Пономаренко, Л. О. Левченко, Д. С. Смаковський // Вісник НТУУ КПІ. Серія «Гірництво». – 2010. – Вип. 19. – С. 161 – 168.

30. Глива В. А. Дослідження впливу мікрокліматичних параметрів повітрообміну на аероіонний склад повітря робочих приміщень / В. А. Глива // Проблеми охорони праці в Україні. – Київ: ННДПБОП, 2011. – Вип. 20. – С. 58 – 65.

31. Глива В. А. Дослідження просторових розподілів аероіонів навколо джерел іонізації повітря у робочих приміщеннях / В. А. Глива // Проблеми охорони праці в Україні. – Київ: ННДПБОП, 2010. – Вип. 19. – С. 123 – 127.

32. Глива В. А. Моделювання динаміки аероіонного складу повітря виробничих приміщень / В. А. Глива, В. І. Клапченко, С. А. Теренчук, С. М. Пономаренко // Техніка будівництва. – 2009. – Вип. 23. – С. 114 – 117.

33. Глива В. А. Моніторинг та нормалізація фізичних факторів виробничого середовища при експлуатації автоматизованих систем: дис. ...докт. техн. наук: 05.26.01 / Глива Валентин Анатолійович; ДУ «Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та охорони праці» – Київ, 2012. – 327 с.

34. Глива В. А. Сучасні підходи до моделювання і прогнозування динаміки шкідливих факторів виробничого середовища / В. А. Глива, Л. О. Левченко // Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2013», 21–23 травня 2013 р. – Київ: НАУ, 2013. – Т. 5 – С. 32.37 – 32.40.

35. Григорьев Ю. Г. Персональный компьютер: физические факторы, воздействие на пользователя / Ю. Г. Григорьев, О. А. Григорьев,

В. С. Степанов, А. В. Меркулов // Радиационная биология. Радиоэкология. – Москва: Наука, 2001. – Т. 41. – №2 – С. 195 – 206.

36. Губернский Е. Д. Гигиенические основы кондиционирования микроклимата жилых и общественных зданий / Е. Д. Губернский, Е. И. Кореневская. – Москва: Медицина, 1978. – 192 с.

37. Губернский Ю. Д. Комплексная характеристика качества воздуха жилых и общественных зданий / Ю. Д. Губернский, М. Т. Дмитриев // Гигиена и санитария. – 1983. – № 1. – С. 9 – 11.

38. Губернский Ю. Д. Жилище для человека / Ю. Д. Губернский, В. К. Лицкевич. – Москва: Стройиздат, 1991. – 227 с.

39. Гуревич М. И. Теория струй идеальной жидкости / М. И. Гуревич. – Москва: Наука, 1979. – 536 с.

40. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», затверджені наказом Міністерства охорони здоров'я України N 248 від 08 квітня 2014 року.

41. Дударев А. А. Биполярная ионизация воздуха помещений с применением генераторов ионов, встраиваемых в системы приточной вентиляции и кондиционирования / А. А. Дударев, Г. Л. Спичкин, Д. М. Денисихина, С. И. Бурцев // Медицина труда и промышленная экология. – 2010. – №. 4. – С. 42 – 47.

42. Запорожець О. І. Нормування аероіонного складу повітря робочих приміщень та основні напрями його вдосконалення / О. І. Запорожець, В. А. Глива, О. В. Сидоров // Вісник національного авіаційного університету. – 2011. – № 1. – С. 139 – 143.

43. Запорожець О. І. Принципи моделювання динаміки аероіонного складу повітря у приміщеннях / О. І. Запорожець, В. А. Глива, О. В. Сидоров // Вісник національного авіаційного університету. – 2011. – № 2. – С. 120 – 124.

44. Затынайченко Д. О. Исследование аэроионного режима в рабочих помещениях с помощью метода математического моделирования [Электронный ресурс]: / Д. О. Затынайченко, Н. Н. Беляев // Екологічний інтелект – 2014: збірник матеріалів доповідей ІХ Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, 14–15 квітня 2014 р. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна, 2014. – С. 119 – 120.

45. Жебеленко М. Г. Гигиеническая оценка эффективности применения аэроионизации для повышения умственной работоспособности / М. Г. Жебеленко // Гігієна населених місць.– 2009.– №54. – С. 206 – 208.

46. Калабин Г. В. Метод расчета аэрогазодинамики камерообразных выработок на основе математического моделирования / Г. В. Калабин, А. А. Бакланов, П. В. Амосов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – Новосибирск, 1990. – №1. – С. 74 – 88.

47. Карпухин В. А. Компьютерная система измерения концентрации аэроионов в сильных электрических полях / В. А. Карпухин, П. В. Лепихов // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2000. – № 9. – С. 21 –32.

48. Коваленко О. В. Гігієнічні критерії оптимізації іонізованості повітря приміщень багатофункціональних житлових комплексів / О. В. Коваленко, В. Я. Акіменко // Гігієна населених місць. – 2007. – Вип. 49. – С. 198 – 211.

49. Коваленко О. В. Гігієнічні проблеми оптимізації іонізованості повітряного середовища житлових і громадських будинків / О. В. Коваленко, В. Я. Акіменко, О. М. Кулішов // Гігієна населених місць. – 2011. – №57. – С. 244 – 253.

50. Коренівська О. Л. Методи та апаратура для визначення кількості аероіонів в іонізованому повітрі / О. Л. Коренівська // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2010. – № 2 (53). – С. 93 – 102.

