

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., доцент Д.М.Денисихина

Санкт-Петербург
2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕСНЕННЫМИ СТРУЯМИ	10
1.1 Обзор методов расчета.....	10
1.2 Анализ методов расчета параметров стесненной струи и обратного потока ...	36
1.3 Выводы по главе 1	40
ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ	41
2.1 Постановка задач исследований	41
2.2 Математические модели, использованные при проведении численных расчетов	44
2.3 Исходные данные для численного моделирования	47
2.4 Методика проведения натурных испытаний	51
2.5 Сравнение результатов численного и натурального экспериментов	57
2.7 Выводы по главе 2	67
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ, ХАРАКТЕРИЗУЕМЫХ НЕПОСТОЯННЫМ КИНЕМАТИЧЕСКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ	68
3.1 Постановка задач исследований	68
3.2 Натурные исследования течения приточных струй от воздухораспределителей различных типов.....	70
3.3 Анализ причины непостоянства кинематического коэффициента m по длине струи	73
3.4 Методика определения \tilde{m} , k_m при проведении испытаний воздухораспределительных устройств.....	77
3.5 Выводы по главе 3	79
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СТЕСНЕННОЙ СТРУИ И ФОРМИРУЕМОГО ЕЮ	

ОБРАТНОГО ПОТОКА С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	80
4.1 Постановка задач экспериментальных исследований	80
4.2 Истечение стесненной струи в помещения различной длины	81
4.3 Истечение стесненной струи из приточного отверстия, установленного на различной высоте	92
4.4 Истечение стесненной струи из различных типов воздухораспределителей .	101
4.5 Выводы по главе 4.....	111
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕСНЕННОЙ СТРУЕЙ	112
5.1 Постановка задачи.....	112
5.2 Выведение зависимостей для определения параметров обратного потока	113
5.3 Методика расчета воздухораспределения стесненной струей	125
5.4 Выводы по главе 5.....	133
ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ	134
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	136
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	138
ПРИЛОЖЕНИЕ А	149
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	161
ПРИЛОЖЕНИЕ В	165

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность выбранной темы

Неотъемлемым этапом проектирования систем вентиляции и кондиционирования является расчет воздухораспределения. От того, насколько точно и корректно он будет произведен, зависит качество формируемого микроклимата и эффективность систем вентиляции и кондиционирования. При подаче приточного воздуха горизонтальными стесненными струями выше рабочей зоны, микроклимат в ней определяется формируемым обратным потоком. Такой способ воздухораспределения актуален и активно используется в общественных и производственных помещениях.

Существующие методы расчета воздухораспределения стесненной струей, разработанные различными авторами, имеют ряд ограничений, допущений и противоречий. Ни одна из существующих методик не учитывает видовое разнообразие предлагаемых на сегодняшний день воздухораспределительных устройств и их влияние на параметры стесненной струи и ее обратного потока, формируемого в рабочей зоне. В связи с чем полученные результаты расчета по различным методикам отличаются по своим значениям в 2 и более раза. Таким образом, существует актуальность проблемы и необходимость анализа течения стесненных струй и формируемого ими обратного потока в зависимости от различных параметров.

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. Розенберга, Н. Н. Садовской, М.Д. Тарнопольского, В.Р. Таурита, В.Н. Трояновского, В.М. Уляшевой,

В. И. Ханжонкова, Я.И. Харитоновна, Н.Д. Черепнина, В.А. Черных, И.А. Шепелева, Р.Н. Шумилова, Т. Karimiparah, P. Nielsen, и другие.

Цели и задачи работы. Целью работы является совершенствование методов расчета параметров стесненных струйных течений, подаваемых выше рабочей зоны.

Для достижения указанной цели были сформулированы следующие задачи исследования:

- разработка и верификации численной модели исследования на основе сопоставления с данными натурального эксперимента;
- анализ закономерностей развития приточных струй, формируемых современными геометрически сложными воздухораспределительными устройствами;
- выполнение серии экспериментальных исследований воздухораспределения стесненными струями при различных параметрах задачи: размера поперечного и продольного стеснения, высоты установки приточных устройств, типа приточных устройств;
- получение обобщенной зависимости для определения параметров обратного потока.

