

На правах рукописи

КОЧАРЬЯНЦ КРИСТИНА ВЛАДИМИРОВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ПОМЕЩЕНИЯХ СТЕСНЕННЫМИ
СТРУЯМИ**

Специальность: **05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование
воздуха, газоснабжение и освещение**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: **Денисихина Дарья Михайловна**
кандидат физико-математических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Аверкова Ольга Александровна**
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный
технический университет им. В.Г. Шухова»,
кафедра теплогазоснабжения и
вентиляции, профессор;

Зиганшин Арслан Маликович
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет»,
кафедра теплоэнергетики, газоснабжения и
вентиляции, доцент.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**», Санкт-Петербург, 195251, ул. Политехническая, д. 29, office@spbstu.ru, 8 (812) 775-05-30, <http://www.spbstu.ru/>.

Защита диссертации состоится «25» декабря 2018 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.06 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219), тел. 8(812) 316-58-72, e-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/kocharyanc-kristina-vladimirovna>.

Автореферат разослан «25» октября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент

Виктор Алексеевич Пухкал

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность выбранной темы.

Расчет воздухораспределения является одним из этапов проектирования систем вентиляции и кондиционирования воздуха, который направлен на обеспечение нормативных требований, предъявляемых к воздушной среде.

В общественных и производственных помещениях широко используется схема воздухораспределения горизонтальными стесненными струями. При этом параметры микроклимата в рабочей зоне в значительной степени зависят от характеристик обратного потока.

Существующие методики расчета воздухораспределения стесненной струей не учитывают влияние высоты установки воздухораспределительного устройства и его конструкции.

Известные в литературе данные относятся к исследованиям стесненной струи при подаче воздуха из воздухораспределителей простой геометрической формы (отверстий). В настоящее время в проектно-конструкторской практике широко используются воздухораспределители геометрически сложной формы: с турбулизирующими ячейками, с многослойной перфорацией, многосопловые, многодиффузорные, с профилированными лопатками, комбинированные и др. Условия формирования потока при истечении из воздухораспределителей сложных конструкций мало изучены. Отсутствуют данные по влиянию конструктивных решений воздухораспределителей на параметры приточной струи и характеристики обратного потока.

Таким образом, проведение исследований, направленных на совершенствование методов расчета воздухораспределения в помещениях стесненными струями является актуальной научной и важной практической задачей.

Степень разработанности темы исследования.

Теоретической базой исследования послужили работы отечественных и зарубежных ученых: Г.Н. Абрамовича, В.В. Батурина, В.А. Бахарева, В.К. Бридько, Г.А. Глебова, Р.Н. Гобзы, А.М. Гримитлина, М.И. Гримитлина, А.И. Гусака, Т.А. Дацюк, Ю.Р. Кареевой, М.Г. Кталхермана, Б.М. Павлова, Г.М. Позина, С.В. Полякова, В.Н. Посохина, В.Н. Розенберга, Н.Н. Садовской, М.Д. Тарнопольского, В.Р. Таурита, В.Н. Трояновского, В.М. Уляшевой, В.И. Ханжонкова, Я.И. Харитонова, Н.Д. Черепнина, В.А. Черных, И.А. Шепелева, Р.Н. Шумилова, Т. Karimiparah, P. Nielsen и других.

Цели и задачи работы. Целью работы является совершенствование методов расчета воздухораспределения в помещениях стесненными струями.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи исследования:

- анализ закономерностей развития приточных струй, формируемых геометрически сложными воздухораспределительными устройствами;
- уточнение методики расчета кинематического коэффициента для воздухораспределителей сложной конструкции;

- уточнение схемы развития обратного потока в помещениях численными методами;
- выполнение численных исследований воздухораспределения стесненными струями при различной высоте установки приточного устройства;
- выполнение серии экспериментальных исследований воздухораспределения стесненными струями для различных конструкций воздухораспределительных устройств;
- получение расчетных зависимостей для определения максимальной скорости обратного потока для разных условий формирования обратного потока.

Научная новизна работы:

- установлено, что для современных геометрически сложных воздухораспределителей значение кинематического коэффициента не является постоянной величиной по длине основного участка струи;
- доказано, что наличие участка формирования приточной струи приводит к переменным значениям кинематического коэффициента;
- предложена методика для расчета модифицированного кинематического коэффициента, который имеет постоянную величину на основном участке струи;
- уточнена схема развития обратного потока в помещениях;
- установлен диапазон изменения максимальной скорости в обратном потоке при изменении высоты установки приточного устройства;
- выявлено влияние темпа затухания приточной струи, характеризуемого кинематическим коэффициентом воздухораспределительного устройства, на максимальную скорость в обратном потоке;
- усовершенствован метод расчета воздухораспределения в помещениях стесненными струями, в частности получена обобщенная зависимость для определения максимальной скорости в обратном потоке.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- разработанная методика определения модифицированного кинематического коэффициента позволяет более достоверно выполнить расчет воздухораспределения приточными струями, истекающими из современных геометрически сложных воздухораспределительных устройств;
- усовершенствованный метод определения параметров обратного потока позволяет повысить точность инженерных расчетов при проектировании воздухораспределения стесненными струями;
- предложена и доказана возможность использования упрощенных граничных условий при численном моделировании;
- обосновано применение численного моделирования при изучении воздухораспределения в помещениях различного назначения и при разработке новых приточных устройств;
- методика, разработанная на основе усовершенствованного метода расчета воздухораспределения в помещениях стесненными струями, включена в редакцию № 1 СП 60.13330.2016 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» (Акт внедрения от 26.06.2018 г. АО «ЦНИИПромзданий») и заложена в

основу компьютерной программы ComfortAir (Акт внедрения от 18.06.2018 г. ООО «Арктос»).

Методология и методы исследования. Исследовательская часть диссертационной работы проводилась на экспериментальных стендах завода «Арктос», а также методом численного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS CFX. Для обработки полученных результатов использовался метод планирования эксперимента.

На защиту выносятся:

- изменение кинематического коэффициента по длине основного участка струи для геометрически сложных воздухораспределительных устройств;
- методика определения модифицированного кинематического коэффициента при испытаниях новых воздухораспределительных устройств;
- уточненная схема развития обратного потока в помещениях;
- зависимость скорости в обратном потоке от высоты установки воздухораспределителя;
- зависимость максимальной скорости в обратном потоке от кинематического коэффициента воздухораспределительного устройства;
- усовершенствованный метод расчета воздухораспределения в помещениях стесненными струями.

Область исследования соответствует паспорту специальности 05.23.03 – «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение», а именно п. 3 «Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения, освещения, защиты от шума».

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследования подтверждается использованием фундаментальных положений теории аэродинамики вентиляции и методов математического анализа с применением современного программного обеспечения; результатами натурных исследований; высокой сходимостью результатов численных расчетов с данными, полученными экспериментальным путем.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- 69-ой межвузовской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства», 2016 г., г. Санкт-Петербург;
- IX Международном конгрессе «Энергоэффективность. XXI век. Инженерные методы снижения энергопотребления зданий», 2015 г., г. Санкт-Петербург;
- 70-ой межвузовской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства», 2017 г., г. Санкт-Петербург.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 6 научных работах, общим объемом 3,2 п.л., в том числе 3 в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК, и 1 в рецензируемом издании из базы данных Scopus.

Реализация результатов работы.

Методика расчета воздухораспределения стесненными струями включена в:

- редакцию №1 СП 60.13330.2016 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» (Акт внедрения от 26.06.2018 г. АО «ЦНИИПромзданий»);
- Указания по расчету и применению воздухораспределителей завода «Арктос» (Акт внедрения от 18.06.2018 г.);
- программу ComforAir (Акт внедрения от 18.06.2018 г.);
- практику инженерного проектирования компаний «Арктика» (Справка от 20.06.2018 г.) и «ММ-Технологии» (Справка от 14.06.2018 г.).

