

На правах рукописи

Савичев Виталий Валерьевич

Разработка системы вентиляции с регенерацией газового состава воздушной среды административного здания

05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2012 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Рымаров Андрей Георгиевич

Официальные оппоненты: Савин Владимир Константинович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН, Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, заведующий лабораторией теплофизики и строительной климатологии.

Гвоздков Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет», доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита состоится « » _____ 2012г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 007.001.01 при Научно исследовательском институте строительной физики РААСН, по адресу: Москва, 127238, Локомотивный проезд, д.21, светотехнический корпус; тел. (495)482-40-76, факс (495)482-40-60

С диссертацией можно ознакомиться в научно-методическом фонде НИИ строительной физики РААСН.

Автореферат разослан « » _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Умнякова Нина Павловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время наблюдается тенденция к ухудшению экологической ситуации воздушной среды больших, средних и малых городов и как следствие к ухудшению качества воздуха в зданиях. Воздушная среда городов загрязняется аэрозолями различного химического состава, одним из показателей загрязненности воздуха является CO_2 . Современный город характеризуется загруженными автомагистралями, промышленными зонами, автопарками и пр. – все это источники загрязнения воздушной среды. Создание требуемых микроклиматических параметров воздушной среды и концентраций вредных примесей в помещениях здания важно для состояния здоровья человека. Воздухообмен в зданиях, обеспечиваемый за счет механической вентиляции, связан с большими энергетическими затратами. Но если воздух, окружающий здание, загрязнен, то работа вентиляции становится не эффективной и даже вредной, так как с помощью вентиляции воздух в здании насыщается вредными примесями и, следовательно, нужна другая система вентиляции, которая позволит без использования наружного воздуха решить проблему качества микроклимата и состава воздуха в помещениях здания и снизить энергетические затраты. Основной вредной примесью в административных зданиях является углекислый газ, источником которого является человек. Углекислый газ в данной постановке задачи является индикатором загрязнения воздушной среды в помещениях административного здания.

В настоящей работе предлагается решение комплексной задачи по моделированию регенеративной способности «зимнего сада» объединенного с помещениями административного здания по воздуху с целью понижения концентрации CO_2 в объеме здания и насыщения воздуха O_2 . В данной постановке задачи «зимний сад» – это помещение в здании или отдельно стоящее здание, в котором находятся растения, способные регенерировать воздух, поглощая углекислый газ и выделяя кислород, при этом здание связано с «зимним садом» рециркуляционной системой вентиляции. Помещение «зимнего сада» является объемом с растениями, способными к активному фотосинтезу в условиях взаимодействия воздушного, газового, влажностного и теплового режимов помещений административного здания и помещения «зимнего сада». Объем зелёной массы растений, необходимый для регенерации газового состава воздуха, определяет объем и площадь «зимнего сада».

Известны и хорошо изучены процессы жизнедеятельности растений с точки зрения фотосинтеза, дыхания, фотодыхания и темнового дыхания. В течение суток эти процессы взаимозамещают друг друга, что в свою очередь связано с поглощением CO_2 и выделением O_2 .

При работе системы вентиляции подается воздух, который надо нагревать, что связано с затратами тепловой энергии, а при использовании «зимнего сада» можно снизить приток наружного воздуха в холодный период

года, это позволяет рассматривать разрабатываемую технологию как энергосберегающую.

Все процессы в здании и зимнем саду рассматриваются в рамках единой технологической системы, включающей в себя: – административное здание с помещениями с источником CO₂, – здание (помещение) «зимнего сада», – наружный воздух, окружающий административное здание, с массовой концентрацией CO₂.

Задача по созданию новой энергосберегающей технологии формирования качественного состава воздушной среды в помещениях зданий на основе регенерации воздуха является актуальной. Предметом исследования в работе является регенеративная система вентиляции в помещениях здания с применением «зимнего сада».

Цель исследования: разработка принципов организации работы системы вентиляции с регенерацией газового состава воздушной среды в административном здании при рециркуляции воздуха через помещение «зимнего сада» по величине массовой концентрации углекислого газа и кислорода.

Особенностью рассматриваемой системы вентиляции является регенерация воздуха по качественному составу в административном здании с «зимним садом» для замещения углекислого газа кислородом.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

- разработана технологическая схема регенерации газового состава воздуха административного здания с «зимним садом»;
- определены параметры микроклимата «зимнего сада» и административного здания для контроля за их изменением при регенерации и рециркуляции воздуха;
- определены количество регенерируемого воздуха, объем помещения «зимнего сада», тип растений и площадь зеленого покрова растений в помещении «зимнего сада»;
- определена динамика изменения концентрации CO₂ и параметров микроклимата в помещениях административного здания в зависимости от меняющихся во времени воздушного и теплового режимов и относительной влажности воздуха;
- определена динамика изменения температуры, относительной влажности воздуха и концентрации CO₂ в помещении «зимнего сада», с учетом влияния на него воздушного и теплового режимов, а также интенсивности процесса фотосинтеза и дыхания растений;
- определена регенеративная мощность поглощения CO₂ поверхностью зеленого покрова растений в «зимнем саду»;
- разработан алгоритм расчета газового и теплового режимов и влажностного режима воздуха на основе многозонной модели помещения «зимнего сада».

Объект исследования. Параметры микроклимата в помещениях административного здания и помещении «зимнего сада» при регенерации и рециркуляции воздуха.

Предмет исследования. Газовый, тепловой, воздушный режимы и влажностный режим воздуха помещений административного здания и помещения «зимнего сада», в условиях объединения их в единую регенеративную и рециркуляционную схему по формированию параметров микроклимата.

Научная новизна работы заключается:

- в создании математической модели газового и воздушного режима административного здания с «зимним садом» при организации регенерации газового состава воздуха;
- в разработке технологической схемы рециркуляционной системы вентиляции с учетом полученной регенеративной мощности потребления CO_2 поверхностью зеленого покрова растений в объеме «зимнего сада» в течение суток;
- в разработке алгоритма определения требуемого геометрического размера помещения «зимнего сада» в зависимости от площади помещений административного здания, количества людей и значения массовой концентрации CO_2 в составе наружного воздуха, при работе рециркуляционной системы вентиляции по восстановлению газового состава воздушной среды.

Практическая значимость работы:

- создание способа регенерации воздуха административного здания по концентрации CO_2 и O_2 в процессе рециркуляции воздуха через помещение «зимнего сада»;
- в разработке метода расчета параметров микроклимата «зимнего сада» в процессе регенерации и рециркуляции воздуха с учетом влияния изменяющихся во времени воздушного, теплового и газового (по концентрации CO_2 и O_2) режимов и влажностного режима воздуха;
- в разработке метода по определению требуемых геометрических размеров помещения «зимнего сада» и площади зеленого покрова, в зависимости от площади (объема) административного здания, с помощью созданной математической модели динамических тепломассообменных режимов административного здания и «зимнего сада»;
- в разработке рекомендаций по выбору типов зеленых насаждений применяемых в условиях работы рассматриваемой регенеративной схемы вентиляции административного здания с помещением «зимнего сада».

Достоверность научных положений, выводов и результатов обоснована из анализа экспериментов на основе теории ошибок, хорошей сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также результатов исследований других авторов.

На защиту выносятся следующие основные положения диссертации:

- математическая модель газового режима помещения «зимнего сада», учитывающая регенеративную мощность поглощения растениями CO_2 ;
- комплексный метод расчета распределения концентраций CO_2 и O_2 и параметров микроклимата в объеме помещения «зимнего сада», с учетом

регенерации газового состава воздуха и динамики воздушного и теплового режимов и влажностного режима воздушной среды;

– методика определения объема помещения «зимнего сада» и зеленых насаждений необходимых для регенерации воздуха, рециркулирующего между административным зданием и помещением «зимнего сада».

Внедрение результатов исследований.