Научная новизна работы заключается в том, что:

- установлено, что для современных геометрически сложных воздухораспределителей значение кинематического коэффициента не является постоянной величиной по длине основного участка струи;
- предложена методика определения модифицированного значения кинематического коэффициента, сохраняющего постоянную величину на основном участке струи для современных геометрически сложных воздухораспределителей;
- уточнена схема развития обратного потока в реальных помещениях;
- установлено влияние высоты установки приточного устройства и на значение максимальной скорости в обратном потоке;

- установлено влияние типа воздухораспределительного устройства на значение максимальной скорости в обратном потоке;
- получена обобщенная зависимость для определения параметров обратного потока;
- усовершенствован метод расчета параметров обратного потока при воздухораспределении стесненной струей.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- разработанная методика определения модифицированного кинематического коэффициента позволяет исключить ошибки при расчете воздухораспределения приточными струями, истекающими из современных геометрически сложных воздухораспределительных устройств;
- усовершенствованные методы определения параметров обратного потока позволяет повысить точность инженерных расчетов при проектировании воздухораспределения стесненными струями;
- разработанные способы математического описания реальных конструкций воздухораспределителей позволяют существенно сократить сроки подготовки и расчета модели и, тем самым, распространить применение методов численного моделирования для решения практических задач;
- полученное хорошее согласование данных натурного и численного экспериментов для современных геометрически сложных воздухораспределителей позволяет использовать методы численного моделирования при разработке новых или модернизации существующих приточных устройств;
- разработанная 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»);
- результаты работы диссертации внедрены в практику инженерных расчетов компаний: ООО «Арктос» (Акт внедрения от 18.06.2018 г.),

ЗАО «Арктика» (Справка от 20.06.2018 г.), ООО «ММ-Технологии» (Справка от 14.06.2018 г.).

Методология и методы исследования

Исследовательская часть диссертационной работы проводилась методами натурального эксперимента на действующих стендах завода «Арктос» и численного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS CFX. Исследования проводились с применением математических методов планирования и обработки эксперимента.

На защиту выносятся:

- эффект изменения кинематического коэффициента по длине основного участка струи, обнаруженный и объясненный для современных геометрически сложных воздухораспределительных устройств с помощью натуральных и численных исследований;
- методика определения модифицированного кинематического коэффициента при испытаниях новых геометрически сложных воздухораспределительных устройств;
- уточненная схема развития обратного потока в реальных помещениях;
- зависимости скорости в обратном потоке от высоты установки воздухораспределителя и типа приточного устройства;
- усовершенствованный метод расчета параметров обратного потока при воздухораспределении стесненными струями.

Область исследования соответствует паспорту специальности 05.23.03 – «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение», а именно пункту 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 вентиляционной аэродинамики 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», 08.04.2016 г., г. Санкт-Петербург;
- IX Международном конгрессе «Энергоэффективность. XXI век. Инженерные методы снижения энергопотребления зданий», 11.11.2015 г., г. Санкт-Петербург;
- 70-ой межвузовской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства», 05.04.2017 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:

- в редакцию №1 СП 60.13330.2016 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» (Приложение Л);
- Указания по расчету и применению воздухораспределителей завода «Арктос»;
- компьютерную программу ComforttAir;
- практику инженерного проектирования компаний «Арктика» и «ММ-Технологии».

Методика определения модифицированного кинематического коэффициента внедрена в практику испытаний воздухораспределителей на заводе «Арктос».

Структура и объем диссертационной работы

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

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕСНЕННЫМИ СТРУЯМИ

1.1 Обзор методов расчета

Одной из наиболее часто используемых схем воздухораспределения в общественных и производственных помещениях является подача воздуха горизонтальными струями выше рабочей зоны [17, 25, 30, 37, 40, 41]. Развивающаяся в ограниченном пространстве помещения струя, испытывая стеснения ограждающих конструкций, формирует в рабочей зоне обратный поток, который и определяет параметры микроклимата в помещении. Развитие стесненных струй может происходить по проточной или тупиковой схеме. При тупиковой схеме вытяжное отверстие располагается в той же плоскости, что и приточное. В проточной схеме вытяжное отверстие находится на противоположной стороне от приточного.