Методика определения модифицированного кинематического коэффициента внедрена в практику аэродинамических испытаний воздухораспределителей на заводе «Арктос» (Акт внедрения от 18.06.2018 г.).

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация изложена на 148 страницах основного печатного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения и включает 96 источников библиографического списка и 3 приложений. В работе представлено 49 рисунков и 30 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель работы и задачи исследования, приведены научная новизна диссертации и положения, выносимые на защиту, описаны методы исследования, практическая ценность и сведения об апробации научных результатов.

В первой главе выполнен анализ существующих методов расчета воздухораспределения стесненными струями.

Во второй главе определены параметры и модель турбулентности для численных исследований на основании сравнения результатов натуральных испытаний и численного моделирования различных струйных течений, формируемых тремя видами воздухораспределителей.

В третьей главе представлены результаты натуральных и численных исследований струй, истекающих из воздухораспределителей сложных конструкций, которые позволили выявить причину и диапазоны изменения кинематического коэффициента. Предложено и обосновано использование модифицированного кинематического коэффициента, разработана методика расчета.

В четвертой главе представлены результаты исследований развития стесненной струи и обратного потока в зависимости от продольного стеснения, высоты установки воздухораспределителя, положения вытяжного устройства, типа воздухораспределителя.

В пятой главе представлены численные исследования, полученные с использованием методов планирования эксперимента. Получены зависимости для определения максимальной скорости в обратном потоке от скорости на истечении, параметра поперечного стеснения и типа воздухораспределителя. Представлен усовершенствованный метод расчета воздухораспределения в помещениях стесненными струями.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Изменение кинематического коэффициента по длине основного участка струи для геометрически сложных воздухораспределительных устройств.

Введение в практику проектирования кинематического коэффициента m , характеризующего изменение осевой скорости V_x по длине струи x , подразумевает его постоянство на основном участке струи. Однако в ходе физического эксперимента (ФЭ) и численного моделирования (ЧМ) современного геометрически сложного воздухораспределительного устройства ДКУ было обнаружено, что коэффициент m не сохраняет постоянное значение на основном участке струи, а монотонно убывает (рисунок 1). При этом различие между максимальным и минимальным значениями коэффициента m на основном участке составило $\approx 33\%$. Использование в этом случае усредненного значения m при проектировании приводит к заметным погрешностям в определении максимальных скоростей по длине приточной струи.

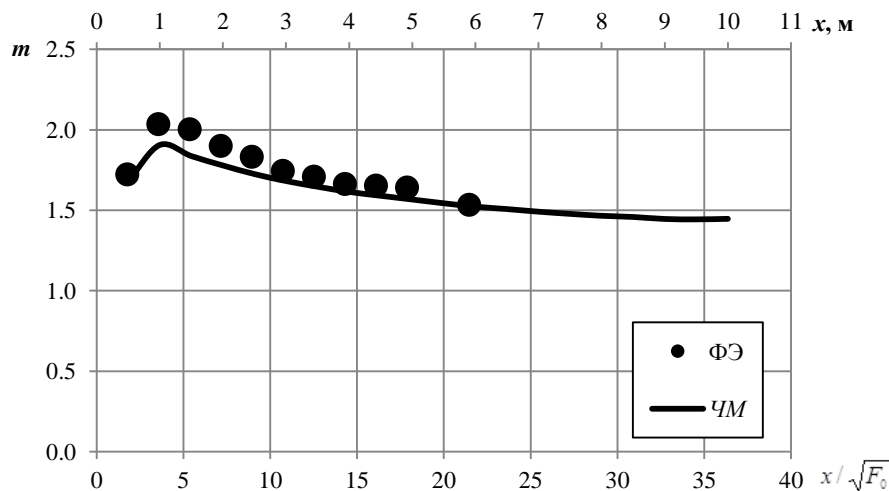


Рисунок 1 – Кинематический коэффициент m верной настилающейся струи диффузора ДКУ от относительного расстояния $x/\sqrt{F_0}$, где F_0 – площадь приточного отверстия

На переменное значение кинематического коэффициента m в ходе своих экспериментальных исследований обратил внимание профессор В.Н. Талиев. Во всех трех описанных им случаях (истечение из трубы с разными начальными профилями скорости) кинематический коэффициент варьировался. Причина полученного непостоянства коэффициента m не указывалась.

Для определения характера поведения кинематического коэффициента других геометрически сложных воздухораспределителей были изучены архивы протоколов натурных испытаний компании «Арктос», а также проведен ряд дополнительных исследований.

В ходе изысканий удалось установить, что переменное значение кинематического коэффициента также наблюдается для струй, формируемых,

например, следующими воздухораспределителями: панельным ячейковым 2ВПВ, перфорированным 3СПП, закручивающим 2ДПЗ М.

Изучение процесса формирования и развития струи из воздухораспределителя ДКУ (рисунок 2), позволило сделать вывод о том, что рассматриваемая приточная струя отличается от классической веерной струи, формируемой при истечении из щели и описанной в работах М.И. Гримитлина, И.А. Шепелева. Так, в отличие от классической струи, которая выходит из воздухораспределителя параллельно горизонтальной поверхности, истечение приточного воздуха из ДКУ осуществляется отдельными струйками под углом к горизонтальной поверхности. На расстоянии $\approx 0,5$ м от оси диффузора происходит слияние струек в единый поток с последующим его налипанием на поверхность. Таким образом, можно выделить два характерных участка струи: участок формирования при истечении из диффузора (истечение отдельных струек и их слияние) и участок распространение сформированного классического струйного течения. Сечение перехода от одного участка к другому можно назвать началом истечения классической веерной струи. Наличие протяженного участка формирования струи является причиной обнаруженного непостоянства кинематического коэффициента m для геометрически сложных воздухораспределительных устройств.

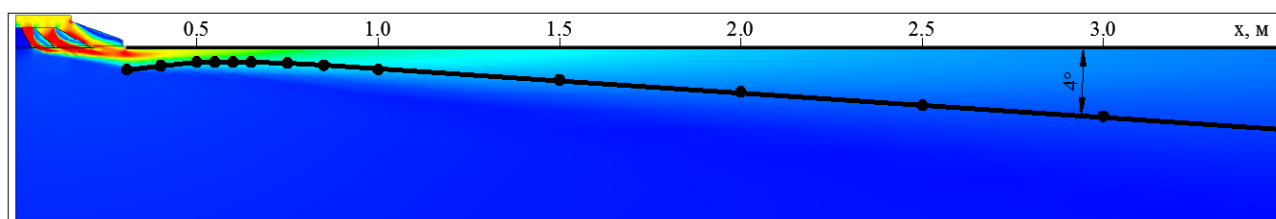


Рисунок 2 – Поле скоростей в вертикальной плоскости симметрии воздухораспределителя.
Черная линия - постоянные значения относительной скорости

Как известно для определения кинематического коэффициента m используется зависимость

$$m = \frac{x}{\sqrt{F_0}} \frac{V_x}{V_0}, \quad (1)$$

где V_0 – скорость приточного воздуха на истечении.

Если ввести в формулу (1) поправку $k_m \approx 0,5$ м (расстояние от геометрической оси диффузора до указанного места формирования классической струи), тогда вид зависимости (1) приобретает вид

$$\tilde{m} = \frac{x - k_m}{\sqrt{F_0}} \frac{V_x}{V_0}. \quad (2)$$

Значение модифицированного кинематического коэффициента становится постоянным на основном участке струи (кривая $ЧМ_{кор}$ на рисунке 3).