51. Косяченко Г. Е. Влияние на здоровье человека неблагоприятных факторов, возникающих при работе с ПЭВМ и меры профилактики /

Г. Е. Косяченко, Е. А. Иванович // Здоровье для всех: материалы VI Международной научно-практической конференции, УО «Полесский государственный университет», 23–24 апреля 2015 г. – Пинск: ПолесГУ, 2015. – С. 93 – 95.

52. Кувшинов Ю. Я. Теоретические основы микроклимата помещения / Научное издание. – Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 184 с.

53. Лаврентьев М. А. Проблемы гидродинамики и их математическое моделирование / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – Москва: Наука, 1977. – 408 с.

54. Лапшин О. Є. Дослідження якості повітря виробничих приміщень у висотних будівлях за аероіонним складом / О. Є. Лапшин, Л. О. Левченко // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво». – 2011. – Вип. 21. – С. 160 – 165.

55. Левченко Л. О. Екологічна безпека підприємства: прогнозування якості повітря методом моделювання його іонізованості / Л. О. Левченко // Економічна безпека держави і науково-технологічні аспекти її реалізації: Праці IV міжнар. наук.-практ. сем. 23–26 жовтня 2012 р. – Дніпропетровськ: НГУ, 2012. С. 101 – 104.

56. Левченко Л. О. Тривимірне моделювання просторових розподілів концентрацій аероіонів у повітрі приміщень / Л. О. Левченко, В. А. Глива, О. В. Сидоров // Управління розвитком складних систем. – 2012. Вип. 11. – С. 115 – 118.

57. Лившиц М. Н. Аэроионификация: Практическое применение / М. Н. Лившиц. – Москва: Стройиздат, 1990. – 168 с.

58. Логачев И. Н. Аэродинамические основы аспирации / И. Н. Логачев, К. И. Логачев. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2005. – 659 с.

59. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – Москва: Наука, 1978. – 735 с.

60. Малышева А. Г. Аналитические аспекты гигиенической оценки ионизации воздуха общественных помещений / А. Г. Малышева, А. С. Гуськов, Н. Ю. Козлова, Ю. Д. Губернский, Е. Г. Растянников, А. А. Беззубов // Гигиена и санитария. – 2006. – № 4. – С. 32 – 37.

61. Марченко В. Г. Распространение аэроионов в воздушной среде помещения от ионизаторов различного типа / В. Г. Марченко, А. И. Липа, А. П. Пономаренко // Холодильна техніка та технологія. – 2014. – №. 5(151). – С. 69 – 72.

62. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва: Наука, 1982. – 320 с.

63. Мещеряков А. Ю. Медико-техническое обеспечение контроля аэроионного состояния воздуха на объектах с искусственной средой обитания / А. Ю. Мещеряков, С. Н. Осипов, С. В. Колерский // Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2006. – Т. 19. – С. 182 – 191.

64. Менумеров Р. М. Некоторые аспекты охраны труда пользователей электронно-информационных систем [Электронный ресурс] / Р. М. Менумеров, Э. М. Люманов, Р. Н. Бекиров // Наукові праці Південного філіалу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Кримський агротехнологічний університет». Технічні науки. – 2013. – Вип. 156. – С. 237 – 242. Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Npkaut_2013_156_38.pdf

65. Минх А. А. Ионизация воздуха и ее гигиеническое значение / А. А. Минх. – 2-е изд. – Москва: Медгиз, 1963. – 352 с.

66. Митрофанова Т.В. Класифікація аероіонізаторів за принципом отримання аероіонів та їх вплив на здоров'я людини / Т. В. Митрофанова, Т. М. Нікітчук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – № 2 (73). – С. 149 – 153.

67. Пасконов В. М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена / В. М. Пасконов, В. И. Полежаев, Л. А. Чудов. – Москва: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 288 с.

68. Плеханова Ю. М. Улучшение условий труда персонала на ответственных объектах электроэнергетики за счет разработки и использования устройства для очистки и ионизации воздуха: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.26.01 / Плеханова Юлия Михайловна; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» – Челябинск, 2011. – 19 с.

69. Полосин И. И. Оздоровление воздушной среды помещений путем озонирования и аэроионизации воздуха / И. И. Полосин, Д. В. Лобанов // Научный вестник ВГАСУ. Материалы XV межрегиональной научно-практической конференции «Высокие технологии. Экология», 17–18 мая 2012 г. – Воронеж: ВГАСУ, 2012. – С. 15 – 20.

70. Полянин А. Д. Справочник по точным решениям уравнений тепло- и массопереноса / А. Д. Полянин, А. В. Вязьмин, А. И. Журов, Д. А. Казенин. – Москва: Факториал, 1998. – 368 с.

71. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – Москва: Мир, 1980. – 616 с.

72. Самарский А. А. Математическое моделирование / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. – Москва: Физматлит, 2001. – 320 с.

73. Самарский А. А. Разностные методы решения задач газовой динамики / А. А. Самарский, Ю. П. Попов. – Москва.: Наука, 1980. – 90 с.

74. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – Москва: Наука, 1983. – 616 с.

75. Самарский А. А. Численные методы / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – Москва: Наука. Гл. ред. физ. – мат. лит., 1989 – 432 с.