Определению закономерностей течения стесненной струи занимались многие ученые: В. В. Батурин и В. И. Ханжонков [7], Р. Н. Гобза [24], В. Н. Розенберг [65], Н. Н. Садовская [66], В. А. Бахарев и В. Н. Трояновский [9], А. И. Гусак [34], В. К. Бридько [10, 11, 12], Г. Н. Абрамович [2], И. А. Шепелев и М. Д. Тарнопольский [70, 76, 77], Б. В. Баркалов и Е. Е. Карпис [8, 14], В. А. Черных [75], М. И. Гримитлин и Г. М. Позин [26, 27], А. М. Гримитлин [28], Б. М. Павлов [58, 59], К. Ю. Лайгна [54, 55, 56], Н. Д. Черепнин и С. В. Поляков [74], Н. В. Акинчев [3], Г. А. Глебов [19÷23], М. Г. Кталхерман и Я. И. Харитонов [51], Р. Н. Шумилов [57, 79, 80], В. М. Уляшева [73], В. Р. Таурит [71], Ю. Р. Кареева [44], А. К. Меликов [89, 90, 91], W. Linke [86], H. Mullejans [92], D. Urbach [96], A. Mataoui [87, 88], P. Nielsen [85, 93, 94, 95], T. Karimipannah [82, 83] и другие.

В 1939 г. на различие в характере течения свободной и стесненной струй впервые указали **В. В. Батурин** и **В. И. Ханжонков** [7]. Проведенные ими исследования позволили установить качественную картину движения струи в

стесненных условиях, а также тот факт, что на некотором расстоянии от места подачи воздуха, присоединенные массы начинают отделяться от общего потока и возвращаться назад для питания струи.

В 1947 г. **Р. Н. Гобза** [24] проводил исследования воздушного отопления с сосредоточенной подачей воздуха. Исследования проводилось на моделях производственных помещения в масштабе 1:20 и 1:50. Приточный воздух подавался на разных высотах, температура подаваемого воздуха была такой же, как и в натуре. В результате опытов Р. Н. Гобза пришел к следующим выводам: подвижность воздуха в рабочей зоне увеличивается с увеличением угла наклона струи к горизонту, с увеличением скорости подачи воздуха, с уменьшением высоты расположения отверстия для подачи воздуха и с уменьшением значением коэффициента турбулентной структуры струи a . Коэффициент турбулентной структуры струи a [1] – эмпирическая константа, предложенная Г. Н. Абрамовичем, которая определяется для каждого конкретного вида приточного устройства в результате экспериментов.

В 1949 г. **В.Н. Розенбергом** [65] были опубликованы результаты исследований струи, подаваемой в тупик (модель представляла собой круглую трубу диаметром 309 мм и длиной 3000 мм, заглушенную с одного конца). В результате были описаны поля скоростей и давлений в различных сечениях, которые показали существенное отличие от параметров свободной струи.

В 1955 г. были опубликованы результаты лабораторных исследований изотермических струйных течений на моделях 1:3:3, 1:2:6, 1:3:6 и 1:6:12, которые проводила **Н.Н. Садовская** [66]. Отверстие истечения располагалось в непосредственной близости к ограждающей поверхности. На основе опытных данных построены профили скорости в продольных и поперечных сечениях и вычислены основные величины, характеризующие струю и обратный поток. Исследования позволили установить характер течения в условиях стеснения: струя развивается по закону свободной струи только в непосредственной близости от места истечения, где площадь ее поперечного сечения $F_{стр}$ по сравнению с площадью поперечного сечения помещения F_n мала; при достижении

площади струи 20-25% от F_n , струя меняет свой характер – первое критическое сечение; при достижении площади струи 40-42% от F_n струя перестает увеличиваться и начинает распадаться – второе критическое сечение. Также Н.Н. Садовской было установлено, что при отдалении приточного отверстия от ограждающей поверхности, струя перестает стремиться настигаться на нее лишь при высоте установки приточного отверстия на высоте $0,65h$ от высоты помещения h .

