

## **Отзыв официального оппонента**

доктора технических наук Сулина Александра Борисовича  
на диссертацию Денисихиной Дарьи Михайловны  
«Научные основы математического моделирования воздухообмена и  
воздухораспределения в общественных зданиях»,  
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 2.1.3. – Теплоснабжение, вентиляция,  
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

### **Актуальность темы диссертации**

В диссертационном исследовании разрабатываются научные основы постановки и решения численными методами задач обеспечения качества воздуха и параметров микроклимата, воздухообмена и воздухораспределения в общественных зданиях в условиях сложных смешанно-конвективных вентиляционных течений. Актуальность исследования определяется современным уровнем развития вычислительных мощностей, что позволяет применить методы численного моделирования для получения данных о распределении воздушных потоков, температуры, концентрации по объему помещения, в том числе для сложных вентиляционных течений, обусловленных одновременным воздействием естественной и вынужденной конвекции.

### **Новизна исследования и полученных результатов диссертации**

В работе разработаны научные основы для решения задач вентиляции различных типов помещений общественных зданий на основе решения уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу. Влияние радиационного фактора на формирование параметров микроклимата в объеме помещений общественных зданий рассмотрено с позиций введения упрощающих допущений для экономии вычислительных ресурсов без ущерба в точности моделирования. Также для экономии вычислительных ресурсов обоснованы упрощенные модели тела человека, как одной из основных составляющих тепловлажностной нагрузки в помещениях с массовым пребыванием людей. Впервые выполнена классификация условий формирования параметров микроклимата в помещениях большого объема при совместном действии тепловых источников и вентиляционных потоков.

Результаты многочисленных вычислительных экспериментов обобщены в виде универсальных зависимостей для расчета изменения параметров воздуха по высоте объектов в безразмерном виде. Данные зависимости имеют большую практическую ценность при выполнении инженерных расчетов эффективности систем вентиляции.

### **Значимость для науки и практики полученных результатов**

С научной и практической точек зрения можно выделить следующие наиболее значимые положения:

- для расчетов воздухообмена и воздухораспределения в помещениях общественных зданий с массовым пребыванием людей обоснованы полуэмпирические модели турбулентности и разработаны граничные условия;

- для выбора наиболее рационального варианта организации воздушного режима разработаны научные основы для анализа проектных решений по организации воздухообмена и воздухораспределения в зданиях разного назначения;

- уточнены коэффициенты воздухообмена по температуре и концентрации  $\text{CO}_2$  для зрительных залов и крытых ледовых арен;

- определены закономерности пространственно-временного распределения параметров микроклимата на стадии разработки проектных решений;

- для обеспечения уменьшения типоразмеров оборудования и снижение энергопотребления обоснована целесообразность функционирования вентиляционного оборудования в нестационарном режиме.

### **Обоснованность и достоверность основных положений, результатов и выводов диссертации**

Методологической основой диссертационного исследования являются основные положения теории тепломассообмена и аэродинамики, вентиляции в помещениях, методы математической статистики планирования эксперимента, теория численного моделирования неизотермических турбулентных течений. При этом область исследования соответствует требованиям п. 1 и п. 4 паспорта научной специальности ВАК 2.1.3 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение.

## **Оценка содержания диссертации, ее завершенности в целом, замечания по оформлению**

Диссертационная работа структурно оформлена в виде введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений.

Первые две главы представляет собой квалифицированно выполненный обзор современного научно-информационного поля в области методов расчета воздухообмена и воздухораспределения, а также в области теоретических основ моделирования вентиляционных процессов. Подробно рассмотрены приближенные и «точные» модели, а также особенности расчета при обеспечении условий комфорта. Особое внимание уделено наиболее значимому разделу вычислительной гидродинамики – моделированию турбулентности.

Третья глава диссертации является наиболее значимой по научному наполнению. Поскольку работа практически ориентирована на здания с массовым пребыванием людей, автор правомерно начинает с анализа человеческого фактора на закономерности формирования микроклимата. Радиационный фактор теплообмена, который является одним из наиболее сложно учитываемых для помещений со сложной конфигурацией, подробно проанализирован и промоделирован с допущениями различной степени упрощения. Рассмотрены системы постановочного освещения, светопрозрачные ограждения, системы напольного охлаждения и фактор ледовой арены. Результаты исследований обобщены в виде классификации условий формирования параметров микроклимата в помещениях общественных зданий.