76. Санітарно-гігієнічні норми допустимих рівнів іонізації повітря виробничих та громадських приміщень: ДНАОП 0.03-3.06-80 [Електроний ресурс] – Режим доступу: http://dnaop.com/html/2296/doc-ГН_2152-80

77. Сидоров О. В. Дослідження впливу чинників деіонізації на концентрацію легких аероіонів у приміщеннях / О. В. Сидоров // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. – 2012. – №6. – С. 163 – 167.

78. Сидоров А. В. Методика измерения концентрации легких аэроионов на рабочем месте оператора персонального компьютера / А. В. Сидоров // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2014. – №1. – С. 36 – 41.

79. Сидоров О. В. Нормалізація аероіонного складу повітря в офісних приміщеннях: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.26.01 / Сидоров Олександр Володимирович; НАН України, Державна служба гірничого нагляду та промислової безпеки України, Національному науково-дослідному інституті промислової безпеки та охорони праці. – Київ, 2014. – 20 с.

80. Скипетров В. П. Аэроионы и жизнь / В. П. Скипетров. – 3-е изд., перераб. и доп. – Саранск: «Красный Октябрь», 2005. – 136 с.

81. Строкань О. В. Розробка програмного забезпечення для аналізу розподілення концентрації від'ємних аеронів в приміщеннях з нахиленою площиною / О. В. Строкань, О. В. Дубініна // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ ХПІ, 2014. – № 62 (1104). – С. 117 – 122.

82. Сукач С. В. Метод і засоби контролю та управління якістю повітряного середовища у приміщеннях: [монографія] / С. В. Сукач, Ю. І. Шульга. – Кременчук: ПП Щербатих О. В., 2013. – 192 с.

83. Сукач С. В. Системний підхід до математичного моделювання вентиляційних систем / С. В. Сукач // Системи озброєння і військова техніка: науковий журнал. – Харків, 2016. – № 3(47). – С. 137 – 143.

84. Сукач С. В. Сучасний аспект розв'язання проблеми вентиляції навчальних приміщень різного призначення / С. В. Сукач // Містобудування та територіальне планування. – Київ: КНУБА, 2014. – Вип. 52. – С. 387 – 393.

85. Терещенко П. С. Сучасні питання гігієни праці в офісних приміщеннях / П. С. Терещенко // Український журнал з проблем медицини праці. – Київ: Інститут медицини праці АМН України, 2011. – №4. – С. 22 – 26.

86. Толкунов І. О. Біполярна іонізація повітряного середовища приміщень функціональних підрозділів мобільного госпіталю МНС України / І. О. Толкунов // Проблеми надзвичайних ситуацій. – Харків: НУЦЗУ, 2011. – №14. – С. 161 – 171.

87. Толкунов І. О. Вплив природних джерел аероіонізації на процеси формування полів концентрації аероіонів у повітряному середовищі приміщень / І. О. Толкунов, І. І. Попов // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. – Харків: ХУПС, 2011. – Вип. №1 (27). – С. 243 – 246.

88. Толкунов І. О. Дослідження шляхів удосконалення аероіонного режиму робочого середовища приміщень спеціального призначення / І. О. Толкунов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2015. – №. 1. – С. 197 – 201.

89. Толкунов І. О. Моделювання процесів формування полів концентрації аероіонів у повітряному середовищі приміщень спеціального призначення МНС України / І. О. Толкунов, І. І. Попов // Проблеми надзвичайних ситуацій. – Харків: НУЦЗУ, 2010. – №12. – С. 175 – 184.

90. Толкунов І. О. Нормалізація умов праці в приміщеннях спеціального призначення методами штучної аероіонізації / І. О. Толкунов //

Восточно-европейский журнал передовых технологий. Серия: Экология. – 2014. – Вып. №1/10(67). – С.21–25.

91. Толкунов І. О. Обґрунтування параметрів засобів іонізації повітря для нормалізації умов праці в приміщеннях спеціального призначення: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.26.01 / Толкунов Ігор Олександрович; ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» – Донецьк, 2014. – 21 с.

92. Толкунов И. А. Теоретическое исследование процессов переноса аэроионов в потоках воздуха в помещениях специального назначения МЧС Украины / И. А. Толкунов, И. И. Попов, В. В. Барбашин // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Харків: НУЦЗУ, 2010. – №11. – С. 137 – 145.

93. Цыганкова С. Г. Проблемно-ориентированный пакет программ для расчета аэроионного режима в помещениях / С. Г. Цыганкова // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: НГУ, 2015. – №49. – С. 280 – 284.

94. Черный К. А. К вопросу о методах оценки и коррекции аэроионного состава воздушной среды на рабочих местах операторов ПЭВМ / К. А. Черный // Известия Южного Федерального университета. Технические науки. – 2010. – № 9 (110). – С. 70 – 75.

95. Черный К. А. Модификация спектра аэроионов при ионизации воздуха электрическими коронными аэроионизаторами / К. А. Черный, А. В. Храмов // Вектор науки Тольгтинского государственного университета. – 2010. – № 4 (14). – С. 65 – 68.

96. Черный К. А. Особенности и основные закономерности формирования аэроионного состава воздуха при проведении профилактических и физиотерапевтических сеансов в помещениях различного назначения / К. А. Черный, А. В. Храмов // Известия Южного Федерального университета. Технические науки. – 2010. – №8(109). – С. 196 –200.

97. Черный К. А. Проблема оценки и взаимосвязи аэрозольного загрязнения и аэроионного состава воздуха рабочей зоны: автореф. дис. ...доктора технических наук: 05.26.01 / Черный Константин Анатольевич; Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова – Санкт-Петербург, 2013. – 43 с.