Методика расчета вентиляции по восстановлению газового состава воздушной среды внедрена в учебный процесс кафедры Отопления и вентиляции МГСУ в курсе вентиляции, а также при проектировании инженерных объектов.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на кафедре отопления и вентиляции МГСУ в 2008, 2009, 2010, 2011 и 2012 г.г., на научных семинарах на кафедре общей физики МГСУ в 2008, 2009, 2010, 2011 и 2012 г.г., на IV Международной научной конференции «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды», Волгоград 14-18 мая 2008 года, ВолгГАСУ, на XII Международной межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, докторантов и аспирантов «Строительство-формирование среды жизнедеятельности», МГСУ, 15-22 апреля 2009 г., третьей Международной научно-практической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции». 21-23 ноября 2009 г., МГСУ Москва, на конференции в НИИСФ в 2012 г., при работе по программе У.М.Н.И.К. 2009-2011 г.г.

Результаты диссертации достаточно полно изложены в 6 опубликованных работах, в том числе в 2-х работах, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает введение, пять глав, заключение, список литературы, включающий 140 наименований, в том числе 12 зарубежных источников. Общий объем диссертационной работы: 125 страниц машинописного текста, 6 таблиц, 50 рисунков, приложение в виде текста программ и справок о внедрении.

Автор выражает искреннюю благодарность за научную, практическую и консультативную помощь к. ф.-м. наук, проф. Парфентьевой Н.А.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Приводятся обоснование актуальности работы, определены цель и задачи исследований, перечислены основные научные и практические результаты исследований.

В первой главе представлен анализ научных работ, посвященных современному состоянию исследований по теплогазообмену в здании и «зимнем саду».

Исследованию воздушного режима помещения и здания посвящены работы ученых: Батурина В.В., Абрамовича Г.Н., Шепелева И.А., Талиева В.Н., Титова В.П., Гримитлина М.И., Табунщикова Ю.А., Савина В.К., Позина Г.М. и др.

Изменение газового режима помещения зависит от воздушного режима. Процесс распределения вредных примесей в помещении носит нестационарный характер, который зависит от объема помещения, мощности и времени работы источника вредных примесей, воздухообмена. Определение направления движения потоков воздуха в помещении и здании определяет перенос вредных примесей в воздушной среде.

Исследованию газового режима помещения и здания в своих работах рассматривали: Селиверстов А.Н., Эльтерман В.М., Абрамович Г.Н., Титов В.П., Рымаров А.Г. и др.

Растения в процессе газообмена с окружающим воздухом поглощают или выделяют через устьицы CO_2 , O_2 и водяной пар. Если в процессе газопереноса значение концентрации CO_2 в воздухе незначительное, то недостаток углекислого газа у поверхности листа приведет к замедлению процесса фотосинтеза. Исследование путей адаптации растений к условиям изменения окружающей воздушной среды и особенностям их влияния на формирование газового режима в воздушной среде, связано с именами таких ученых как Мокронос А.Т., Насонов Д.Н., Александров В.Я., Биль К.Я., Дроздов С.Н., Семихатова О.А., Клапвайк Д., Головки Т.К., Ничипорович А.А., Бриллиант В.А., Бурыкин П.А., Мязталу Х.И., Паэ А.А., Лехтвир Р.В., Судаченко В.Н., Хазанов С.Г., Лебла Д.О., Цыдендамбаев А.Д., Enoch H.Z, Schapendonk A.H., Кособрухов А.А., Чермных А.Н., Белов В.Н., Небрат Н.М и др. Полученные экспериментальные данные значительно расширяют представление о путях влияния повышенной концентрации углекислого газа на фотосинтез и ростовые процессы растений при модифицирующем действии других, в том числе стрессовых, факторов внешней среды.

Особый вклад в изучение и описание теплового режима здания внесли ученые: Власов О.Е., Шкловер А.М., Богословский В.Н., Кувшинов Ю.Я., Табунщиков Ю.А., Савин В.К., Позин Г.М., Гагарин В.Г., Могутов В.А., Малявина Е.Г., и др.

Формирование теплового и влажностного режима теплиц и фондовых оранжерей проработан и подробно рассмотрен в работах Бодрова В.И., Андриевского А.К., Егiazарова А.Г., Есина В.В., Куртенера Д.А., Нерпина С.В., Павлова В.З., Позина Г.М., Решетина О.Л., Строй А.Ф., Степанова В.М., Горшенина В.П., Беловой Е.М. и др.

Существующие методы решения теплового режима позволяют анализировать температурные изменения в помещениях административного здания с зимним садом в течение года.

Анализ литературы по расчету газового режима помещений и зданий показал, что на сегодняшний день методики расчета газового режима «зимнего сада», соединенного системой рециркуляции воздуха с административным зданием для регенерации газового состава воздуха, с учетом особенностей микроклимата и газового состава воздуха, благоприятных для жизни растений, не существует.

Обзор изученной литературы позволил сформировать цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава диссертации посвящена постановке задачи и формулированию математической модели по расчету распределения концентрации углекислого газа в воздухе при регенерации и рециркуляции воздуха между административным зданием и «зимним садом».

Схема организации работы системы вентиляции по восстановлению газового состава воздуха административного здания с помощью помещения «зимнего сада» представлена на рис.1.

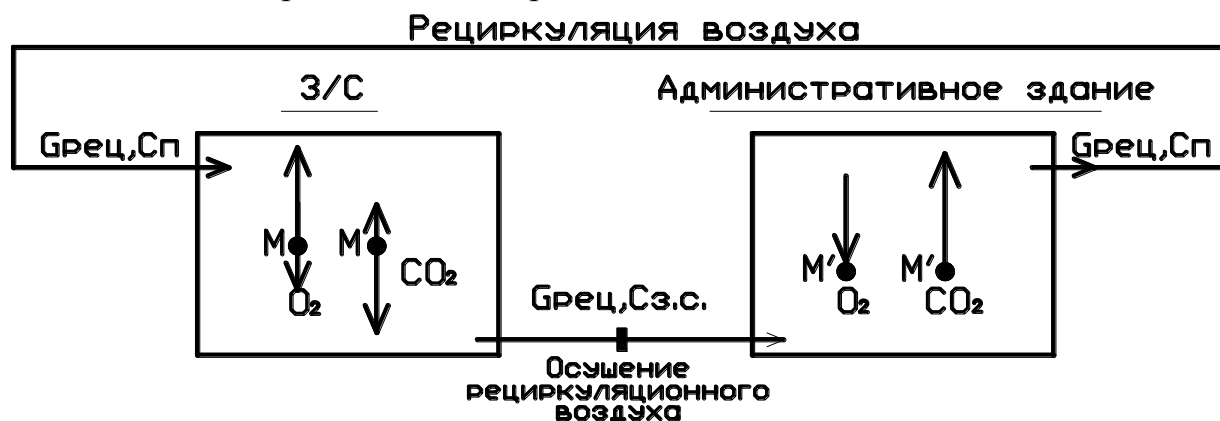


Рис.1 Рис. 2.3 Схема работы системы вентиляции с восстановлением газового состава воздушной среды, где M' - мощность источника выделения вредных веществ, кг/ч; M – регенеративная мощность поглощения CO_2 поверхностью зеленого покрова растений, кг/($\text{м}^2 \times \text{ч}$); G_{pec} – количество воздуха подлежащее восстановлению, кг/ч; $c_{з.с.}$ – массовая концентрация CO_2 в забираемом воздухе из «зимнего сада», кг/м³; c_n – массовая концентрация CO_2 в воздухе административного здания и подаваемом в «зимний сад», кг/м³.

При организации рециркуляции воздуха из административного здания в помещение зимнего сада и обратно необходимо учитывать совместное влияние всех рассматриваемых динамических тепломассообменных режимов в помещениях здания и в помещении зимнего сада друг на друга, что важно для создания требуемых параметров микроклимата в помещениях здания и в помещении зимнего сада. Схема функционирования системы регенеративной вентиляции при влиянии динамических тепломассообменных режимов здания и «зимнего сада» друг на друга представлена на рис. 2. Динамически меняющиеся параметры микроклимата помещения «зимнего сада» в предложенной схеме формируют параметры микроклимата в помещениях здания в результате работы системы вентиляции по восстановлению газового состава воздушной среды.