В период с 1957 по 1971 г. был опубликован ряд статей [86, 92, 96] зарубежных авторов W. Linke, H. Mullejans, D. Urbach, в которых приводятся результаты экспериментальных исследований течения стесненной струи в помещении при различном расположении приточного и вытяжного отверстий. В работах были определены качественные картины течения, но расчетных зависимостей получено не было.

В 1958 г. была опубликована книга **В.А. Бахарева** и **В.Н. Трояновского** [9], в которой приводятся результаты обширного эксперимента авторов по изучению стеснённой струи, а также обобщение результатов исследований Н.Н. Садовской и В.Н. Розенберга.

Экспериментальная установка авторов представляла собой шестнадцатигранную трубу с внутренним диаметром (вписанной окружности) 340 мм и длиной 2520 мм, заглушенную с одной стороны. В открытом конце трубы устанавливались приточные насадки диаметрами 4,2; 6,0; 11,9; 32,5; 62,0 и 100 мм.

Расстояние от истечения до точки измерения выражалось в безразмерном виде и рассчитывалось по формуле

$$x = \frac{a \cdot s}{\sqrt{0,5 \cdot F_n}}, \quad (1.1)$$

где $a = \frac{d_0}{s} \left(\frac{0.48V_0}{V_x} - 0.145 \right)$ – коэффициент турбулентной структуры [1];

s – расстояние от полюса струи (условной точки, в которой сходятся изотакси основного участка струи, характеризуемого подобием безразмерных скоростных полей) до рассматриваемого сечения при расстоянии от полюса струи до места истечения

$$h_0 = 0,145 \frac{d_0}{a}. \quad (1.2)$$

Расстояние от места истечения струи до места, где скорость струи становится равной скорости окружающего воздуха в помещении, называют дальностью струи. В.А. Бахаревым и В.Н. Трояновским было установлено, что относительная дальность (1.1) стесненных струй x_0 при $a = 0,07$ (коэффициент струи, истекающей из отверстия с равномерным профилем скорости) различная и зависит от размера приточного отверстия (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Дальность стесненной струи на относительных расстояниях

$\sqrt{F_n}/d_0$	71,5	50	25,2	9,24	4,84	2,44
x_0	0,411	0,412	0,502	0,568	0,650	0,681

В результате обработки экспериментальных данных В.А. Бахаревым и В.Н. Трояновским были выведены зависимости для определения различных параметров приточной струи и обратного потока. Приведем часть наиболее значимых для настоящих исследований формул:

- осевая скорость приточной стесненной струи

$$V_x^{cm} = V_0 \frac{1,41 \cdot A}{\frac{\sqrt{F_n}}{d_0} \bar{x}} \cdot e^{-0,01 \frac{\sqrt{F_n}}{d_0} \bar{x} - 14,45 \left(\frac{\sqrt{F_n}}{d_0} \right)^{0,25} \bar{x}^3}, \quad (1.3)$$

где $A = a \cdot \left(65 - 4,5 e^{-4,97 \frac{\sqrt{F_n} \bar{x}}{d_0}} \right)$ при $\bar{x} \leq \frac{1,41}{\frac{\sqrt{F_n}}{d_0}}$;

$$A = 6,5a \text{ при } \bar{x} \geq \frac{1,41}{\frac{\sqrt{F_n}}{d_0}};$$

- средняя скорость в обратном потоке

$$V_{обп}^{cp} = 0,177 \frac{d_0}{\sqrt{F_n}} \cdot (10\bar{x}) \cdot e^{10,7\bar{x} - 37\bar{x}^2}. \quad (1.4)$$

Во всех случаях максимальное значение скорости в обратном потоке находилось на относительном расстоянии $\bar{x} = 0,2$. Тогда:

- максимальная скорость в обратном потоке на расстоянии $\bar{x} = 0,2$

$$V_{обп}^{max} = 0,69 \cdot V_0 \frac{d_0}{\sqrt{F_n}}. \quad (1.5)$$

Необходимо отметить, что относительное расстояние \bar{x} (1.1), входящее в состав формулы (1.4), зависит от типа воздухораспределительного устройства, характеризуемого коэффициентом a . Следовательно, значение средней скорости в обратном потоке также зависит от a . При этом в формуле для определения максимальной скорости (1.5) после подстановки $\bar{x} = 0,2$ этой зависимости уже нет. Поэтому (1.5) можно использовать только при истечении приточного воздуха из отверстий с равномерным профилем скоростей.