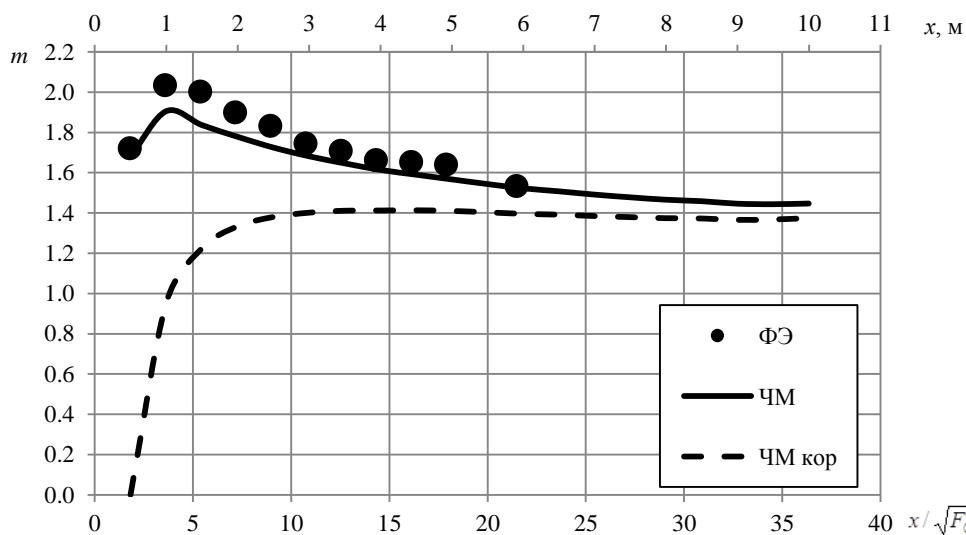


Рисунок 3 – Изменение кинематического коэффициента по длине струи диффузора ДКУ

2. Методика определения модифицированного кинематического коэффициента при испытаниях новых воздухораспределительных устройств.

В соответствии с методикой ГОСТ Р ЕН 12238-2012 при проведении испытаний воздухораспределителей определяются максимальные значения скоростей по длине струи, по которым рассчитывается кинематический коэффициент.

Для определения модифицированного кинематического коэффициента в данной работе для геометрически сложных воздухораспределителей предлагается усовершенствованная методика:

1. Определение характера изменения кинематического коэффициента для исследуемого воздухораспределителя.
2. При монотонном убывании кинематического коэффициента строятся профили струи и линия относительных постоянных скоростей (изотаха), проведенная через значения, равные половине осевой скорости струи.
3. По профилям скорости и изотахе определить участок формирования струи. Принять данное расстояние в качестве поправки k_m .
4. Построить график изменения кинематического коэффициента \tilde{m} с учетом поправки k_m . Значение \tilde{m} должно сохранять постоянное значение по длине основного участка струи. При обнаружении монотонного убывания коэффициента, следует еще раз откорректировать значение величины k_m .

Использование значений \tilde{m} и k_m при расчете воздухораспределения позволяет повысить точность определении максимальных скоростей по длине приточной струи.

3. Уточнение схемы развития обратного потока в помещениях.

Схема воздухораспределения стесненными струями, подаваемыми выше рабочей зоны, широко используется в общественных и производственных помещениях. В этом случае при нормировании подвижности воздуха в рабочей зоне основным параметром является максимальная скорость в обратном потоке (ОП).

Большинство исследований других авторов, посвященных изучению стесненной струи и обратного потока, производилось для условий истечения приточного воздуха в объем цилиндрической формы.

Автором было проведено численное исследование при следующих исходных данных: площадь приточного отверстия $F_0=0,16 \text{ м}^2$, площадь поперечного сечения цилиндра $F_n=64 \text{ м}^2$, скорость истечения $V_0=10 \text{ м/с}$, длина цилиндра $a=28 \text{ м}$. Значения максимальных скоростей в обратном потоке $V_{обр}^{\max}$, полученные автором, показали хорошее согласование с расчетами по зависимостям М.И. Гримитлина (3) и И.А. Шепелева (4). Отличие составило менее 10% (таблица 1).

Таблица 1 – Максимальная скорость в обратном потоке при истечении приточного воздуха в цилиндр

Источник	Скорость в ОП $V_{обр стр}^{\max}$, м/с	Отклонение ЧМ от данных других авторов, %
Численное моделирование	0,37	-
Гримитлин М.И. (3)	0,39	-5 %
Шепелев И.А. (4)	0,33	+10 %

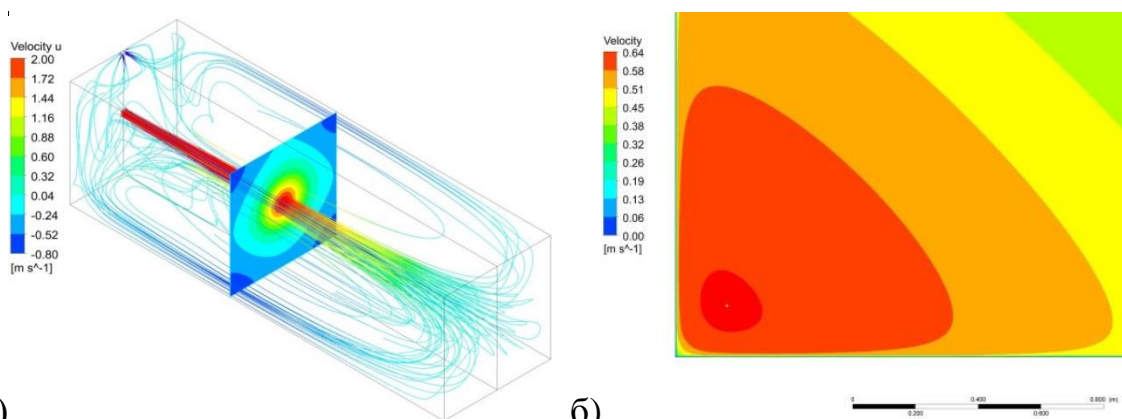
$$V_{обр стр}^{\max} = 0,78 \cdot V_0 \cdot \sqrt{\frac{F_0}{F_n}} \quad (3)$$

$$V_{обр стр}^{\max} = 0,656 \cdot \sqrt{\frac{I_0}{\rho \pi R^2}}, \quad (4)$$

где I_0 – начальный импульс струи; ρ – плотность воздуха; R – радиус цилиндра.

Численное исследование характера течения стесненной струи в помещениях *прямоугольной формы* ($F_0=0,16 \text{ м}^2$, $F_n=64 \text{ м}^2$, $V_0=10 \text{ м/с}$, $a=28 \text{ м}$) показало, что значение максимальной скорости в ОП под струей (в плоскости симметрии, проходящей через ось струи), совпадает с максимальной скоростью в ОП струи, истекающей в цилиндр (таблица 2). Однако в угловой зоне помещения были обнаружены значения скорости в 1,7 раза выше, чем под струей (рисунок 4, таблица 2).

Данное явление смещения максимума скоростей ОП может объясняться особенностями течения потока вдоль двух ограничивающих поверхностей. То есть на формирование обратного потока влияет эффект Коанда, усиленный двойным настилением.



а), б)
Рисунок 4 – Поле скоростей в поперечном сечении помещения с максимальной скоростью в ОП: а – трехмерная модель помещения; б – поле скоростей угловой зоны

Таблица 2 – Максимальная скорость в обратном потоке $V_{обр}^{max}$, м/с, в различных по форме помещениях по результатам ЧМ

Положение максимальной скорости в ОП	Помещение с круглым сечением, $F_n=64\text{м}^2$	Помещение с квадратным сечением, $F_n=64\text{м}^2$
Максимальные скорости под струей $V_{обр}^{max}$	0,37	0,38
Максимальные скорости в угловой зоне $V_{обр}^{max}$	-	0,67

Смещение максимума скорости ОП в угловые зоны при истечении в объем прямоугольного сечения было подтверждено для случаев одновременной установки двух и более приточных устройств. В этом случае максимальное значение скорости наблюдается не только в угловой зоне, но и посередине между воздухораспределителями (рисунок 5).