Газовый режим в инженерной системе «здание – «зимний сад» определяется формированием заданного газового режима в здании и зимнем саду. Зимний сад с растениями предназначен для круглогодичного использования в системе регенерации рециркуляционного воздуха, поступающего из административного здания в зимний сад и затем из зимнего сада в администра-

тивное здание. Воздух, поступивший в «зимний сад» с повышенным значением массовой концентрации CO_2 и пониженной концентрацией O_2 , проходит между листьями растений и меняет газовый состав: уменьшается концентрация CO_2 и растет концентрация O_2 . Объем «зимнего сада» должен быть максимально заполнен биомассой растений, способной к фотосинтезу, при котором происходит процесс регенерации газового состава воздуха. Максимальное заполнение растениями объема «зимнего сада» необходимо для снижения капитальных и эксплуатационных затрат и повышению производительности помещения по регенеративной способности понижения массовой концентрации CO_2 .

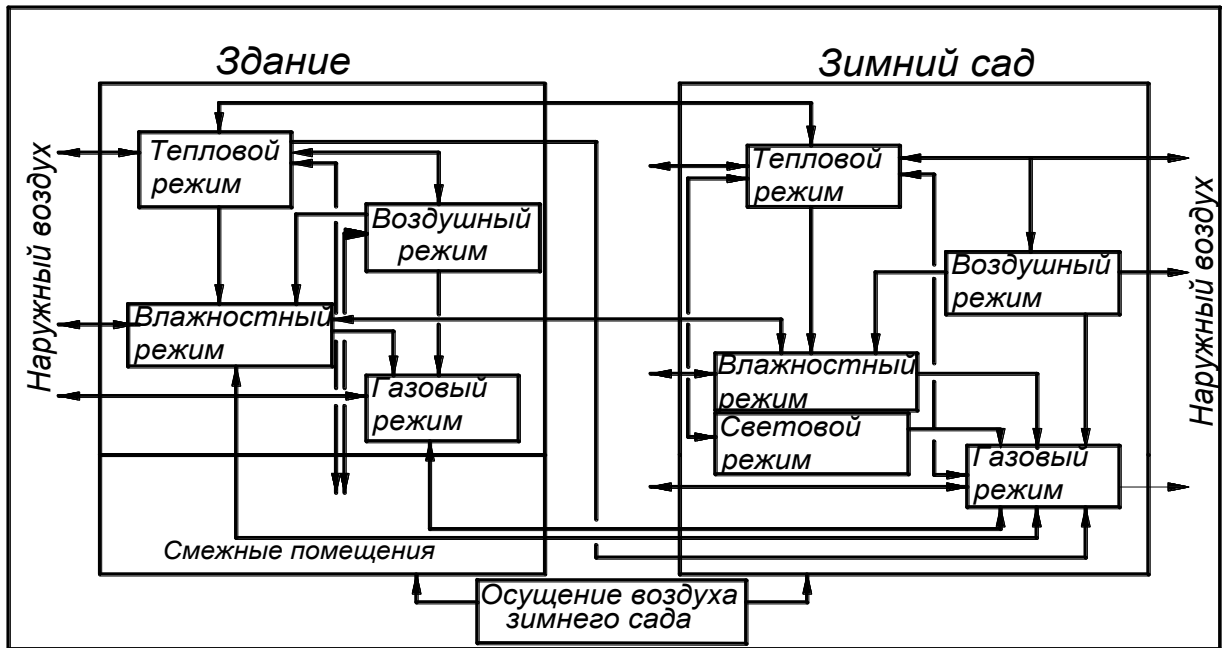


Рис. 2 Схема анализа взаимодействия режимов, формируемых в административном здании и зимнем саду, в результате организации работы регенеративной схемы системы вентиляции.

Газовый режим помещения «зимнего сада» в общем виде можно представить в виде балансового уравнения (1).

$$L_n \times c_n \times d\tau - L_y \times c_y \times d\tau - M \times d\tau \times F_{\text{общ}} = Vdc, \quad (1)$$

где $L_n = L_y$ – объемный расход воздуха подаваемый и забираемый из помещения «зимнего сада», $\text{м}^3/\text{ч}$; c_n – массовая концентрация CO_2 в воздухе подаваемом в «зимний сад», $\text{кг}/\text{м}^3$; c_y – массовая концентрация CO_2 в воздухе удаляемом из «зимнего сада», $\text{кг}/\text{м}^3$; V – объем помещения «зимнего сада», м^3 ; $d\tau$ – время, ч; dc – изменение массовой концентрации CO_2 , $\text{кг}/\text{м}^3$; M – регенеративная мощность зеленого покрова растений, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; $F_{\text{общ}}$ – площадь зеленого покрова растений, м^2 .

Изменение массовой концентрации CO_2 в результате восстановления $c_{\text{рег}}$ описывается уравнением (2).

$$c_n - c_y = c_{\text{рег}}, \quad (2)$$

По высоте помещение «зимнего сада» разбивается на три зоны с разными газовыми режимами по концентрациям CO_2 и O_2 . Первая зона включает в себя пространство от воздухоподачи до начала контакта воздуха с поверхностью зеленого покрова, где концентрация углекислого газа неизменна и равна концентрации забираемого воздуха из помещений административного здания. Вторая зона – «рабочая», заполненная покровом листьев, где происходит восстановление воздушной среды по газовому составу, т.е. происходит понижение концентрации CO_2 и насыщение воздуха O_2 . Третья зона включает в себя пространство от нижней границы расположения зеленого покрова до почвы, где воздух имеет концентрацию CO_2 доведенную до концентрации входящей в состав идеального воздуха и воздух насыщен кислородом. Схема разбиения «зимнего сада» по высоте на зоны представлена на рис. 3.

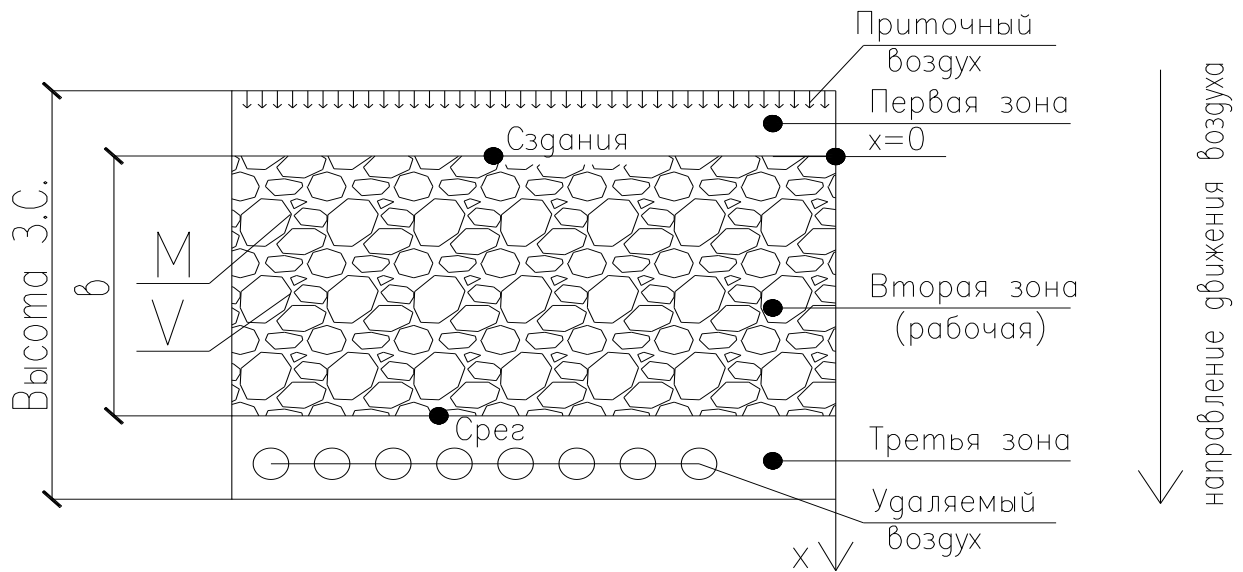


Рис. 3 Схема разделения «зимнего сада» (З.С.) по высоте на зоны.