98. Черный К. А. Развитие методов оценки и коррекции аэроионного состава воздуха рабочей зоны в целях снижения психофизиологической нагрузки работников / К. А. Черный // Известия Южного Федерального университета. Технические науки. – 2012. – № 9(134). – С. 50 – 55.

99. Черный К. А. Современное представление о природе аэроионов и их классификация / К. А. Черный // Безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 7 (127). – С. 15 – 20.

100. Черный К. А. Способ снижения уровня напряженности труда и профессионального стресса путем коррекции ионного состава воздуха рабочей зоны / К. А. Черный, А. В. Храмов // Валеология. – 2012. – № 1. – С. 64 – 69.

101. Чижевский А. Л. Аэроионификация в народном хозяйстве / А. Л. Чижевский. – 2-е изд., сокр. – Москва: Стройиздат, 1989. – 488 с.

102. Чижевский А. Л. Краткое руководство по применению ионизированного воздуха в промышленности, сельском хозяйстве и в медицине: метод. указания при пользовании аэроионификационными установками «Союзсантехники» / А. Л. Чижевский // Журнал русской физической мысли. – 1991. – № 2. – С. 42–60.

103. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Київ: Наук. думка, 1997. – 368 с.

104. Чураков А. Я. Визначення однакової концентрації аероіонів в робочій зоні / А. Я. Чураков, О. В. Сторокань // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – Харків: НТУ ХПІ, 2010. – №9. – С. 57 – 60.

105. Шилкин А. А. Аэроионный режим в гражданских зданиях / А. А. Шилкин, Ю. Д. Губернский, А. М. Миронов – Москва: Стройиздат, 1988. – 168 с.
106. Шульга Ю. И. К решению задач управления микроклиматом в помещениях учебных заведений / Ю. И. Шульга, А. П. Черный, С. В. Сукач // Проблемы охорони праці в Україні. – Київ: ННДПБОП, 2010. – Вип. 19. – С. 37 – 44.
107. Шумилин В. К. Аэроионизация воздуха рабочих мест повышает работоспособность и надежность персонала [сообщение 1] / В. К. Шумилин, Г. И. Шумилина // «Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики». Серия «Машиностроение». – Москва, 2014. – № 55. – С. 176 – 194.
108. Эльтерман В. М. Вентиляция химических производств / В. М. Эльтерман. – Москва: Химия, 1980. – 288 с.
109. Biliaiev M. M. Calculation of air ion regime in the case of artificial air ionization / M. M. Biliaiev, S. G. Tsygankova // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Дніпропетровськ: ДВНЗ ПДАБА, 2015. – №10(211). – С. 61 – 67.
110. Biliaiev M. M. Complex of numerical models for computation of air ion concentration in premises / M. M. Biliaiev, S. G. Tsygankova // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна, 2016. – Вип. 2 (62). – С. 16 – 24.
111. Cheng Y. S. Efficiency of a Portable Indoor Air Cleaner in Removing Pollens and Fungal Spores / Y. S. Cheng, J. C. Lu, T. R. Chen // Aerosol Science and Technology, 1998. – Vol. 29, issue 2, pp. 92 – 101.
112. Darrell W. Pepper, David Carrington. Modeling Indoor Air Pollution. Издание Imperial College Press (March 23, 2009). – 360с.

113. Dhanorkar S. Calculation of electrical conductivity from ion–aerosol balance equations / S. Dhanorkar, A. K. Kamra // *Journal of geophysical research*, 1997. – Vol. 102, no. D25, pp. 30147 – 30159.
114. Drexler P. Numerical modeling of accuracy of air ion field measurement / P. Drexler, P. Fiala, K. Bartušek // *Journal of Electrical Engineering*. – 2006. – Vol. 57, no 8/S, pp. 62 – 65.
115. Fiala P. Experiments with Accuracy of the Air Ion Field Measurement / P. Fiala, M. Steinbauer, K. Bartusek, Z. Szabo // *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. – Czech Republik, 2008. – Vol. 7, no. 1, 2, pp. 276 – 279.
116. Fletcher L. A. Air ion behavior in ventilated rooms / L. A. Fletcher, C. J. Noakes, P. A. Sleigh, C. B. Beggs, S. J. Shepherd // *Indoor and Built Environment*. – USA, 2008. – Vol. 17, no. 2, pp. 173 – 182.
117. Fletcher L. A. Bactericidal action of positive and negative ions in air / L. A. Fletcher, L. F. Gaunt, C. B. Beggs, S. J. Shepherd, P. A. Sleigh, C. J. Noakes, K. G. Kerr // *BMC Microbiology*, 2007. – Vol. 7: 32.
118. Gan G. Numerical simulation of the indoor environment / G. Gan, H. B. Awbi // *Building and environment*, 1994. – Vol. 4, no. 4, pp. 449 – 459.
119. Grabarczyk Z. Effectiveness of indoor air cleaning with corona ionizers / Z. Grabarczyk // *Journal of Electrostatics*, 2001. – Vol. 51–52, pp. 278 – 283.
120. Hajdukiewicz M. Validated CFD study of indoor environmental conditions in a highly glazed, cross-ventilated meeting room / M. Hajdukiewicz, M. Geron, M. M. Keane // *Proceedings of the 13th International Building Performance Simulation Association Conference – BS 2013, 25–28 August 2013, Chambéry, France*.
121. Hopke P.K. Evaluation of the effectiveness of several air cleaners for reducing the hazard from indoor radon progeny / P. K. Hopke, N. Montassier, P. Wasiolek // *Aerosol Science and Technology*, 1993. – Vol. 19, issue 3, pp. 268 –278.