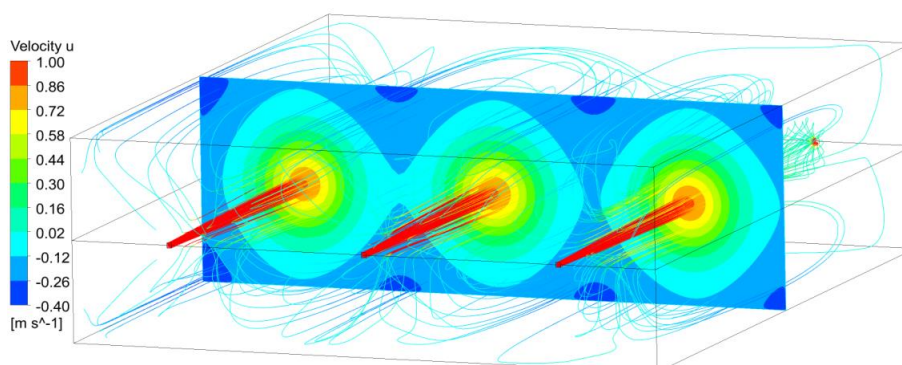


Рисунок 5 – Поле скоростей в поперечном сечении помещения при установке трех приточных устройств

Использование при нормировании подвижности воздуха значений максимальных скоростей под струей приводит к формированию на практике в рабочей зоне скоростей выше нормируемых, которые будут наблюдаться в угловых областях и между воздухораспределителями. Поэтому зависимость для

расчета максимальной скорости обратного потока должна быть уточнена с учетом максимума, наблюдаемого не под струей.

4. Зависимость скорости в обратном потоке от высоты установки воздухораспределителя.

Исследования стесненной струи другими авторами проводились в основном для двух крайних положений установки приточного устройства: на полувысоте помещения и непосредственно под потолком. Было получено, что значения максимальных скоростей для данных вариантов совпадали. Поэтому было сделано предположение, что высота установки приточного устройства не влияет на значения скоростей в ОП.

Проведенное автором численное исследование для двух аналогичных крайних положений установки приточного устройства также показало совпадение значений максимальных скоростей в ОП. Однако, моделирование течения при промежуточных значениях высоты установки приточного устройства показало заметное отличие (до 20%) в значениях этих скоростей (таблица 3).

Результаты, представленные в таблице 3, получены для следующих исходных данных. Размер помещения $8 \times 8 \times 56 \text{ м}^3$; размер приточных отверстий: $400 \times 400 \text{ мм}^2$ (вариант № 1), $200 \times 200 \text{ мм}^2$ (вариант № 2), $1000 \times 1000 \text{ мм}^2$ (вариант № 3); высота установки приточных отверстий h_0 варьировалась от $0,5h$ (h – высота помещения) до $0,988h$, $V_0=10 \text{ м/с}$. В варианте № 1 исследовались тупиковая и проточная схемы воздухораспределения, в вариантах № 2 и 3 – проточная схема.

Получено, что максимальные значения скорости в ОП наблюдаются при установке приточного отверстия на высоте $h_0=0,75h$, минимальные – при установке по центру и под потолком.

Таблица 3 – Максимальная скорость в обратном потоке $V_{обp}^{\max}$, м/с, в зависимости от высоты установки воздухораспределителя

Высота установки приточного отверстия h_0	Вариант №1		Вариант №2	Вариант №3
	тупиковая	проточная		
$0,5h$	0,65	0,65	0,35	0,74
$0,625h$	0,78	0,75	0,37	-
$0,75h$	0,83	0,83	0,40	0,94
$0,875h$	0,75	0,72	0,37	-
$0,975h$	0,69	0,65	-	-
$0,988h$	-	-	0,32	-
$0,938h$	-	-	-	0,80

Наибольшие скорости в ОП при установке приточного отверстия на высоте $h_0=0,75h$ объясняются следующим: при расположении приточного устройства на половине высоты помещения, прямой поток занимает центральную часть поперечного сечения, в то время как обратный поток развивается по его периметру со всех сторон. При увеличении высоты установки происходит перераспределение занимаемых площадей: приточная струя, настилаясь на

потолок, занимает всю верхнюю зону помещения, при этом обратный поток перемещается в нижнюю зону (рисунок 6). При установке приточного отверстия на высоте $h_0=0,75h$ и выше, обратный поток развивается только в нижней зоне помещения под струей. При этом для случая $h_0=0,75h$ занимаемая обратным потоком площадь поперечного сечения является наименьшей по сравнению со всеми остальными вариантами установки приточного отверстия по высоте (таблица 4).

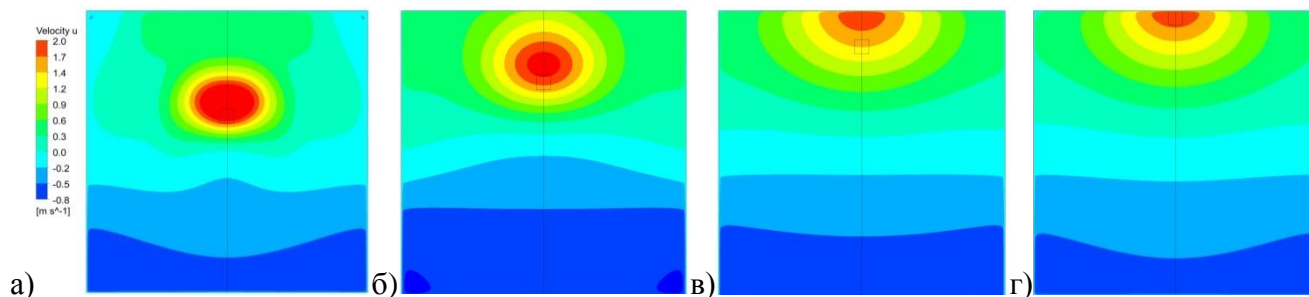


Рисунок 6 – Поля скоростей в поперечном сечении с максимальной скоростью в ОП для Варианта №1: а – $h_0=0,625h$; б – $h_0=0,75h$; в – $h_0=0,875h$; г – $h_0=0,975h$

Таблица 4 – Площадь поперечного сечения ОП с максимальной скоростью

	Высота установки приточного отверстия h_0 по отношению к высоте помещения h				
	0,5h	0,625h	0,75h	0,875h	0,975h
Площадь ОП, м ²	20,6	17,5	17,3	17,8	17,8

На рисунке 7 для вариантов №1, №2 и №3 показаны значения коэффициента $k_v = \frac{V_{обп}^{max}}{V_{обп_0,75h}^{max}}$, характеризующего изменение максимальной скорости воздуха в обратном потоке, в зависимости от относительной высоты установки приточного отверстия $\bar{h} = 1 - \left| \frac{h_0 - 0,75h}{0,25h} \right|$. Коэффициент k_v меняется от 0,8 до 1, принимая максимальное значение для высоты установки ВР $h_0 = 0,75h$ и минимальные значения для высоты установки $h_0 = 0,5h$ и $h_0 \approx h$.

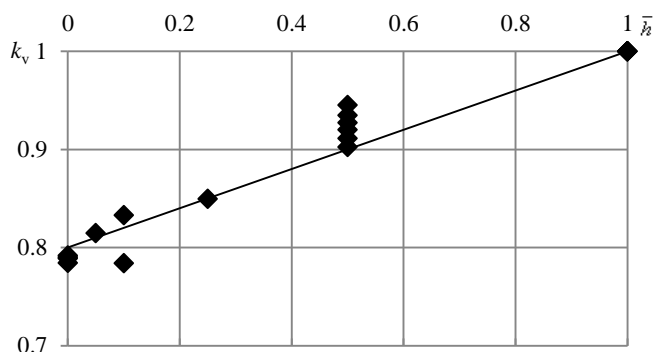


Рисунок 7 – Коэффициент корректировки скорости k_v в ОП в зависимости от относительной высоты установки воздухораспределителя \bar{h}

Для аппроксимации точек принята линейная зависимость для определения коэффициента корректировки скорости при различной высоте установки воздухораспределителя

$$k_v = 0,2\bar{h} + 0,8 \quad (5)$$

Степенная зависимость позволит с большей точностью аппроксимировать имеющиеся данные, однако ее использование не целесообразно для инженерной практики проектирования.