Проведен вывод дифференциального уравнения для регенеративной способности по поглощению CO_2 зеленым покровом листьев растений в «рабочей» зоне, которое представлено в виде уравнения (3).

$$3600 \cdot v \frac{dc}{dx} = -\mu(x) \cdot M(c) , \quad (3)$$

где M – регенеративная мощность поглощения CO_2 поверхностью зеленого покрова растений, $\text{кг}/(\text{м}^2 \times \text{ч})$; μ – отношение площади зеленого покрова к объему зеленого покрова, $\text{м}^2/\text{м}^3$; v – подвижность воздуха, $\text{м}/\text{с}$; x – направление движения воздуха; 3600 размерный коэффициент, $\text{с}/\text{час}$.

В общем случае M зависит от ряда факторов, в том числе от концентрации CO_2 , т.е. вместо M следует писать $M(c)$, величина μ также зависит от ряда факторов, в том числе от координаты, т.е. вместо μ следует писать $\mu(x)$.

Решение дифференциального уравнения (3) имеет следующий вид:

$$3600 \cdot \int \frac{dc}{M(c)} = -\frac{1}{v} \cdot \int \mu(x) dx , \quad (4)$$

Если принять, что $M(c)$ и $\mu(x)$ являются постоянными, то решение уравнения (3) будет иметь вид:

$$c_x = -\frac{\mu \cdot M}{3600 \cdot v} \cdot x + c_n, \quad (5)$$

где c_x – массовая концентрация CO_2 на расстоянии x от верха рабочей зоны, м.

При этом изменение массовой концентрации CO_2 в результате восстановления описывается уравнением:

$$c_{\text{рег}} = \frac{\mu \cdot M}{3600 \cdot v} \cdot b, \quad (6)$$

где b – высота зеленого покрова в объеме «зимнего сада», м.

Для создания инженерной системы «административное здание – зимний сад» в работе рассмотрены следующие динамические режимы: для административного здания: - газовый режим по кислороду и углекислому газу, тепловой режим; - влажностный режим (перемещение водяного пара в воздухе); - воздушный режим (определение потоков поступающего, уходящего и перетекающего воздуха, с учетом работы систем вентиляции и рециркуляции). Для зимнего сада: - газовый режим по кислороду и углекислому газу (пространственно-объемная модель); - тепловой режим (изменение температуры воздуха, пространственно-объемная модель); - влажностный режим (изменение влагосодержания в воздухе, пространственно-объемная модель).

Разработанная математическая модель позволила решить задачу по определению объема зеленого покрова растений $V_{\text{зел}}$, подвижности воздуха v , в помещении «зимнего сада» для обеспечения требуемого газового режима в помещениях административного здания по массовой концентрации CO_2 .

Третья глава диссертации посвящена решению задачи по расчету влажностного и газового режимов, создаваемых в помещении «зимнего сада» при организации схемы по восстановлению газового состава воздуха перемещаемого из административного здания в рециркуляционной схеме.

Для определения параметров влажностного режима, заданы следующие исходные данные: температура подаваемого воздуха из помещений административного здания, температура внутреннего воздуха «зимнего сада», температура поверхности почвы, температура поверхности листьев, температура наружного воздуха, средняя температура поверхности почвы, энтальпия внутреннего воздуха «зимнего сада», энтальпия воздуха подаваемого из помещений здания, температура мокрого термометра воздуха влажной зоны «зимнего сада», нормальное и фактическое барометрические давления, относительная влажность наружного воздуха и воздуха, подаваемого из административного здания. Для блока по определению параметров газового режима, заданы исходные данные: площадь административного здания, концентрация CO_2 в наружном воздухе, температура наружного воздуха, температура внутреннего воздуха подаваемого в «зимний сад» из здания, количество воздуха

подаваемого в «зимний сад» из здания, количество наружного воздуха подаваемого в «зимний сад».

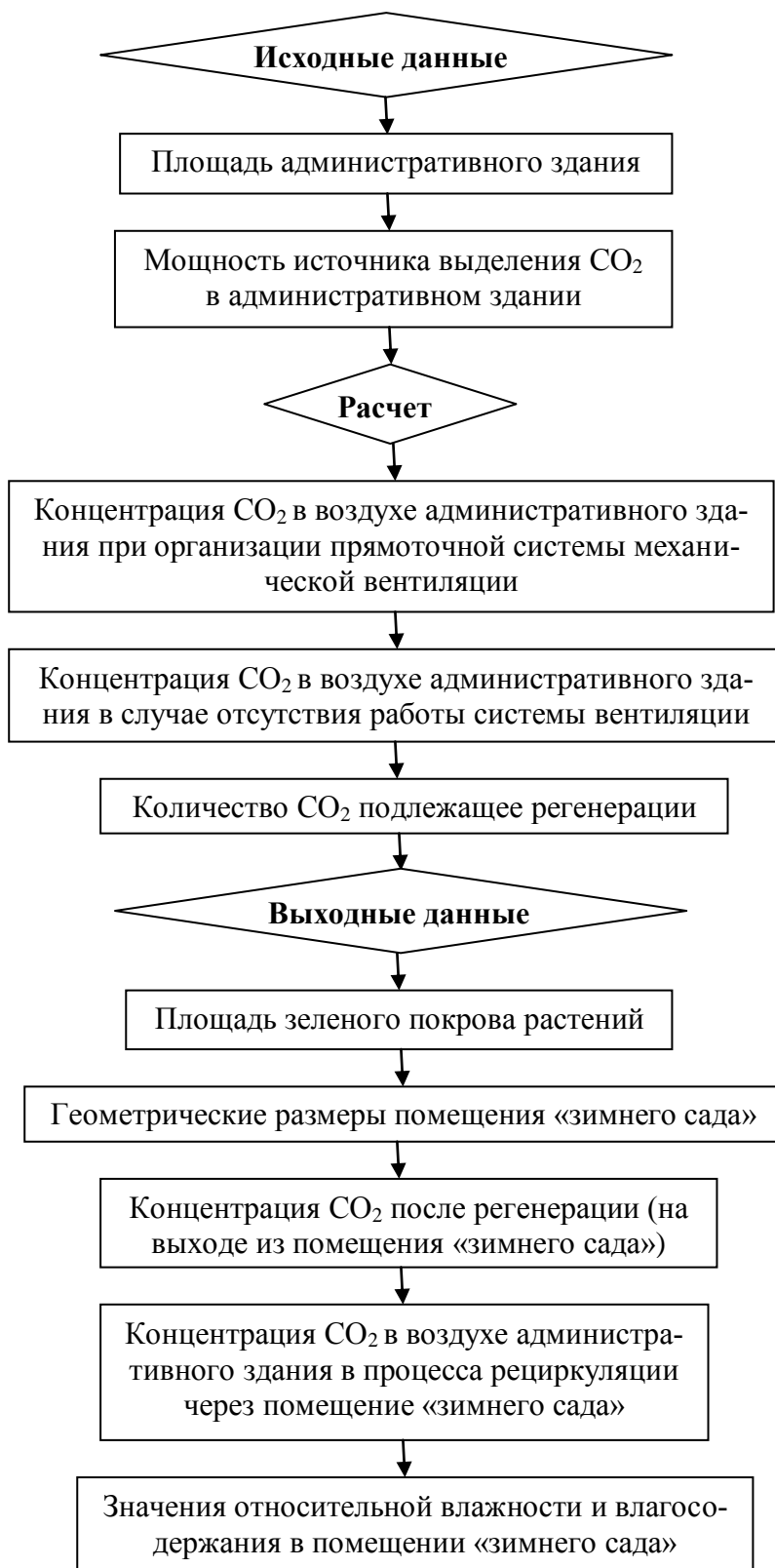


Рис. 4 Порядок расчета по программе при определении параметров влажностно - газового режима здания с «зимним садом».