По [9] скорость в обратном потоке практически равна нулю при $\bar{x} = 0,6 \div 0,65$.

В 1960 г. **Г.Н. Абрамович** предложил [2] аналитические формулы для расчета двух участков стесненной струи, истекающей в длинный тупик (влияние продольного стеснения исключалось), до начала разворота и после него:

- относительная осевая скорость $\bar{V}_x = \frac{V_x^{cm}}{V_0}$ плоской стесненной струи

$$\bar{V}_x = \sqrt{\frac{-0,45\bar{b}_0(1-\bar{V}_{обр})}{\bar{V}_{обр}(1-\bar{b}_0) \cdot (0,316 - 0,182\bar{V}_{обр} - 0,134\bar{V}_{обр}^2)}}, \quad (1.6)$$

где $\bar{b}_0 = \frac{b_0}{0,5h}$ – относительная высота;

b_0 – полувысота щелевого отверстия (или радиус круглого отверстия для осесимметричной струи);

$\bar{V}_{обр} = \frac{V_{обр}}{V_0} < 0$, причем $V_{обр}$ – величина переменная;

- относительная осевая скорость осесимметричной стесненной струи

$$\bar{V}_x = \sqrt{-0,258 \frac{\bar{b}_0^2}{1-\bar{b}_0} \cdot \frac{1-\bar{V}_{обр}}{\bar{V}_{обр}(0,14 - 0,02\bar{V}_{обр} - 0,118\bar{V}_{обр}^2)}}. \quad (1.7)$$

Расстояние от истечения до точки измерения выражалось в безразмерном виде и рассчитывалось по формуле

$$\bar{x} = \frac{x}{0,5h}. \quad (1.8)$$

Максимальный расход в прямом потоке плоской струи по Г.Н. Абрамовичу достигается на относительном расстоянии $\bar{x}_M = 4,5$, тогда безразмерные параметры струи

$$\bar{V}_{обрM} = -0,8; \quad (1.9)$$

$$\bar{V}_{xM} = 1,64 \sqrt{\frac{\bar{b}_0}{1-\bar{b}_0}}. \quad (1.10)$$

Максимальный расход в прямом потоке осесимметричной струи по Г.Н. Абрамовичу достигается на относительном расстоянии $\bar{x}_M = 4,25$, тогда безразмерные параметры струи

$$\bar{V}_{обрM} = -0,3; \quad (1.11)$$

$$\bar{V}_{xM} = \frac{2,92\bar{b}_0}{\sqrt{1-\bar{b}_0^2}}. \quad (1.12)$$

Необходимо отметить, что при выведении зависимостей Г.Н. Абрамовичем был сделан ряд существенных допущений. При этом в [2] приведено сравнение результатов, полученных по формулам, с экспериментальными данными из [65], которое продемонстрировало удовлетворительное совпадение.

В 1965 г. **И.А. Шепелев** и **М.Д. Тарнопольский** [76] предложили использовать «метод сдвига» для выявления аналитических зависимостей параметров стесненной струи (создаваемой точечным источником) и обратного потока, распространяемых в тупике. Источник располагался на полувысоте помещения. При этом тупик рассматривался такой длины, чтобы исключить влияние продольного стеснения на струю. Ими были получены следующие формулы:

- осевая скорость осесимметричной стесненной струи

$$V_x^{cm} = \frac{1}{\sqrt{\pi c}} \cdot \sqrt{\frac{I_0}{\rho}} \frac{1}{x} (1 - m), \quad (1.13)$$

где c – эмпирическая константа (постоянная Г. Рейхардта), характеризующая тип воздухораспределительного устройства. Для круглого отверстия $c=0,082$;

I_0 – начальный импульс струи;

ρ – плотность;

$$f = \frac{1 - e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{R}{cx}\right)^2}}{\frac{1}{2}\left(\frac{R}{cx}\right)^2} - \text{функция относительного расстояния } \left(x = \frac{x}{R}\right);$$