5. Зависимость максимальной скорости в обратном потоке от кинематического коэффициента воздухораспределительного устройства.

Большинство исследований стесненной струи производилось при условии истечения приточного воздуха из отверстия. Одним из исключений является работа Р.Н. Гобзы, в которой отмечено, что существует зависимость между подвижностью воздуха в рабочей зоне и профилем скорости приточной струи.

С целью изучения влияния конструкции воздухораспределителя (ВР) на значение максимальной скорости в ОП автором проведено численное исследование стесненной струи, формируемой воздухораспределителями с различными кинематическими коэффициентами m .

Для математического описания реальных конструкций воздухораспределителей был разработан следующий способ. При задании профиля скорости струи на входе в расчетную область, приточное отверстие разбивается на несколько участков, в каждом из которых задается свой вектор скорости. Предложенный способ задания граничного условия в численной модели позволяет описать различные виды струй. Так, при делении приточного отверстия на 8 участков была смитирована струя, истекающая из решетки с веерно раскрытыми ламелями в горизонтальной плоскости, а при делении на 16 участков – струя, истекающая из сопла (рисунок 8). Угол наклона векторов скорости от геометрической оси изделия изменялся от 0° до плюс 30° при имитации решетки, и от 0° до минус 60° при имитации сопла.

Сравнение численных расчетов для реальных конструкций ВР и созданных по описанному способу показало хорошую сходимость результатов.

Разработанный способ позволяет для широкого диапазона значений коэффициента m воздухораспределителей упростить геометрию исследуемой области, сократить количество элементов расчетной сетки и время расчета.

При исследовании влияния кинематического коэффициента воздухораспределительного устройства на скорости в обратном потоке коэффициент m составлял: $m=3,2$, $m=4,4$, $m=5,3$ (решетки с веерным раскрытием ламелей, угол раскрытия ламелей в горизонтальной плоскости варьировался от 15° до 30°); $m=6,7$ (отверстие); $m=8,1$, $m=9,5$ (сопла).

Размеры помещения: поперечное сечение $8 \times 8 \text{ м}^2$, длина – варьировалась в зависимости от значения коэффициента m , обеспечивая сохранение схемы воздухораспределения. Скорость на истечении $V_0=7 \text{ м/с}$. Размеры приточных отверстий: $100 \times 100 \text{ мм}^2$, $400 \times 400 \text{ мм}^2$, $1000 \times 1000 \text{ мм}^2$.

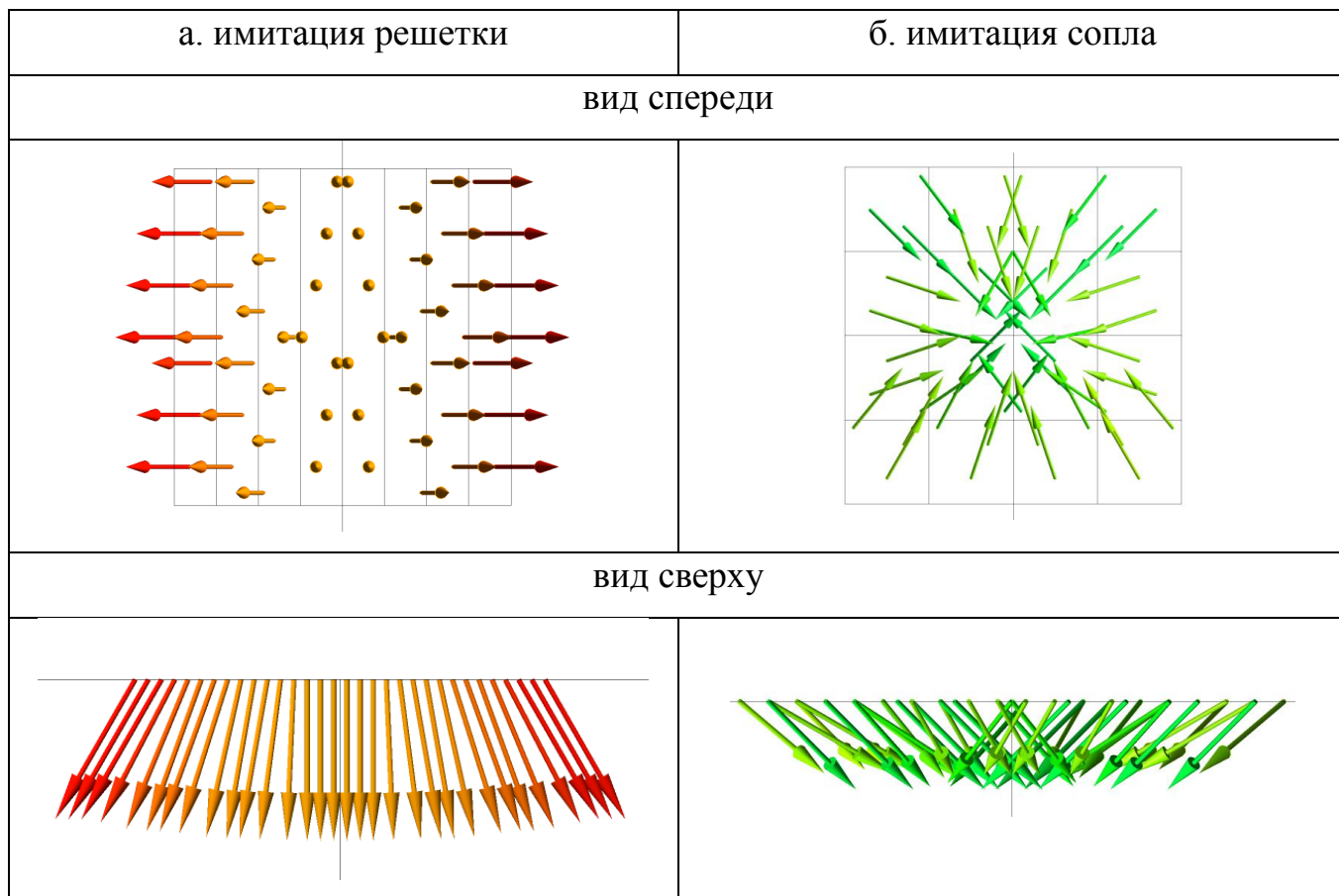


Рисунок 8 – Имитация воздухораспределительного устройства векторами скорости:
а – решетка; б – сопло

Полученные результаты (рисунок 9) свидетельствуют о наличии зависимости значений максимальной скорости в обратном потоке от кинематического коэффициента воздухораспределительного устройства.

На представленном графике (рисунок 9) можно выделить два характерных линейных участка: от $m=3,2$ до $m=6,7$ и от $m=6,7$ до $m=9,5$.

Наличие двух участков объясняется тем, что характер распределения прямого и обратного потоков для веерной струи (истечение из решетки), существенно отличается (рисунок 10) от характера распределения для компактной струи (истечение из отверстия или сопла).