В качестве выходных параметров при расчете по программе получаем:

- значение величины концентрации CO_2 в помещениях административного здания при организации прямоточной схемы системы вентиляции;
- значение величины концентрации CO_2 в помещениях административного здания в случае отсутствия работы системы вентиляции;
- значение величины концентрации CO_2 в помещениях административного здания в удаляемом воздухе, в случае организации системы рециркуляции воздуха;
- значение величины концентрации CO_2 в воздухе забираемого из «зимнего сада» и подаваемого в помещения административного здания;
- необходимую площадь зеленого покрова для регенерации воздуха по концентрации CO_2 и доведения ее до значений входящих в состав идеального воздуха;
- необходимую площадь зимнего сада и как следствие его геометрические размеры;
- количество водяного пара, выделяющегося с поверхности почвы;
- количество водяного пара, выделяющегося с поверхности листьев;
- значение относительной влажности и влагосодержания в забираемом воздухе из помещения «зимнего сада».

Последовательность расчета влажностно–газового режима здания с зимним садом представлена на рис. 4.

Созданная программа по расчету влажностно - газового режима административного здания с зимним садом позволяет моделировать параметры рециркуляционно-регенеративной системы вентиляции. Реализация математической модели влажностно-газового режима административного здания с зимним садом позволило получить размеры и площадь зеленых насаждений зимнего сада, в зависимости от размеров и количества работников административного здания.

Четвертая глава диссертации посвящена натурным исследованиям параметров микроклимата помещений административного здания и помещения «зимнего сада».

Первая часть эксперимента посвящена определению параметров микроклимата помещений «зимнего сада» и определению регенеративной мощности поверхности зеленого покрова растений по поглощению CO_2 , т.е. интенсивности фотосинтеза растений при данных параметрах микроклимата.

Для определения регенеративной мощности поглощения CO_2 поверхностью зеленого покрова растений M , $\text{мг}/(\text{м}^2 \times \text{ч})$, проведен эксперимент. В помещении «зимнего сада» и в составе наружного воздуха в течение суток измерялась массовая концентрация CO_2 . После этого с периодичностью в один час производилось проветривание помещения «зимнего сада» при помощи открытия дверей и фрамуг, по истечению часа они закрывались. Результаты эксперимента дали следующие результаты. В точке 0: $c_n = 0,67 \text{ г}/\text{м}^3$ – значение массовой концентрации CO_2 в составе наружного воздуха; $c_в = 0,38 \text{ г}/\text{м}^3$ – значение массовой концентрации CO_2 в составе внутреннего воздуха: в точке

1: $c_1 = 0,56 \text{ г/м}^3$ – значение массовой концентрации CO_2 в составе внутреннего воздуха после проветривания объема «зимнего сада»; в точке 2: $c_2 = 0,41 \text{ г/м}^3$ – значения массовой концентрации CO_2 в составе внутреннего воздуха «зимнего сада» по истечению часа после закрытия дверей и фрамуг; аналогичная серия замеров проведена для помещения «зимнего сада» в течение суток. Динамика изменения концентрации CO_2 на улице и в помещении «зимнего сада» в режиме проветривания и без него представлена на рисунке 5.

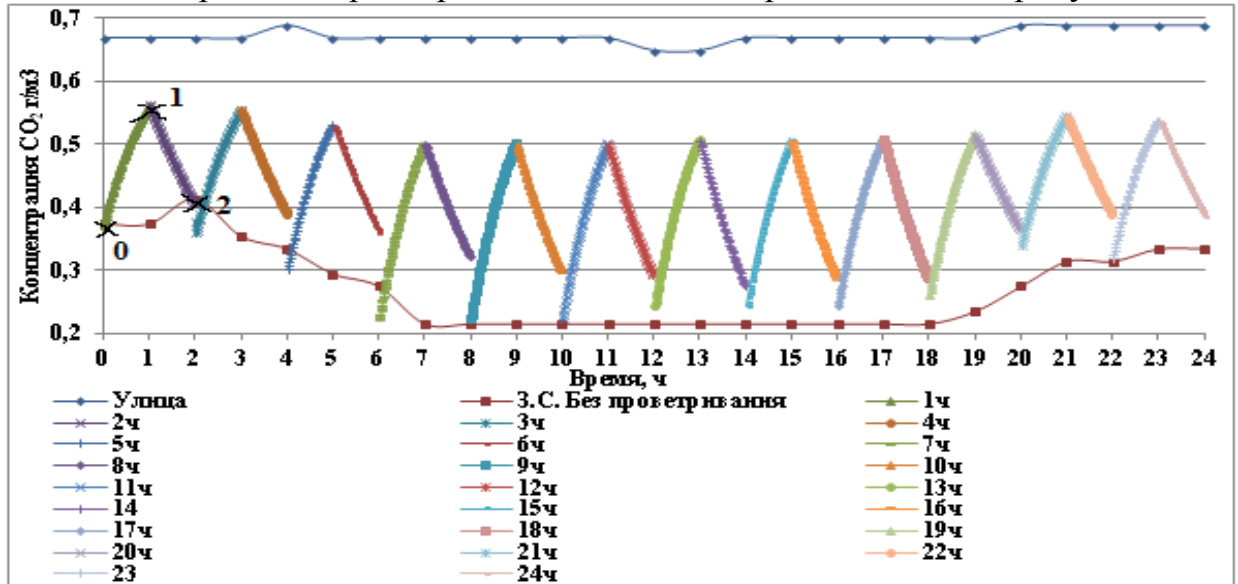


Рис. 5 Динамика изменения концентрации CO_2 на улице и в помещении фондовой оранжереи в режиме проветривания и без него.

Из полученных экспериментальных данных определена масса поглощенного CO_2 растениями в объеме «зимнего сада» по формуле (7) и регенеративная мощность поверхности зеленого покрова растений покрова по формуле (8).

$$m_{\text{CO}_2} = V_{\text{з.с.}} \times \Delta c, \quad (7)$$

где $V_{\text{з.с.}}$ – объем помещения «зимнего сада», м^3 ; Δc – разность массовой концентрации CO_2 между зонами 1 и 3, кг/м^3 (рис.3); m_{CO_2} – масса поглощенного углекислого газа, кг.

$$M = \frac{m_{\text{CO}_2}}{F_{\text{общ}} \times \tau}, \quad (8)$$

Отношение площади зеленого покрова растений $F_{\text{общ}}$, м^2 к объему регенеративной зоны «зимнего сада», т.е. объему зеленого покрова $V_{\text{зел}}$, м^3 определяется по формуле (9) и обозначается μ , $\text{м}^2/\text{м}^3$.

$$\mu = \frac{F_{\text{общ}}}{V_{\text{зел}}}, \quad (9)$$

где τ – время, ч; M – регенеративная мощность поверхности зеленого покрова по потреблению CO_2 , $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; $F_{\text{общ}}$ – площадь зеленого покрова растений «зимнего сада», м^2 ; $V_{\text{зел}}$ – объем зеленого покрова растений, м^3 .

По результатам измерений для помещения фондовой оранжереи $F_{\text{общ}} = 691 \text{ м}^2$, $V_{\text{зел}} = 1502 \text{ м}^3$.

Результаты, полученных в ходе эксперимента, и представленных на рис. 5 и расчетных значениях, показаны в табл. 1, где видно, что максимальное поглощение CO_2 поверхностью зеленого покрова растений приходится на интервал с 7 до 18 часов и составляет в среднем $15 \text{ мг}/(\text{дм}^2 \cdot \text{ч})$.

Таблица 1. Интенсивность поглощения CO_2 поверхностью зеленого покрова растений.