R – радиус цилиндрической трубы, имитирующей помещение, в которую подается приточный воздух;

- скорость в обратном потоке

$$V_{обп} = \frac{1}{\sqrt{\pi c}} \cdot \sqrt{\frac{I_0}{\rho}} \frac{1}{x} \left[e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{R}{cx}\right)^2} - f \right]; \quad (1.14)$$

- максимальная скорость в обратном потоке находится на расстоянии $x_{кр2} = 4,88R$ и определяется по формуле

$$V_{обп}^{max} = 0,656 \cdot \sqrt{\frac{I_0}{\rho \pi R^2}}. \quad (1.15)$$

В 1966 г. М.Д. Тарнопольский [70] также используя «метод сдвига» получил зависимости для расчета параметров плоской стесненной струи:

- осевая скорость плоской стесненной струи (формула получена путем преобразования формул (3), (6) и (8) из [70])

$$V_x^{cm} = \frac{\sqrt{2}\sqrt{c}}{\sqrt[4]{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{I_0}{\rho b_0}} \frac{1}{\sqrt{x}} \left(1 - \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}} n\right); \quad (1.16)$$

где $n = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{0,5h}{cx}\right)}{\frac{0,5h}{cx}}$ – функция относительного расстояния ($\bar{x} = \frac{x}{0,5h}$);

- скорость в обратном потоке (формула получена путем преобразования формул (3), (6) и (9) из [70])

$$V_{обп} = \frac{\sqrt{2}\sqrt{c}}{\sqrt[4]{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{I_0}{\rho b_0}} \frac{1}{\sqrt{x}} \left(e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{0,5h}{cx}\right)^2} - \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}} n\right); \quad (1.17)$$

- максимальная скорость в обратном потоке находится на расстоянии $x_{кр2} = 4,6 \cdot 0,5h$ и определяется по формуле

$$V_{обп}^{\max} = 0,77 \cdot \sqrt{\frac{I_0}{\rho b_0 \cdot 0,5h}}. \quad (1.18)$$

В 1966 г. И.А. Шепелев и М.Д. Тарнопольский [77] опубликовали результаты экспериментальных исследований, удовлетворительно согласующиеся с предложенными аналитическими формулами авторов [76].

М.И. Гримитлин и **Г.М. Позин** опубликовали в [26] результаты своих исследований стесненной струи. На основании полученных ими данных, а также в результате обобщения исследований других авторов [9] была разработана методика расчета воздухораспределения стесненными струями [27], которая наиболее часто используется в практике проектирования [15, 64].

Используя «метод сдвига», предложенный И.А. Шепелевым и М.Д. Тарнопольским, они аналитическим методом определили формулы для

расчета коэффициента стеснения, представляющего собой отношение осевой скорости в стесненной струе к соответствующей скорости в свободной струе

$K_c = \frac{V_x^{cm}}{V_x}$. Рассматривались струи, развивающейся в тупиковом и проточном

каналах [26]:

- коэффициент стеснения на основном участке осесимметричной тупиковой струи

$$K_c^T = 1 - w, \quad (1.19)$$

где $w = \frac{1 - \exp\left(\frac{-pF_n}{\pi}\right)}{\frac{pF_n}{\pi}};$

$$p = \frac{0,7}{x^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_{0,5v}};$$

- соотношение между коэффициентами стеснения тупиковой и проточной схем на основном участке осесимметричной струи

$$K_c^H = K_c^T + \frac{\pi}{4} \frac{1}{m} \frac{x}{\sqrt{F_n}} \frac{d_0}{\sqrt{F_n}}; \quad (1.20)$$

- соотношение между коэффициентами стеснения на начальном участке осесимметричной струи

$$K_c^H = K_c^T + \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_0}{\sqrt{F_n}} \right)^2; \quad (1.21)$$

- коэффициент стеснения на основном участке плоской тупиковой струи

$$K_c^T = 1 - 2.12 \frac{x}{h} \operatorname{tg} \alpha_{0.5v} \Phi \left(\frac{0.59}{\frac{x}{h} \operatorname{tg} \alpha_{0.5v}} \right); \quad (1.22)$$