122. Hoppel W. A. Ion-aerosol attachment coefficients and the steady-state charge-distribution on aerosols in a bipolar ion environment / W. A. Hoppel, G. M. Frick // *Aerosol Science and Technology*, 1986. – Vol. 5, issue 1, pp. 1 – 21.

123. Israel H. Atmospheric Electricity // *Israel Program for Scientific Translations*. – Jerusalem. – 1973. – V. 1. – 317 p.

124. Jurelionis A. The impact of the air distribution method in ventilated rooms on the aerosol particle dispersion and removal: The experimental approach / A. Jurelionis, L. Gagytė, T. Prasauskas, D. Čiužas, E. Krugly, L. Šeduikytė, D. Martuzevičius // *Energy and Buildings*. – Netherlands, 2015. – Vol. 86, pp. 305 –313.

125. Kerr K. G. Air ionisation and colonisation/infection with methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* and *Acinetobacter* species in an intensive care unit / K. G. Kerr, C. B. Beggs, S. G. Dean, J. Thornton, J. K. Donnelly, N. J. Todd, P. A. Sleight, A. Qureshi, C. C. Taylor // *Intensive care medicine*, 2006. – Vol. 32, no. 2. pp. 315 – 317.

126. Lee B. U. Removal of fine and ultrafine particles from indoor air environments by the unipolar ion emission / B. U. Lee, M. Yermakov, S. A. Grinshpun // *Atmospheric Environment*, 2004. –Vol. 38, pp. 4815 – 4823.

127. Mayya Y. S. Aerosol removal by unipolar ionization in indoor environments. / Y. S. Mayya, B. K. Sapra, A. Khan, F. Sunny // *Journal of Aerosol Science*. Vol 35, 2004. – pp. 923 – 941.

128. McMurry P. H. Aerosol wall losses in electrically charged chambers / P. H. McMurry, D. J. Rader // *Aerosol Science and Technology*, 1985. – Vol. 4, issue 3, pp. 249 – 268.

129. Murakami S. Comparison of “k-ε” Model, ASM and LES with wind tunnel test for flow field around cubic model / S. Murakami, A. Mochida, H. Yoshihiko / 8th Intern. Conf. on Wind Engineering, Western Ontario, July 8–11, 1991. – pp. 12-3 – 12-4.

130. Murakami S. Past, present and future of CWE: The view from 1999 / S. Murakami, A. Mochida // The 10th International Conference on Wind Engineering. – Copenhagen, Denmark, 1999. – Vol. 1. – pp. 91 – 97.

131. Noakes C. J. Modelling the air cleaning performance of negative air ionisers in ventilated rooms / C. J. Noakes, P. A. Sleigh, C. B. Beggs // Proceedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms – Roomvent 2007, 13–15 June 2007, Helsinki.

132. Noakes C.J. Modelling the performance of upper room ultraviolet germicidal irradiation devices in ventilated rooms: comparison of analytical and CFD methods / C. J. Noakes, C. B. Beggs, P. A. Sleigh // Indoor and Built Environment. – USA, 2004. – Vol. 13, no. 6, pp. 477 – 507.

133. Noakes C. J. Use of CFD modelling to optimise the design of upper-room UVGI disinfection systems for ventilated rooms / C. J. Noakes, P. A. Sleigh, L. A. Fletcher, C. B. Beggs // Indoor and Built Environment. – USA, 2006. – Vol. 15, no. 4, pp. 347 – 356.

134. Olesen B. W. Experimental study of air distribution and ventilation effectiveness in a room with a combination of different mechanical ventilation and heating/cooling systems / B. W. Olesen, A. Simone, M. Krajcik, F. Causone, M. De Carli // International Journal of Ventilation, 2011. – Vol. 9, no. 4, pp. 371 – 384.

135. Olesen B. W. Revision of EN 15251: Indoor Environmental Criteria [Электронный ресурс] / B. W. Olesen. – Режим доступа: <http://www.rehva.eu/publications-and-resources/hvac-journal/2012/042012/revision-of-en-15251-indoor-environmental-criteria>. – Заголовок с экрана. – Проверено: 29.03.16.

136. Salm J. Dependence of the Ion-Aerosol Equivalent Attachment Coefficient on the Ratio of Polar Conductivities in a Steady State / J. Salm, E. Tamm // Aerosol and Air Quality Research, 2011. – Vol. 11, no. 3, pp. 211 – 217.

137. Sawant V. S. Control of Respirable Particles in Indoor Air with Portable Negative Air Ion Generator / V. S. Sawant // IOSR Journal Of Environmental Science, Toxicology And Food Technology, 2013. – Vol. 3, issue 3, pp. 28 – 31.
138. Schijndel A. W. M. Chaotic Behavior of the Airflow in a Ventilated Room / A. W. M. van Schijndel // Proceedings of the COMSOL Conference, Milan. – 2009.
139. Shiue A. Particles Removal by Negative ionic Air Purifier in Cleanroom / A. Shiue, S.-Ch. Hu, M.-L. Tu // Aerosol and Air Quality Research, 2011. – Vol. 11, no. 2, pp. 179 – 186.
140. Srebric J. CFD boundary conditions for contaminant dispersion, heat transfer and airflow simulations around human occupants in indoor environments / J. Srebric, V. Vukovic, G. He, X. Yang // Building and environment, 2008. – Vol. 43, no. 3, pp. 294–303.
141. Tammet H. Reduction of air ion mobility to standard conditions / H. Tammet // Journal of geophysical research, 1998. – Vol. 103, no. D12, pp. 13933 –13937.
142. Tammet H. Size and mobility of nanometer particles, clusters and ions / H. Tammet // Journal of Aerosol Science, 1995. – Vol. 26, issue 3, pp. 459 – 475.
143. Tammet H. The limits of air ion mobility resolution / H. Tammet // Proceedings of the 11th International Conference on Atmospheric Electricity, 1999. – NASA, MSFC, Alabama, pp. 626 – 629.
144. 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.
145. 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.