τ , ч	m_{CO_2} , кг	M , $\text{мг}/(\text{дм}^2 \cdot \text{ч})$	M , $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$	τ , ч	m_{CO_2} , кг	M , $\text{мг}/(\text{дм}^2 \cdot \text{ч})$	M , $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$
1-2	0,143	2,1	0,00021	13-14	1,087	15,7	0,00157
2-3	0,382	5,5	0,00055	14-15	1,052	15,2	0,00152
3-4	0,622	9,0	0,00090	15-16	1,017	14,7	0,00147
4-5	0,748	10,8	0,00108	16-17	1,008	14,6	0,00146
5-6	0,874	12,7	0,00127	17-18	0,999	14,5	0,00145
6-7	0,931	13,5	0,00135	18-19	0,809	11,7	0,00117
7-8	0,989	14,3	0,00143	19-20	0,619	9,0	0,00090
8-9	1,023	14,8	0,00148	20-21	0,555	8,0	0,00080
9-10	1,057	15,3	0,00153	21-22	0,492	7,1	0,00071
10-11	1,063	15,4	0,00154	22-23	0,385	5,6	0,00056
11-12	1,069	15,5	0,00155	23-24	0,278	4,0	0,00040
12-13	1,078	15,6	0,00156				

На рис. 6 представлена экспериментально полученная зависимость интенсивности поглощения CO_2 от времени измерения в течение суток, а также аналогичные данные, представленные в работе Егиазарова А.Г.

Вторая часть эксперимента посвящена определению параметров микроклимата внутреннего воздуха административного здания и сопоставления их с результатами, рассчитанными по разработанной программе, представленной в 3 главе настоящей работы. Замеры производились в административном здании с работающей приточной системой вентиляции, результатом эксперимента являются полученные значения относительной влажности, температуры и массовой концентрации CO_2 в воздухе. Полученные значения массовой концентрации CO_2 сопоставлены с результатами расчета программы и представлены на рис. 7. На графике видно, что экспериментальные данные имеют меньшее значение по отношению к результату расчета программы для приточной схемы и большее чем результаты для регенеративной схемы по восстановлению газового состава воздушной среды. Таким образом, результаты эксперимента подтвердили адекватность работы программы по расчету влажностного и газового режима.

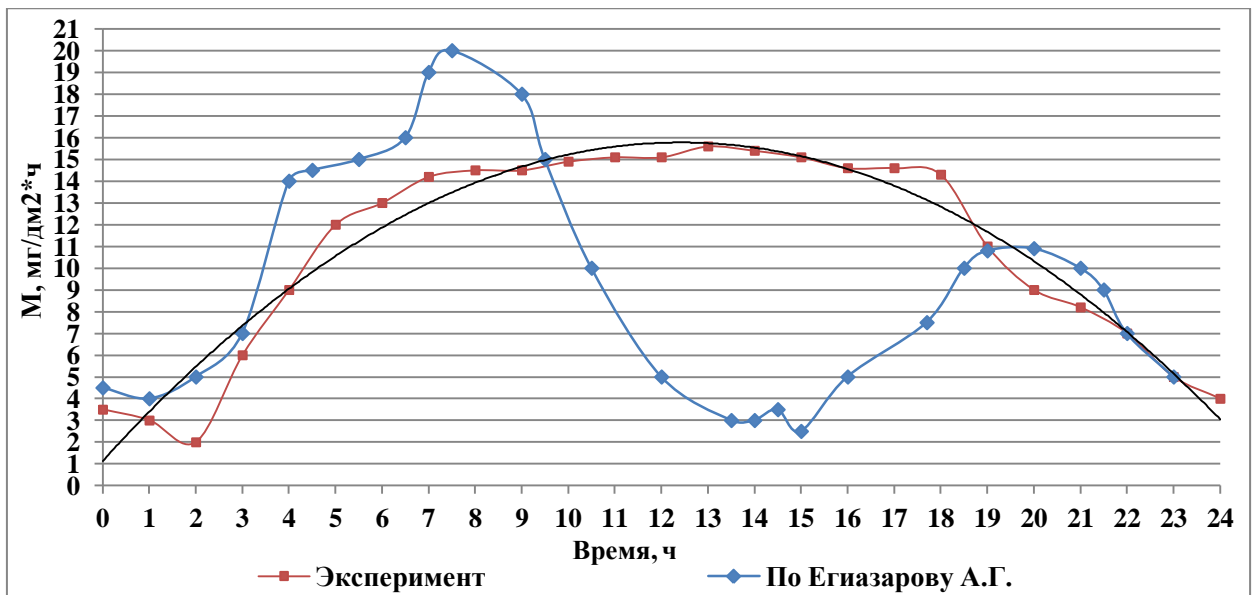


Рис. 6 Интенсивность поглощения CO_2 в течение суток.

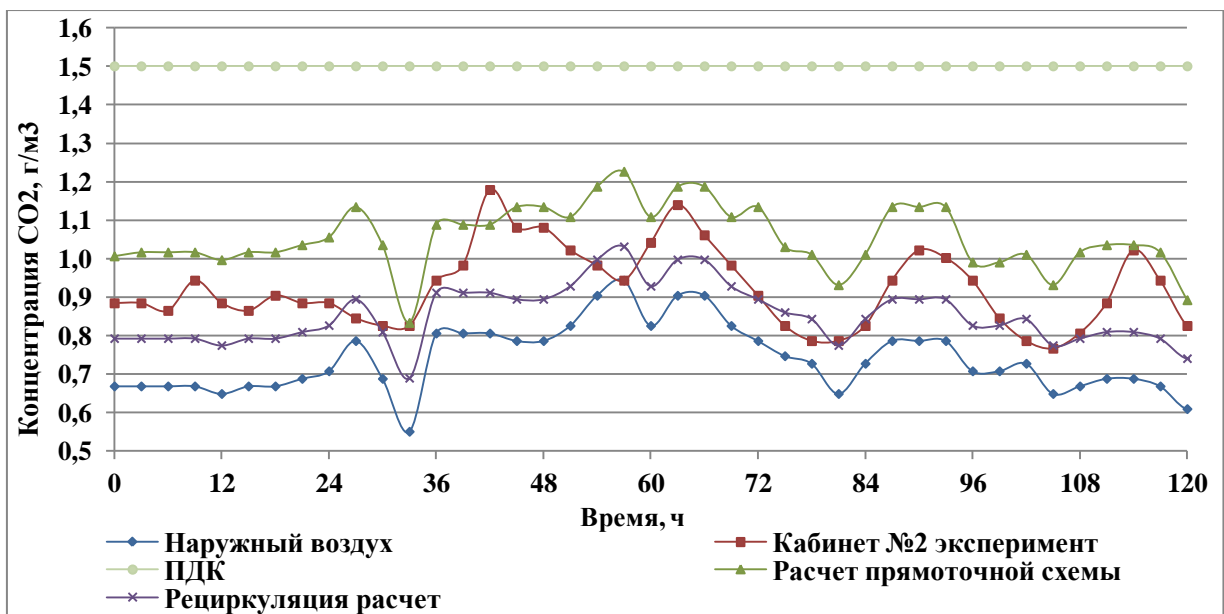


Рис. 7 Динамика изменения концентрации CO_2 .

Пятая глава диссертации посвящена моделированию газового, теплового и воздушного режимов по высоте помещения зимнего сада (рис. 8) с помощью программы ANSYS-CFX, а также анализу экономической эффективности рециркуляционно - регенеративной системы вентиляции по восстановлению газового состава воздушной среды и экономической оценки данного мероприятия.

Математическое моделирование процессов теплообмена в помещении «зимнего сада» проведено с учетом следующих ограничений:

1. Задача решена в стационарной двумерной постановке;
2. Рассмотрено ламинарное неизотермическое течение воздуха в помещении объема «зимнего сада»;

3. Теплообмен в помещении происходит путем естественной и вынужденной конвекции с учетом влияния архимедовых сил по отношению к CO_2 .