- соотношение между коэффициентами стеснения на основном участке тупиковой струи

$$K_c^H = K_c^T + \frac{1}{m} \sqrt{\frac{b_0}{h}} \sqrt{\frac{x}{h}}; \quad (1.23)$$

- соотношение между коэффициентами стеснения на начальном участке тупиковой струи

$$K_c^H = K_c^T + \frac{b_0}{h}. \quad (1.24)$$

Также, используя «метод сдвига», авторами [26] была получена связь между средней скоростью в обратном потоке и скоростью на оси свободной струи

$$\frac{V_{обп}^{cp}}{V_x} = \frac{1 - w - w \ln w}{\frac{0.7 \sqrt{F_n / \pi}}{\operatorname{tg} \alpha_{0.5v}} + \ln w}. \quad (1.25)$$

Полученные зависимости удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными авторов [26].

Также было определено [26], что для незатенённых отверстий при определенных значениях отношения площади поперечного сечения помещения к линейному размеру отверстия можно не учитывать схему развития струи

(поточную или тупиковую). Для осесимметричных струй это соотношение

$$\frac{\sqrt{F_n}}{d_0} > 7, \text{ для плоских } - \frac{h}{b_0} > 80.$$

В [27] приводится следующее описание развитие стесненного струйного течения (рисунок 1.1). Струя развивается, как свободная, пока площадь ее поперечного сечения $F_{стр}$ не достигает 25% от площади поперечного сечения помещения F_n – первое критическое сечение $x_{кр1}$.

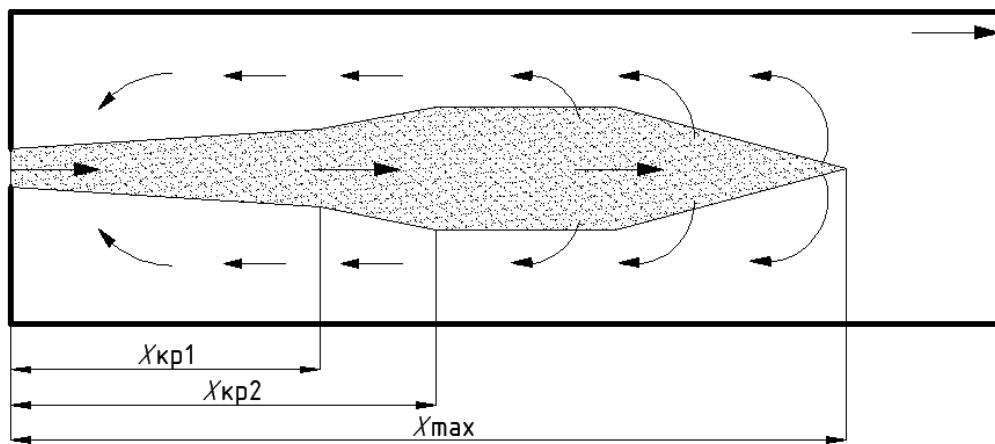


Рисунок 1.1. Схема приточной тупиковой стеснённой струи, предложенная М.И. Гримитлиным

Расстояние от выпускного устройства до первого критического сечения равно:

- для компактных (осесимметричных) струй

$$x_{кр1} = 0,22m\sqrt{F_n}; \quad (1.26)$$

- для плоских струй

$$x_{кр1} = 0,1m^2h. \quad (1.27)$$

После того, как площадь поперечного сечения струи займет 25% площади помещения, начинает сказываться стеснение струи: скорости падают быстрее, чем в свободной струе, замедляется прирост площади поперечного сечения и прирост расхода воздуха в ней. Когда струя займет приблизительно 40% площади поперечного сечения помещения (второе критическое сечение), начинают постепенно уменьшаться ее поперечные размеры, т.е. происходит постепенное затухание струи.

Расстояние от выпускного устройства до второго критического сечения равно:

- для компактных (осесимметричных) струй

$$x_{кр2} = 0,31m\sqrt{F_{II}}; \quad (1.28)$$

- для плоских струй

$$x_{кр2} = 0,15m^2h. \quad (1.29)$$

Дальнобойность струи определяется по следующим формулам:

- для компактных (осесимметричных) струй

$$x_{max} = 0,62m\sqrt{F_{II}}; \quad (1.30)$$

- для плоских струй

$$x_{max} = 0,3m^2h. \quad (1.31)$$

Как сказано в [26], когда струя настигается на перекрытие, расстояния $x_{кр1}$, $x_{кр2}$, x_{max} увеличиваются примерно в $\sqrt{2}$ раза.