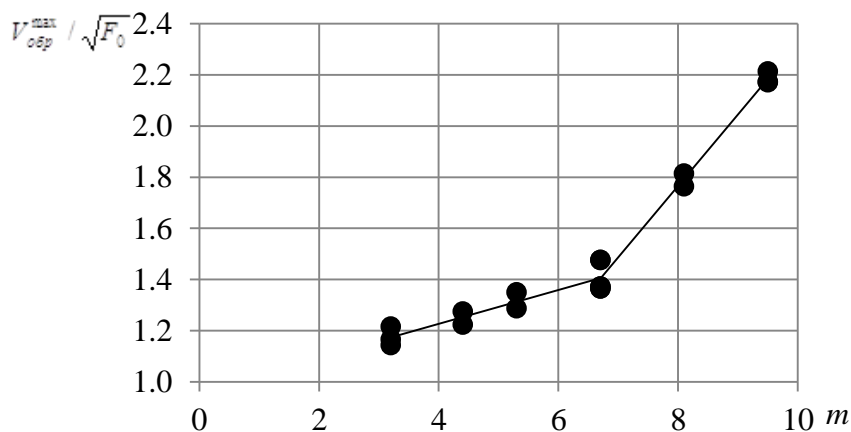


Рисунок 9 – График зависимости максимальной скорости в ОП от коэффициента m

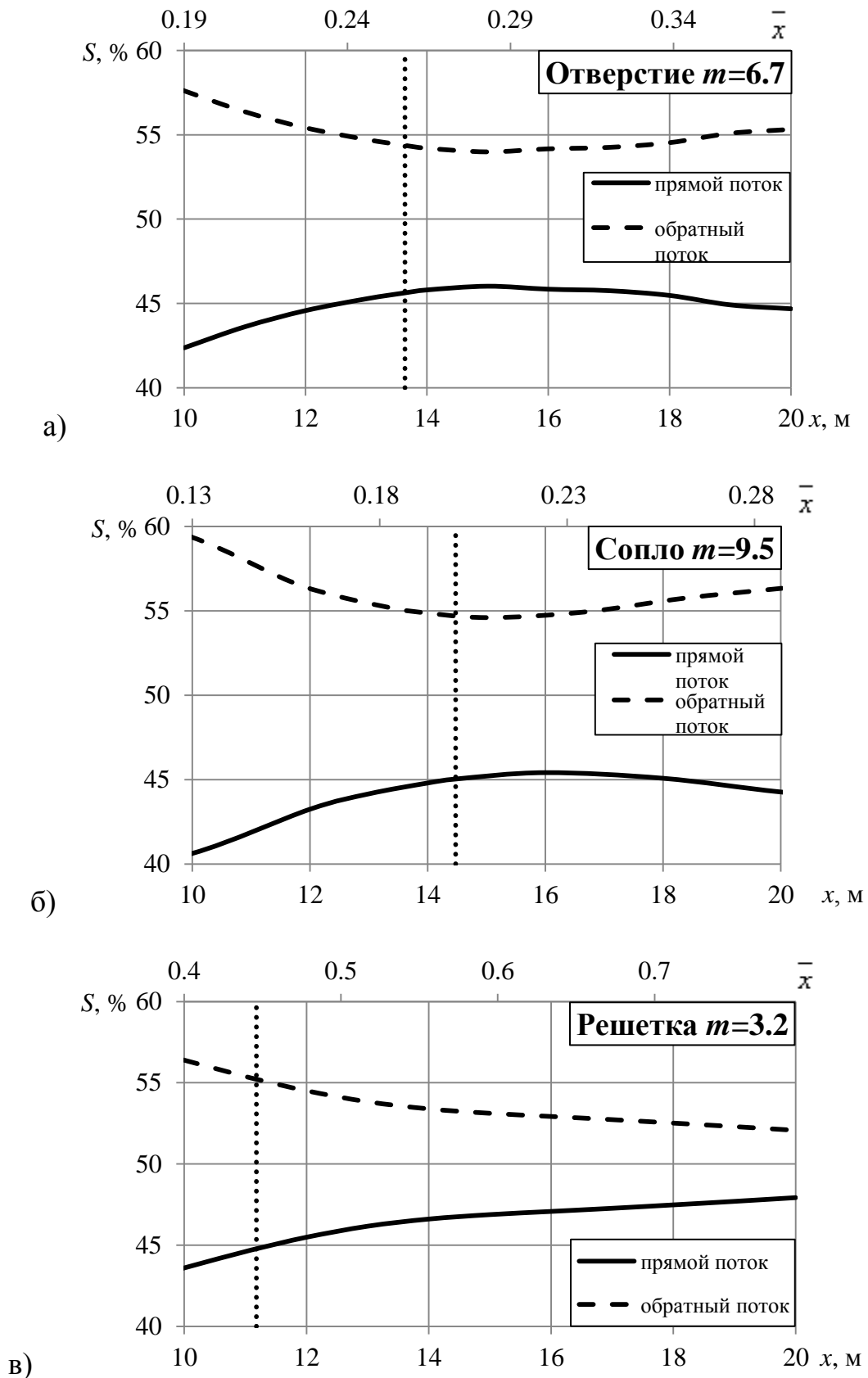
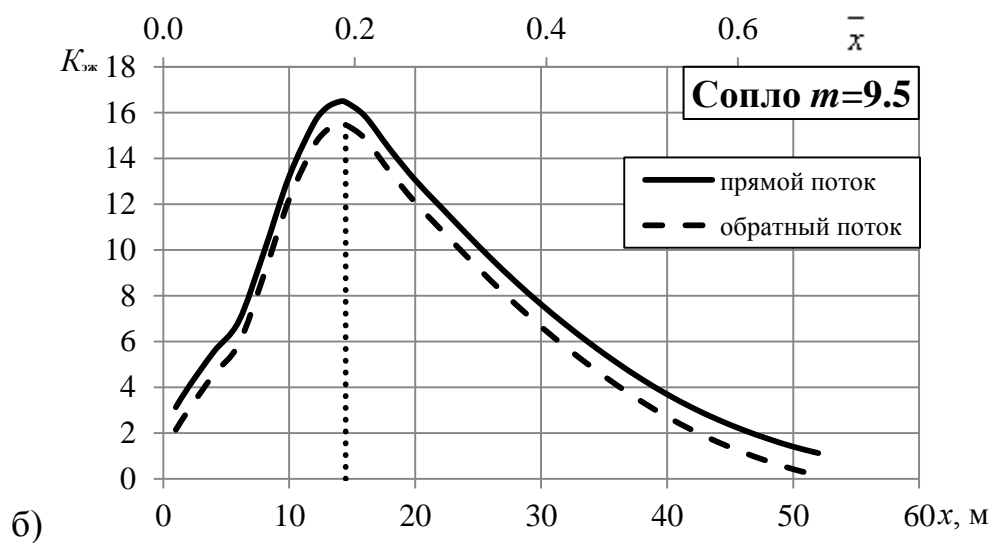
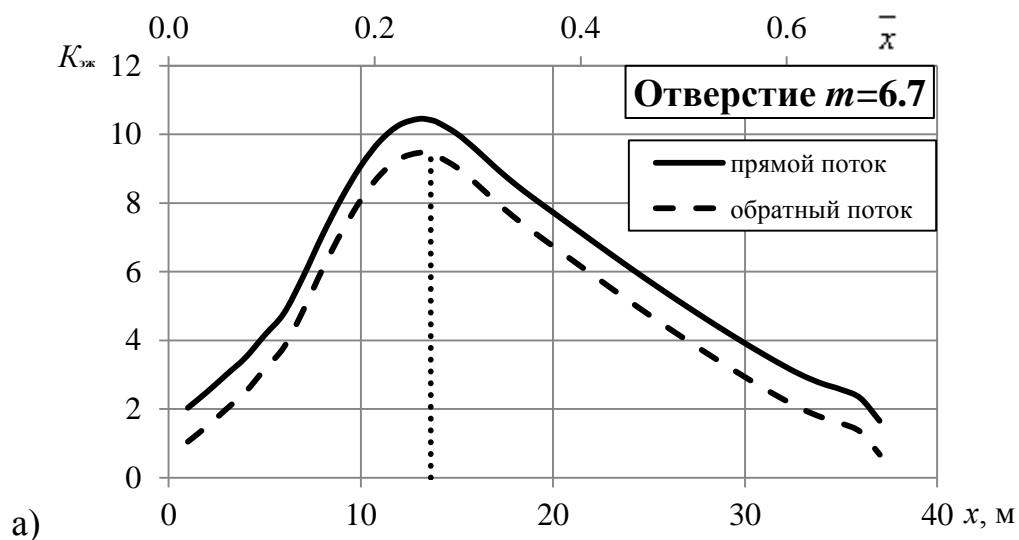


Рисунок 10 – Изменение площади S прямого и обратного потока, выраженной в процентах от площади поперечного сечения помещения: а – истечение из отверстия; б – истечение из сопла; в – истечение из решетки. Вертикальной пунктирной линией показано сечения с максимальным значением скорости в ОП

На рисунке 11 показано изменение коэффициентов эжекции $K_{эж}$ в прямом и обратном потоках по длине струи для истечения из отверстия, сопла, решетки

$$K_{эж} = \frac{L_x - L_0}{L_0}, \quad (6)$$

где L_0 – объемный расход воздуха на истечении; L_x – объемный расход воздуха в струе на расстоянии x .