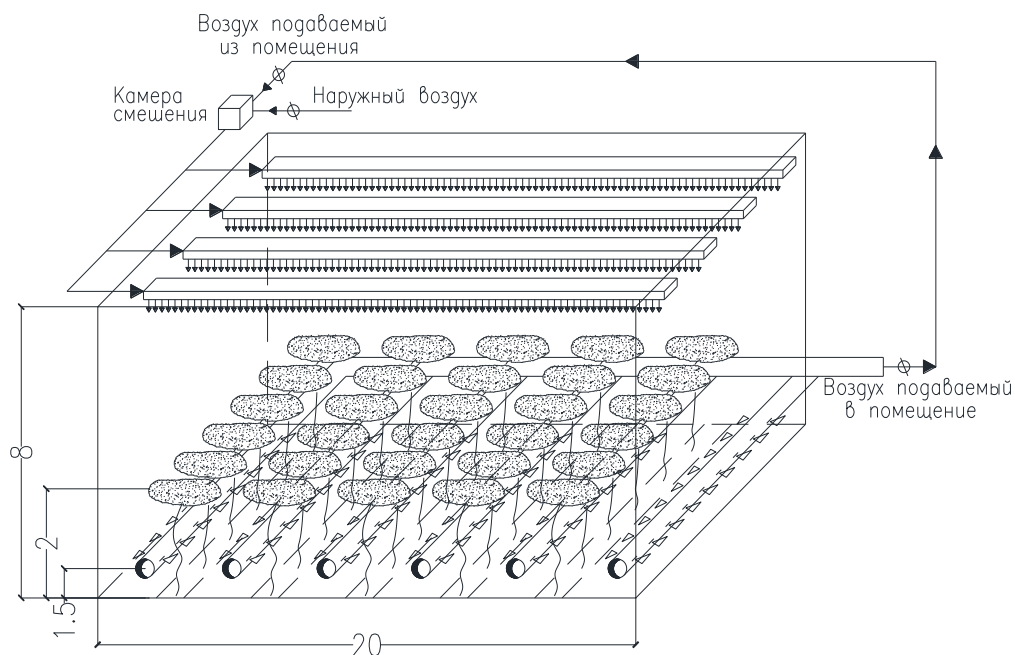


Рис. 8 Схема организации рециркуляции воздуха в объеме помещения «зимнего сада».

Неизотермическое движение воздуха в помещении описывается системой уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеску в переменных функции тока ψ и вихря скорости ω .

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0, \quad (11)$$

На рис. 9, 10 при помощи программы ANSYS-CFX по результатам расчета построены диаграммы и графики распределения температуры и концентрации CO_2 по высоте помещения «зимнего сада», визуально показывающие поведение изучаемых параметров воздушной среды при заданных начальных и граничных условиях при математическом моделировании.

Капитальные затраты для устройства приточной и регенеративной систем вентиляции на стадии разработки инвестиционного проекта можно оценить по формуле (12), руб.:

$$K_{\text{вент}} = \sum C_{\text{вент}} \times L, \quad (12)$$

где L – расход воздуха системы вентиляции, тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$; $\sum C_{\text{вент}}$ – сумма удельной стоимости расходов основных составляющих сметной стоимости системы, отнесенной к 1 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$.

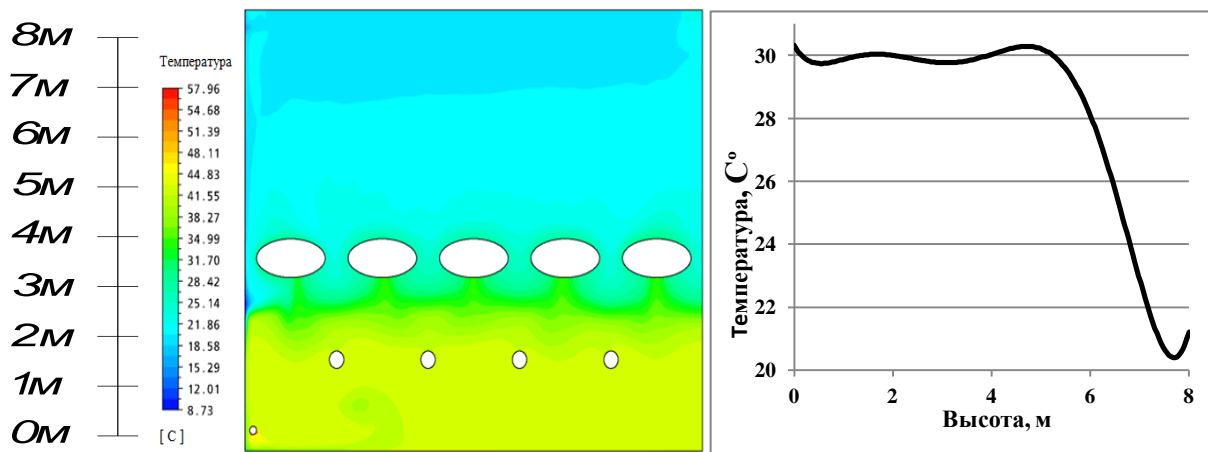


Рис. 9 Векторная диаграмма и график распределения температуры воздуха по высоте «зимнего сада».

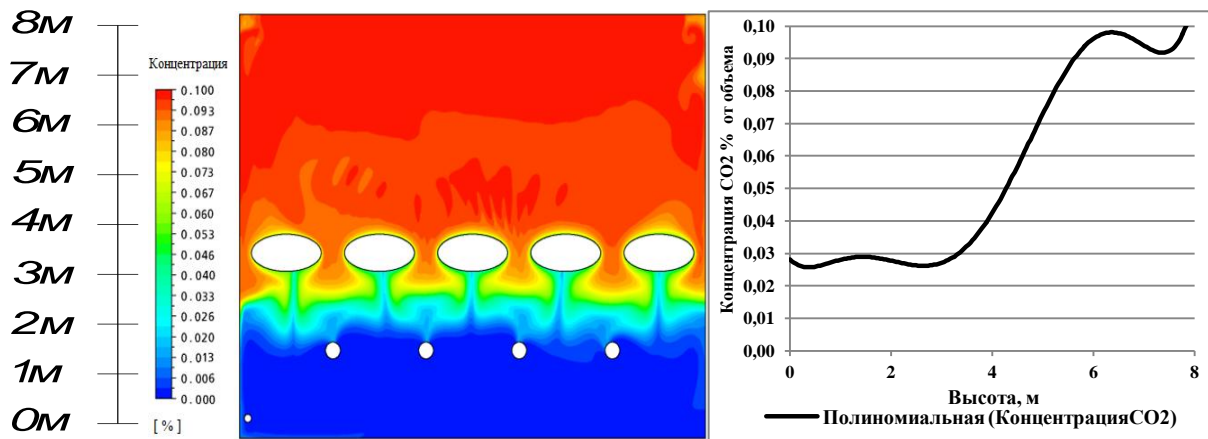


Рис. 10 Векторная диаграмма и график распределения концентрации CO_2 в воздухе по высоте «зимнего сада».

Согласно рыночной стоимости, капитальные затраты на строительство «зимнего сада» вычисляются по формуле (13).

$$K_{\text{стр.з.с.}} = S \times n_1, \text{ руб} \quad (13)$$

где S - площадь «зимнего сада», м^2 ; n_1 - стоимость строительства 1 м^2 площади, руб.

Капитальные затраты на посадку зеленых насаждений «зимнего сада» вычисляется по формуле (14).

$$K_{\text{нос.з.с.}} = S \times n_2 \times v, \text{ руб} \quad (14)$$

где n_2 - стоимость посадки растений на 1 м^2 площади почвы, руб.; v - коэффициент учитывающий отношение площади пола «зимнего сада» к площади почвы.