Материал, изложенный в четвертой главе, посвящен сравнительному анализу результатов вычислительного моделирования с применением различных моделей турбулентности и результатов натурального эксперимента и вычислениями по известным математическим моделям. Данный сравнительный анализ и верификация результатов вычислительного моделирования убедительно демонстрирует достаточную точность вычислений.

Пятая глава диссертации описывает результаты численных расчетов и анализ закономерностей распределения параметров воздуха в ледовой арене при различных схемах организации воздухообмена. Показана зависимость параметров микроклимата, особенно над ледовым полем, от способа подачи приточных струй, их взаимодействия с общим циркуляционным течением в объеме арены, создаваемым свободно-конвективными потоками от массива зрителей, радиационного теплообмена между ледовой поверхностью и

ограждающими конструкциями. Кроме того, выполнены расчеты параметров микроклимата в объеме чаши 5 ледовых арен, отличающихся объемом, высотой помещения, температурой льда, кратностью воздухообмена, схемой подачи приточного воздуха и количеством зрителей. Серия расчетов выполнена также для зрительных залов и бассейнов. Важно отметить, что автором выполнена обработка результатов в безразмерном виде, что позволило получить удобные для инженерных расчетов аппроксимационные зависимости для ледовых арен с различными проектными решениями.

В завершающей шестой главе выполнено убедительное экономическое обоснование применения численных методов при проектировании систем вентиляции. Выполнено экономическое сравнение стоимости проектно-исследовательских работ при решении вопросов отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха при строительстве многофункциональной ледовой арены. Показано, что ожидаемый экономический эффект от внедрения численного моделирования по одному объекту ориентировочно составит 7 млн. руб.

Представленная для оппонирования диссертационная работа является логично выстроенным завершенным научным исследованием. Основные результаты диссертационной работы опубликованы автором в научной печати. Содержание автореферата отражает основные положения диссертации. Работа хорошо структурирована и аккуратно оформлена.

### **Вопросы и замечания**

1. В работе приведены результаты расчетов индекса теплоощущений PMV, выполненные по специально написанной процедуре для каждой расчетной ячейки CFD модели. Несмотря на то, что данные расчеты представляют определенный вычислительный интерес, следует отметить, что предложенный Фангером индекс по физическому смыслу является интегральным показателем для всей поверхности тела человека. В этой связи целесообразно было бы вычислять PMV для того пространства, которое занимает тело человека.
2. В развитие предыдущего замечания отмечу, что классический индекс PMV, описанный в стандарте ISO 7730, в настоящее время многократно модифицировался с учетом адаптивного фактора терморегуляции, отнесенного к состоянию наружного климата. Особенно это касается так называемых транзитных помещений с относительно кратковременным

- пребыванием людей, которые как раз рассматриваются в диссертационной работе.
3. Представленные в работе результаты вычисления концентрации CO<sub>2</sub> указывают, что концентрация в приточном воздухе принималась равной нулю. В то же время концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере составляет от 300 (природа) до 450 ppm (мегаполис).
  4. В разделе диссертации, посвященной расчетно-экспериментальному исследованию микроклимата в помещении с охлаждаемым потолком, не указано закладывались ли в расчет ограничения, связанные с возможным влаговыведением.
  5. Каким образом учитывалось наличие или отсутствие верхней одежды у зрителей при расчете параметров систем вентиляции?

### Заключение

Диссертационная работа Денисихиной Дарьи Михайловны «Научные основы математического моделирования воздухообмена и воздухораспределения в общественных зданиях» соответствует требованиям п. 9 Положения ВАК о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а соискатель заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора технических наук по специальности 2.1.3. – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение.

Официальный оппонент  
профессор образовательного центра  
«Энергоэффективные инженерные системы»  
ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский университет ИТМО»  
доктор технических наук

  
27.05.25

Сулин Александр  
Борисович

Почтовый адрес: 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, д. 9,  
каб. 1205. Тел.: +7 (812) 480-06-55. Эл. почта: [absulin@itmo.ru](mailto:absulin@itmo.ru)

Подпись Сулина А.Б.  
удостоверяю  
Менеджер ОПС  
Пономарева О.В.