146. 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.
147. 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.
148. 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.
149. 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.
150. 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.
151. 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.

Приложение А

ЗАТВЕРДЖУЮ
Заступник директора
з технічних питань
ООО ПКФ «Біотон»
С. Пацера



20 р.

АКТ

про впровадження результатів науково-дослідницької роботи

В дисертаційній роботі здобувача Циганкової Світлани Григорівни (Придніпровська державна академія будівництва та архітектури) розроблені нові чисельні моделі та програми розрахунку параметрів аероіонного режиму в приміщеннях при штучній іонізації повітря. Розроблені моделі базуються на чисельному розв'язку багатовимірних рівнянь масопереносу, аеродинаміки та електростатики. Поле швидкості повітряних потоків в приміщенні розраховується на базі рівняння потенційної течії. Для чисельного інтегрування моделюючих рівнянь автор використовує неявні різницеві схеми.

На відміну від існуючих методик, розроблені чисельні моделі дозволяють розраховувати концентраційне поле аероіонів обох видів полярності з урахуванням впливу стін, підлоги, стелі, перешкод на процес розсіювання аероіонів, розташування вентиляційних отворів та їхньої форми і розмірів, конкретного місця емісії іонів та їх взаємодії в приміщенні і в робочих зонах в умовах штучної іонізації повітря. Розроблені чисельні моделі дозволяють прогнозувати аероіонний режим в приміщенні та окремих робочих зонах, як на стадії проектування, так і у вже введених в експлуатацію приміщеннях.

Розроблені здобувачем, Циганковою Світланою Григорівною, чисельні моделі та пакети програм були використані ООО ПКФ «Біотон» з метою аналізу та прогнозування аероіонного режиму при розробці заходів з нормалізації якості повітряного середовища в робочих приміщеннях підприємства.



Представник ДВНЗ «Придніпровська
державна академія
будівництва та архітектури»
Проректор з наукової роботи
М.В. Савицький
Д.т.н., проф. кафедри «Водопостачання,
водовідведення та гідравліки»

Здобувач кафедри «Водопостачання,
водовідведення та гідравліки»

С.Г. Циганкова

Головний технолог
ООО ПКФ «Біотон»
І.В. Рябченко

Приложение Б

УЗГОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи
ДВНЗ «Придніпровська
державна академія
будівництва та архітектури»
д-р. проф. М. В. Савицький



_____ 2015р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Дніпровський
завод будівельних матеріалів»
В. Г. Костирко



_____ 2015р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів науково-дослідних, дослідно-конструкторських і технологічних
робіт у вищих навчальних закладах

Дійсним актом підтверджується, що результати роботи за темою:
«Системний аналіз енергозберігаючих та екологоорієнтованих систем і
технологій життєзабезпечення з метою захисту людини від шкідливих
факторів» № держреєстрації 0111U006479

(найменування теми, № держ. реєстрації)

виконаної Придніпровською державною академією будівництва та
архітектури

(найменування вузу, НДІ, КБ)

вартістю _____ тис, грн
(цифрами й прописом)

виконуваної _____ 2015 р.
(строки виконання)

впроваджені «ТОВ «Дніпровський завод будівельних матеріалів»
(найменування підприємства, де здійснюється впровадження)

1. Вид впроваджених результатів Рекомендації щодо застосування чисельних
прогнозних моделей для оцінки, аналізу та нормалізації аероіонного режиму
при штучній іонізації повітря

(експлуатація виробу, роботи, технології, процесами, функціонування систем)

2. Характеристика масштабу впровадження _____ одиничне
(унікальне, одиничне, партія, масове, серійне)

3. Форма впровадження:
Методика (метод) _____ Рекомендації

4. Новизна результатів науково-дослідних робіт _____ якісно нові

(піонерські, принципово нові, якісно нові, модифікації, модернізація старих розробок)

5. Дослідно-промислова перевірка _____
(указати номер і дату актів випробувань,

_____ найменування підприємства, період)

6. Впроваджені:

– у _____ «ТОВ «Дніпровський завод будівельних матеріалів»
(ділянка, цех, процес)

– у проектні роботи _____
(від впровадження в проект)

7. Річний економічний ефект _____
(від впровадження в проект)

фактичний _____ тис. грн.
у тому числі участі на паях _____

_____ тис. грн.
(%, цифрами й прописом)

8. Питома економічна ефективність впроваджених результатів _____
_____ грн/грн,

9. Обсяг впровадження _____
що становить _____ % від обсягу впровадження, покладеного в
основу розрахунку гарантованого економічного ефекту, розрахованого по
закінченні НДР ($E_{\text{гар}} =$ _____ тис. грн.), а при поетапному впровадженні
 $E_{\text{гар}} =$ _____ при укладанні договору.