Затраты, связанные с потреблением электроэнергии системой вентиляции, вычисляются по формуле (15):

$$\mathcal{E}_{\text{эл.вент}} = Z_p \times N_{\text{раб}} \times N_{\text{уст.вент}} \times C_{\text{эл}}, \text{ руб./год} \quad (15)$$

где Z_p – продолжительность работы вентиляционного оборудования в течение суток, час; $N_{раб}$ – количество рабочих дней в году; $N_{уст.вент.}$ – установочная мощность оборудования электродвигателей вентиляторов, кВт; $C_{эл.}$ – стоимость электроэнергии, руб./кВт×ч).

Затраты связанные с потреблением электроэнергии потраченной на освещение, вычисляются по формуле 16:

$$\mathcal{E}_{эл.вент} = Z_{осв} \times N_{раб} \times N_{уст.осв.} \times C_{эл.}, \text{ руб./год}, \quad (16)$$

где $Z_{осв}$ – продолжительность работы ламп освещения в течение суток, час; $N_{раб}$ – количество рабочих дней в году; $N_{уст.осв.}$ – установочная мощность ламп освещения, кВт; $C_{эл.}$ – стоимость электроэнергии, руб./кВт×ч).

Затраты связанные с потреблением тепловой энергии системой вентиляции и отопления, вычисляется по формуле (17):

$$\mathcal{E}_{тепл} = Z_p \times N_{от.пер.} \times Q_{ном.} \times C_{тепл.}, \text{ руб./год}, \quad (17)$$

где Z_p – продолжительность работы вентиляционного оборудования в течение суток, час; $N_{от.пер.}$ – количество дней отопительного периода; $Q_{ном.}$ – тепловая мощность воздухонагревателя отнесенная к средней температуре отопительного периода, Гкал; $C_{тепл.}$ – стоимость тепловой энергии, руб./Гкал.

Необходимые средства на заработную плату квалифицированным сотрудникам обслуживающим помещение «зимнего сада» вычисляются по формуле (18):

$$\mathcal{E}_{зарп} = 12 \times a \times n_3, \quad (18)$$

где a – количество сотрудников, чел.; n_3 – заработная плата сотруднику, руб./мес.

При не учете экологической оценки данный инвестиционный проект является некупаемым, так как эксплуатационные затраты на рециркуляционную схему превышают затраты отнесенные на организацию прямоточной схемы, с учетом современной кредитной политики.

Ориентировочные потери от загрязненного воздуха, от заболеваемости и от снижения производительности труда не менее 3%, или для рассматриваемого административного здания ориентировочно потери составляют не менее 1850000 руб./год.

Тогда срок окупаемости данного инвестиционного проекта с учетом экологического эффекта равен:

$$T_{ок} = \frac{\Delta K}{\mathcal{E}_{прям.} - \mathcal{E}_{рецирк}} = \frac{7693658}{(451711 + 1850000) - 1455800} = 9 \text{ лет}, \quad (19)$$

Окупаемость рециркуляционно - регенеративной системы вентиляции с зимним садом нужно оценивать с учетом экологического аспекта пребывания

человека в помещении, где человек работает с определенной производительностью труда, которая снижается при заболеваемости, что часто определяется газовым составом воздуха, улучшение параметров которого ведет к росту прибыли организации (компании).

Основные выводы:

1. Разработана рециркуляционно-регенеративная схема системы вентиляции административного здания с зимним садом, позволяющая реализовать понижение концентрации CO_2 и повышение концентрации O_2 в объеме помещений административного здания в процессе рециркуляции его через помещение зимнего сада, что кардинально отличается от существующих схем систем вентиляции административных зданий.
2. Разработана математическая модель для анализа динамики газового, влажностного режимов в помещении «зимнего сада» и административного здания которая позволила реализовать рециркуляционно - регенеративную систему вентиляции с контролем изменения параметров микроклимата и газового состава внутреннего воздуха.
3. Анализ результатов моделирования газового, влажностного, воздушного и теплового режимов позволил выявить характер изменения массовой концентрации углекислого газа, температуры и скорости движения воздуха по высоте помещения «зимнего сада», что позволило определить расположение «нейтральной плоскости», в которой сочетание параметров микроклимата и рассматриваемых параметров газового режима идеальное, для подачи регенерированного воздуха в помещения административного здания.
4. Полученные результаты натурных исследований параметров микроклимата и газового состава воздуха в административном здании и помещении зимнего сада сопоставимы с расчетами по разработанной программе и подтверждают адекватность разработанной математической модели динамических тепломассообменных режимов при работе рециркуляционно-регенеративной системы вентиляции, процент расхождения при этом не превышает 15 %.
5. Предложенная математическая модель регенеративной системы вентиляции административного здания с «зимним садом» позволила определить необходимый расход рециркуляционного воздуха регенеративной системы вентиляции, а также площадь (объем) помещения зимнего сада и зеленых насаждений, в зависимости от площади (объема) административного здания и интенсивности его заполнения людьми.

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях.

1. Савичев В.В., Рымаров А.Г. "Особенности формирования газового режима помещения при работе источника газового выделения в зависимости от воздухопроницаемости наружных ограждений" - Вестник МГСУ, спецвыпуск 1/2009, с. 482-485.

2. Савичев В.В., Рымаров А.Г. "Особенности изменения концентрации углекислого газа в помещении кухни при различных системах вентиляции". - Вестник МГСУ, спецвыпуск 2/2009, с. 312-315.
3. Савичев В.В., Рымаров А.Г. "Особенности формирования газового режима здания с зимним садом". Материалы IV Международной научной конференции «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды», Волгоград 14-18 мая 2008 года, ВолгГАСУ, 2008, сс.84 - 88.
4. Савичев В.В., Рымаров А.Г. " Влияние воздухопроницаемости окон и стен жилых зданий на концентрацию углекислого газа в помещении кухни жилого здания при сжигании природного газа". Сборник докладов научно-технической конференции «Современные фасадные системы: эффективность и долговечность», 21 ноября 2008 года, Москва, МГСУ, 2008, сс.110 - 112.
5. Савичев В.В., Рымаров А.Г. " Особенности формирования газового режима помещения, при работе источника газового выделения, в зависимости от воздухопроницаемости наружных ограждений". Научные труды Двенадцатой Международной межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, докторантов и аспирантов «Строительство-формирование среды жизнедеятельности», Москва 15-22 апреля 2009 года, МГСУ, сс. 608-611.
6. Савичев В.В., Рымаров А.Г. " Особенности изменения концентрации углекислого газа в помещении кухни жилого здания при сжигании природного газа". Материалы третьей Международной научно-практической конференции «Теоретические основы теплогасоснабжения и вентиляции». 21-23 ноября 2009, МГСУ Москва, сс. 215-217.

Условные обозначения

Q - тепловой поток, Вт; t - температура, °С; φ – относительная влажность воздуха, %; d – влагосодержание, г/кг сухого воздуха; ρ - плотность воздуха, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); V - объем, м³; v – подвижность воздуха, м/с; G - массовый расход воздуха, кг/ч; L – объемный расход воздуха, м³/ч; τ - время, ч; F - площадь, м²; M - мощность источника выделения вредных веществ, кг/ч; M – регенеративная мощность поглощения СО₂ поверхностью зеленого покрова растений, мг/м²×ч; m_{CO_2} – масса поглощенного углекислого газа, кг; Δm_{CO_2} - изменение массы углекислого газа в единицу времени, кг/ч; μ – отношение площади зеленого покрова к ее объему, м²/м³; Kp - кратность воздухообмена помещения, ч⁻¹; Δ - разность величин; c – массовая концентрация, кг/м³; D - коэффициент диффузии, м²/с; c_v - удельная теплоемкость, кДж/(кг·К); ν_t – кинематическая вязкость, м²/с; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К; l – определяющий размер, м; P – парциальное давление, Па; β – коэффициент массообмена, м/ч; Δx - толщина слоя, м; W – количество водяного пара, кг/ч; Nu – диффузионный критерий Нусельта; Re – модифицированный критерий Рейнольдса; Ar – критерий Архимеда; Pr - диффузионный коэффициент Прандтля.