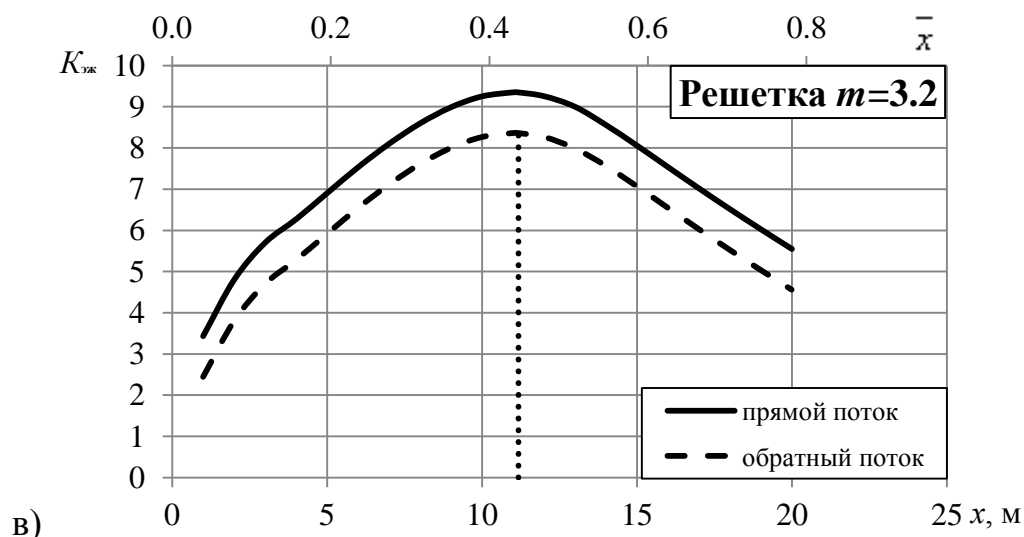


Рисунок 11 – Коэффициент эжекции для прямого и обратного потока:

а – истечение из отверстия; б – истечение из сопла; в – истечение из решетки.

Вертикальной пунктирной линией показано сечения с максимальным значением скорости в ОП

Анализ данных (рисунок 10, 11) позволяет сделать вывод о том, что при истечении из различных ВР изменение площади поперечного сечения прямого и обратного потоков по длине струи, а также эжектирующая способность струи существенно зависит от кинематического коэффициента ВР.

При этом характер зависимостей для истечения из *сопла* и *отверстия* качественно совпадает, однако количественные характеристики прямого и обратного потоков при изменении m в 1,35 раз существенно различны. Так, критическое сечение, где скорость в ОП максимальна, находится на относительном расстоянии $\bar{x} = \frac{x}{m\sqrt{F_n}} = 0,19$ для сопла, а для отверстия – $\bar{x} = 0,25$.

Объемные расходы воздуха в приточных струях из отверстия и сопла в критическом сечении отличаются на 60%. Отметим, что разница в значениях максимальной скорости в ОП, также составляет $\approx 60\%$ (рисунок 9).

Характер зависимостей для истечения из *решетки* и *отверстия* качественно отличается. При этом количественные характеристики прямого и обратного потоков при изменении m в 2 раза различаются не так существенно. Так значения расходов в критическом сечении для решетки и отверстия отличаются на 30%. Разница в значениях максимальной скорости в ОП, также составляет $\approx 30\%$

Полученные результаты позволяют сделать вывод о необходимости совершенствования методов расчета воздухораспределения стесненными струями с учетом влияния характеристик воздухораспределительного устройства на максимальную скорость в обратном потоке.

Расчетную зависимость для определения максимальной скорости в ОП целесообразно вывести для двух диапазонов варьирования кинематического коэффициента (рисунок 9): от $m=3,2$ до $m=6,7$ и от $m=6,7$ до $m=9,5$.

Сложность комплексного изучения течения стесненной струи воздуха, многофакторность и широкий диапазон изменения влияющих параметров

вызвали необходимость применения математических методов планирования и обработки эксперимента для выведения зависимостей.

В качестве независимых переменных, однозначно определяющих значения максимальной скорости в обратном потоке, были приняты три фактора:

- скорость приточного воздуха V_0 ;
- кинематический коэффициент m (или \tilde{m});
- корень отношения площади приточного устройства к поперечной площади помещения (параметр поперечного стеснения) $\sqrt{F_0/F_n}$.

Уровни варьирования факторов выбирались таким образом, чтобы наиболее полно моделировались реальные условия течения стесненной струи и охватывались все возможные комбинации сочетания факторов (таблица 4 и таблица 5).

Исходные данные:

- размеры помещения 8 x 8 x 76 м³;
- высота установки ВР от пола до его центра $h_0 = 6$ м;
- приточные отверстие размерами 100 x 100 мм² и 1000 x 1000мм²;
- вытяжное отверстие размером равным приточному – на противоположной стене соосно с приточным.

Таблица 4 – Уровни варьирования факторов – зависимость №1

Наименование фактора	Размерность	Кодовое обозначение	Уровни варьирования	
			Нижний $X_i = -1$	Верхний $X_i = +1$
Скорость V_0	м/с	X_1	1	7
Кинематический коэффициент m	-	X_2	3,2	6,7
Параметр стеснения $\sqrt{F_0/F_n}$	-	X_3	0,0125	0,125

Таблица 5 – Уровни варьирования факторов – зависимость №2

Наименование фактора	Размерность	Кодовое обозначение	Уровни варьирования	
			Нижний $X_i = -1$	Верхний $X_i = +1$
Скорость V_0	м/с	X_1	1	7
Кинематический коэффициент m	-	X_2	6,7	9,5
Параметр стеснения $\sqrt{F_0/F_n}$	-	X_3	0,0125	0,125

В результате обработки исследований получены зависимости для определения скорости в обратном потоке для двух диапазонов значений кинематического коэффициента m с погрешностью $\pm 5\%$

- зависимость №1 для значений $m=3,2 \div 6,7$

$$V_{обр_{0,75h}}^{\max} = -0,0057 + 0,0021V_0 + 0,0014m + 0,19\sqrt{F_0/F_n} - 0,000090V_0m + 0,99V_0\sqrt{F_0/F_n} - 0,056m\sqrt{F_0/F_n} + 0,087V_0m\sqrt{F_0/F_n}; \quad (7)$$

- зависимость №2 для значений $m=6,7 \div 9,5$

$$V_{обр_{0,75h}}^{\max} = 0,0012 + 0,0027V_0 + 0,0021m - 0,47\sqrt{F_0/F_n} - 0,00014V_0m - 0,5V_0\sqrt{F_0/F_n} + 0,042m\sqrt{F_0/F_n} + 0,31V_0m\sqrt{F_0/F_n}. \quad (8)$$

6. Усовершенствованный метод расчета параметров обратного потока при воздухораспределении стесненными струями

Область применимости схемы воздухораспределения обратным потоком

1. Высота установки воздухораспределителя h_0 должна превышать высоту обслуживаемой зоны $h_{оз}$

$$h_0 > h_{оз}. \quad (9)$$

Нарушение условия (9) противоречит схеме воздухораспределения горизонтальными стесненными струями выше рабочей зоны.