10. Соціальний і науково-технічний ефект полягає в отриманні науково-обґрунтованої інформації про концентраційні рівні позитивних та негативних аероіонів в приміщенні при штучній іонізації повітря, шляхом впровадження нових прогнозних моделей, що дозволяють оцінювати аероіонний режим в приміщеннях та в робочих зонах з урахуванням впливу стін, підлоги, стелі, перешкод на процес розсіювання аероіонів, місць розташування вентиляційних отворів та їхньої форми і розмірів, конкретного місця емісії іонів різної полярності та їх взаємодії в приміщенні і в робочих зонах, наявності місць викидання або накопичення пилу, зокрема визначати шкідливі для здоров'я людини зони з рівнем аероіонів, що не відповідає існуючим нормативам, в приміщеннях та робочих зонах, а також розробляти заходи з нормалізації та підтримки оптимальних умов праці за показником іонізації повітря

(охорона довкілля, надр; поліпшення й оздоровлення умов праці, удосконалювання структури керування, спеціальні призначення й інше)

Від ДВНЗ «ПДАБ таА»:
Керівник робіт, зав. кафедрою
«Опалення, вентиляції та
якості повітряного середовища»,
д.т.н., професор

_____ Поліщук С.З.
Виконавець робіт, здобувач
кафедри «Водопостачання,
водовідведення та гідравліки»
_____ С.Г. Циганкова

Від підприємства:
Заступник директора
ТОВ «Дніпровський завод
будівельних матеріалів»



Гкаль С.Г.

Приложение В

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
ДВНЗ «Придніпровська

державна академія
будівництва та архітектури»

д.т.н., проф. Савицький М. В.



2016 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Циганкової Світлани Григорівні
«Обґрунтування параметрів нормалізації аероіонного режиму в приміщеннях
при штучній іонізації повітря»

Ми, що підписалися нижче, начальник навчального відділу д.т.н., доц. Тріфонов І. В., декан факультету технологій життєзабезпечення та екології к.т.н., доц. Петренко В. О., завідувач кафедри опалення, вентиляції і якості повітряного середовища д.т.н., проф. Поліщук С. З. склали цей акт про те, що результати досліджень Циганкової С. Г. були використані в навчальному процесі при викладанні курсів «Санітарно-гігієнічні основи спеціальності» та «Кондиціонування повітря» на випускаючій кафедрі та виконанні магістерських робіт зі спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (спеціалізація «Теплогазопостачання і вентиляція»).

Начальник навчального відділу,
д.т.н., доц.

Тріфонов І. В.

Декан факультету технологій
життєзабезпечення та екології
к.т.н., доц.

Петренко В. О.

Завідувач кафедри опалення,
вентиляції і якості
повітряного середовища
д.т.н., проф.

Поліщук С. З.

Приложение Г

Подпрограммы типа SUBROUTINE, осуществляющие численное моделирование поля потенциала скорости, электрического поля, рассеивания отрицательных, положительных аэроионов, и пыли в помещении

TSH98 – расчет компонентов вектора скорости.

Входные данные:

- поле потенциала скорости;
- размеры расчетной области;
- размеры разностной сетки;
- шаг по пространственным координатам разностной сетки.

Результат: значение компонентов вектора скорости.

```

SUBROUTINE TSH98 (H,U,V,N1,N2,N11,N21,HX,HY)
DIMENSION H(N11,N21),U(N1,N21),V(N11,N2)
DO 1 J=1,N21
DO 1 I=1,N11-1
call gran(h,n11,n21,hx,hy)
U(I+1,J)=(H(I+1,J)-H(I,J))/HX
1 CONTINUE
DO 20 J=1,N21
U(1,J)=U(2,J)
20 CONTINUE
DO 30 J=1,N21
U(N1,J)=U(N1-1,J)
30 CONTINUE
DO 50 J=1,N21-1
DO 50 I=1,N11
call gran(h,n11,n21,hx,hy)
V(I,J+1)=(H(I,J+1)-H(I,J))/HY

```

```
50  CONTINUE
    DO 770 I=1,N11
      V(I,1)=V(I,2)
770  CONTINUE
    RETURN
    END
```

TSH77 – расчет электрического поля.

Входные данные:

- концентрация отрицательных ионов в помещении;
- размеры расчетной области;
- размеры разностной сетки;
- шаг по времени разностной сетки;
- текущее время;
- шаг по пространственным координатам разностной сетки.

Результат: поле скалярного электрического потенциала.

```
SUBROUTINE TSH77 (F,N1,N2,N11,N21,HX,HY,Fnn)
DIMENSION F(N11,N21), Fnn(n11,n21)
N12=N1-2
N22=N2-2
Do 1 i=2, n12
Do 1 J = 2, n22
call calcul(f,fnn,hx,hy,dt)
1 CONTINUE
RETURN
END
```

TSH87 – расчет поля потенциала скорости.

Входные данные:

- размеры расчетной области;
- кратность воздухообмена;
- размеры разностной сетки;
- шаг по пространственным координатам разностной сетки.

Результат: поле потенциала скорости.

```

SUBROUTINE TSH87 (F,N1,N2,N11,N21,DT,HX,HY,XMA)
DIMENSION F(N11,N21),XMA(N11,N21)
DTX=DT/HX
DTY=DT/HY
N12=N1-2
N22=N2-2
Do 1 ii=2, n12
i=n1-ii
Do 1 JJ = 2, n22
J = N2-JJ
IP=XMA(I+1,J)
IV=XAS(I,J+1)
HV=F(I,J+1)
call ggh(f,n11,n21,hx,hy,ip,iv,hv)
B=1.0+DT*TA/HX/HX+DT*TA/HY/HY
A=F(i,j)+DT*TAM*HP/HX/HX
*+DT*TAM*HV/HY/HY
F(i,j)=A/B
call usl (f,n11,n21)
1 CONTINUE
RETURN
END

```


TSH67 – расчет переноса пыли в помещении.

Входные данные:

- поле скорости в помещении;
- размеры расчетной области;
- коэффициенты диффузии;
- интенсивность эмиссии отрицательных, положительных ионов и пыли;
- коэффициенты взаимодействия частиц;
- размеры разностной сетки;
- шаг по времени разностной сетки;
- шаг по пространственным координатам разностной сетки.

Результат: концентрация пыли.

```

SUBROUTINE TSH67 (D,N11,N21,DT,HX,HY,T,T4N,T4K,
*QD,ALFA,BETA,U,V,AD,t)
DIMENSION D(N11,N21), U(N1,N21),V(N11,N2)
DO 1 I=1,N11
DO 1 J=1,N21
cal fgh(d,n11,n21,u,v,alfa,beta,t,ad,hx,hy)
IF (T.LE. T4K.AND. T.GE.T4N ) GO TO 55
GO TO 1
55 D(I,J)=D(I,J)+DT*Q/HX/HY
1 continue
RETURN
END

```

TSH33 – расчет переноса отрицательных аэроионов в помещении.

Входные данные:

- поле скорости в помещении;
- размеры расчетной области;
- коэффициенты диффузии;
- интенсивность эмиссии отрицательных, положительных ионов и пыли;
- коэффициенты взаимодействия частиц;
- размеры разностной сетки;
- шаг по времени разностной сетки;
- шаг по пространственным координатам разностной сетки.

Результат: концентрация отрицательных аэроионов.

```

SUBROUTINE TSH33 (F,U,V,N1,N2,N11,N21,DT,HX,HY,
*F1,D,AM,alfa,beta,t,QF)
DIMENSION F(N11,N21),U(N1,N21),V(N11,N2)
N12=N1-2
N22=N2-2
Do 1 i=2, n12
Do 1 J = 2, n22
call fgj (f,n11,n21,alfa,beta,t,qf,dt,hx,hy)
B=1.0+DTX*Uz+DTY*Vz+DT*AM/HX/HX+DT*AM/HY/HY
A=F(i,j)+DTX*Uz*Hz
*+DY*Vz*HN+DT*AM*(HP-F(I,J))/HX/HX
F(i,j)=A/B
1  CONTINUE
DO 2 I=1,N11
VS=V(I,1)
IF (VS) 22,22,21
21  F(I,1)=f1

```

```
GOTO 23
22  F(I,1)=F(I,2)
23  VS=V(I,N2)
    IF (VS) 24,25,25
24  F(I,N21)=f1
    GOTO 2
25  F(I,N21)=F(I,N22)
2   CONTINUE
    DO 3 J=1,N21
    VS=U(1,J)
    IF (VS) 32,32,31
31  F(1,J)=f1
    GOTO 33
32  F(1,J)=F(2,J)
33  VS=U(N1,J)
    IF (VS) 34,35,35
34  F(N11,J)=f1
    GOTO 3
35  F(N11,J)=F(N12,J)
3   CONTINUE
    RETURN
    END
```

TSH57 – расчет переноса положительных аэроионов в помещении.

Входные данные:

- поле скорости в помещении;
- размеры расчетной области;
- коэффициенты диффузии;
- интенсивность эмиссии отрицательных, положительных ионов и пыли;
- коэффициенты взаимодействия частиц;
- размеры разностной сетки;
- шаг по времени разностной сетки;
- шаг по пространственным координатам разностной сетки.

Результат: концентрация положительных аэроионов.

```

SUBROUTINE TSH57 (FP,U,V,N1,N2,N11,N21,DT,HX,HY,
*MAS,F1,D,AMD,QP)
DIMENSION F(N11,N21),U(N1,N21),V(N11,N2),
N12=N1-2
N22=N2-2
Do 1 ii=2, n12
i=n1-ii
Do 1 JJ = 2, n22
J = N2-JJ
call ase(qp,fp,u,v,alfa,beta,hx,hy)
B=1.0-DTX*Uk-DTY*Vk+DT*AMD/HX/HX+DT*AMD/HY/HY
A=F(i,j)-DTX*UM*HP
*-DTY*VM*HV+DT*AMD*(HL-F(I,J))/HX/HX
F(i,j)=A/B
1 CONTINUE
DO 2 I=1,N11
VS=V(I,1)

```

```
      IF (VS) 22,22,21
21  F(I,1)=f1
      GOTO 23
22  F(I,1)=F(I,2)
23  VS=V(I,N2)
      IF (VS) 24,25,25
24  F(I,N21)=f1
      GOTO 2
25  F(I,N21)=F(I,N22)
2   CONTINUE
      DO 3 J=1,N21
      VS=U(1,J)
      IF (VS) 32,32,31
31  F(1,J)=f1
      GOTO 33
32  F(1,J)=F(2,J)
33  VS=U(N1,J)
      IF (VS) 34,35,35
34  F(N11,J)=f1
      GOTO 3
35  F(N11,J)=F(N12,J)
3   CONTINUE
      RETURN
      END
```