2. Высота установки воздухораспределителя h_0 должна быть не ниже половины высоты помещения h

$$h_0 \geq 0,5h. \quad (10)$$

При нарушении условия (10) приточный поток отклоняется вниз, при этом обратный поток формируется вблизи потолка, что не соответствует принятой схеме воздухораспределения.

3. Минимальная длина помещения a должна быть больше дальнобойности стесненной струи:

$$a \geq 0,5 \cdot m \sqrt{F_n}, \quad (11)$$

где m – кинематический коэффициент воздухораспределителя,

F_n – площадь поперечного сечения помещения, перпендикулярного струе.

При расчете следует учитывать, что на расстояниях $a > 0,7 \cdot m \sqrt{F_n}$ наблюдается застойная зона.

4. При высоте установки воздухораспределителя вблизи потолка $h_0 \geq 0,75h$ для расчета по (11) следует использовать значение скоростного коэффициента для настилающей струи $m_{наст} = 1,4m$.

Расчет максимальной скорости в обратном потоке

5. Значение максимальной скорости в обратном потоке $V_{обр_{0,75h}}^{\max}$ определяется:

– для воздухораспределителей с коэффициентом $m < 6,7$
с погрешностью $\pm 5\%$

$$V_{обп-0,75h}^{\max} = -0,0057 + 0,0021V_0 + 0,0014m + 0,19\sqrt{F_0/F_n} - 0,000090V_0m + 0,99V_0\sqrt{F_0/F_n} - 0,056m\sqrt{F_0/F_n} + 0,087V_0m\sqrt{F_0/F_n}, \quad (12)$$

с погрешностью $\pm 20\%$

$$V_{обп-0,75h}^{\max} = 0,29mV_0\sqrt{F_0/F_n}; \quad (13)$$

- для воздухораспределителей с коэффициентом $m \geq 6,7$

с погрешностью $\pm 5\%$

$$V_{обп-0,75h}^{\max} = 0,0012 + 0,0027V_0 + 0,0021m - 0,47\sqrt{F_0/F_n} - 0,00014V_0m - 0,5V_0\sqrt{F_0/F_n} + 0,42m\sqrt{F_0/F_n} + 0,31V_0m\sqrt{F_0/F_n}, \quad (14)$$

с погрешностью $\pm 10\%$

$$V_{обп-0,75h}^{\max} = 0,25mV_0\sqrt{F_0/F_n}. \quad (15)$$

Также значение максимальной скорости в обратном потоке можно определить по графику (рисунок 12).

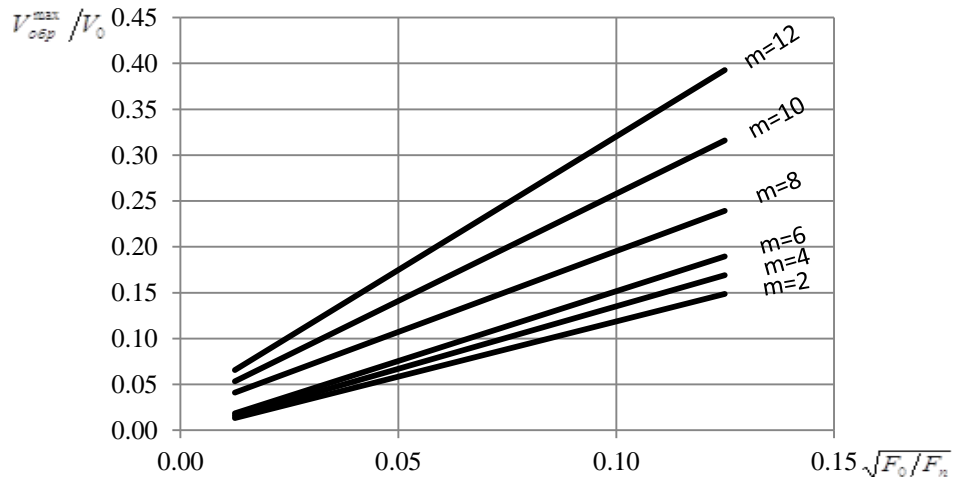


Рисунок 12 – Зависимость максимальной скорости в обратном потоке от параметра стеснения $\sqrt{F_0/F_n}$ и кинематического коэффициента m

6. При установке приточного устройства на высоте $h_0 \neq 0,75h$ рассчитанное по (12 ÷ 15) значение скорости в обратном потоке необходимо откорректировать с помощью коэффициента k_v

$$V_{обп}^{\max} = V_{обп-0,75h}^{\max} \cdot k_v. \quad (16)$$

Коэффициент k_v определяется по зависимости

$$k_v = 0,2\bar{h} + 0,8, \quad (17)$$

где $\bar{h} = 1 - \left| \frac{h_0 - 0,75h}{0,25h} \right|$ относительная высота установки воздухораспределителя.

ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Доказано, что кинематический коэффициент на основном участке струи для воздухораспределительных устройств сложных конструкций имеет переменное значение.
2. Предложено использование модифицированного кинематического коэффициента, который сохраняет постоянное значение на основном участке струи, истекающей из геометрически сложных воздухораспределителей. Разработана методика определения модифицированного кинематического коэффициента.
3. Уточнены схема развития стесненной струи в помещениях при истечении из одного и более воздухораспределительных устройств и расположение области максимальных скоростей в обратном потоке.
4. Введен коэффициент k_v для корректировки значения максимальной скорости в обратном потоке в зависимости от высоты установки воздухораспределительного устройства. Получена эмпирическая зависимость для определения коэффициента k_v .
5. С использованием методов планирования эксперимента получена обобщенная зависимость для определения максимальной скорости обратного потока, которая учитывает влияние начальной скорости истечения, поперечное стеснение и кинематический коэффициент воздухораспределительного устройства. Полученная зависимость позволит повысить точность расчета скорости в обратном потоке при проектировании систем вентиляции.
6. Усовершенствован метод расчета воздухораспределения стесненной струей на основе полученных зависимостей для скорости обратного потока. Разработанная на его основе методика расчета воздухораспределения включена в редакцию № 1 СП 60.13330.2016 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» и компьютерную программу ComfortAir.

IV. ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, размещенные на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии и приравненные к ним:

1. Кочарьянц, К.В. Численное моделирование воздухораспределения веерными настилающимися струями. Выбор модели турбулентности / К.В. Кочарьянц // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 4(57). – С. 128-133.
2. Кочарьянц, К.В. Исследование зависимости скорости потока в обратном течении от типа приточного устройства / К.В. Кочарьянц / Электронный научный журнал «Фундаментальные исследования». – 2017. – №4. – Ч.1. – С. 39-43. Режим доступа: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41432>
3. Кочарьянц, К.В. Непостоянство кинематического коэффициента при истечении из современных воздухораспределительных устройств / К.В. Кочарьянц, Д.М. Денисихина // Научное обозрение. – 2017. – №10. – С. 40-47.

4. Kochariantc, K. Computational Modelling Research into the Efficiency of Recirculation Air Diffusers / V. Shkarpet, I. Tislenko, K. Kochariantc, D. Kapko, Iu. Tabunshchikov // Oriental Journal of Chemistry. – 2015. – Vol. 31 October. – P. 173-179 (Scopus).

Публикации в других изданиях:

5. Кочарьянц, К.В. Численные исследования воздухораспределения стесненными струями [Текст] / К.В. Кочарьянц // Актуальные проблемы строительства и архитектуры: Материалы международной научно научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов, Ч. II / М-во образования и науки РФ, С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2016. – С. 138 – 141.

6. Кочарьянц, К.В. Непостоянство кинематического коэффициента m на основном участке струй, формируемых современными приточными устройствами [Текст] / К.В. Кочарьянц // Актуальные проблемы строительства и архитектуры: Материалы международной научно научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов, Ч. III / М-во образования и науки РФ, С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2017. – С. 166 – 170.