Необходимо отметить, что описание развития струи и расчетные формулы (1.26÷1.31), как указано в [25], были получены в результате обработки экспериментальных данных [9], при этом вместо коэффициента турбулентной структуры a был введен кинематический коэффициент m , также являющийся характеристикой струи, формируемой конкретным типом воздухораспределительного устройства.

Кинематический коэффициент рассчитывается на основании данных, полученных в ходе натуральных экспериментов производителями воздухораспределительных устройств [33]

$$m = \frac{V_x}{V_0} \frac{x}{\sqrt{F_0}}. \quad (1.32)$$

Также существуют аналитические формулы для расчета коэффициента:

- формула И.А. Шепелева [78]

$$m = \frac{\theta\varphi}{\sqrt{\pi c}}, \quad (1.33)$$

где $\theta = \sqrt{\frac{T_\infty}{t_0 + 273,15}}$ – коэффициент, учитывающий различие температуры истекающего t_0 и окружающего T_∞ воздуха (для изотермических условий истечения $\theta = 1$);

φ – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скорости движения воздуха по площади приточного отверстия (в случае равномерного распределения скорости истечения по площади отверстия $\varphi = 1$);

- формула М.И. Гримитлина [27]

$$m = \sqrt{\frac{2 \ln(2)}{\pi}} \frac{\sqrt[4]{\zeta}}{\operatorname{tg}(\alpha_{0.5v})} \sqrt{\frac{T_{\infty}}{T_0}}, \quad (1.34)$$

где ζ – коэффициент местного сопротивления.

Связь между коэффициентом турбулентной структуры и кинематическим коэффициентом можно представить в виде $m \approx \frac{0,48}{a}$.

В [27] указывается, что максимальная скорость в обратном потоке располагается во втором критическом сечении и рассчитывается по следующим формулам:

- максимальная скорость в обратном потоке для компактных (осесимметричных) струй

$$V_{обп}^{\max} = 0,78 \cdot V_0 \sqrt{\frac{F_0}{F_n}}; \quad (1.35)$$

- максимальная скорость в обратном потоке для плоских струй

$$V_{обп}^{\max} = 0,75 \cdot V_0 \sqrt{\frac{b_0}{h}}. \quad (1.36)$$

Формула (1.35) получена путем преобразования формулы (1.5): диаметр воздухораспределителя d_0 заменен на линейный размер его площади $\sqrt{F_0}$ [25]. Как было указано выше, формула (1.5) предназначена для расчета воздухораспределения струй, истекающих только из незатененных отверстий.

В методике [27] присутствует формула для определения максимального перепада температур в обратном потоке компактных (осесимметричных) струй

$$\Delta t_{обр} = 1,4 \Delta t_0 \sqrt{\frac{F_0}{F_n}}. \quad (1.37)$$

Формула (1.37) была получена **А.М. Гримитлиным** [28] аналитическим способом с использованием принципов построения приближенной математической модели теплофизических процессов, разработанных Г.М. Позиным [60]. Полученные в работе [28] аналитические зависимости были подтверждены экспериментальными исследованиями на модели помещения и в производственных цехах.

В справочнике [15], в Главе 17, написанной М.И. Гримитлиным и Г.М. Позиным, приводится методика расчета приточной неизотермической стесненной струи.

Учитывая, что неизотермическая струя подвергается влиянию сил гравитации, авторами предлагается вначале рассчитывать траекторию струи по формуле

$$y = \pm \frac{x^3}{3H^2}. \quad (1.38)$$

В формуле (1.38) знак «плюс» соответствует подаче теплого воздуха, знак «минус» – подаче холодного воздуха.

Геометрическая характеристика H определяется по формулам:

- для компактных, конических и веерных струй

$$H = \frac{\sqrt{T_\infty} \cdot m \cdot V_0 \cdot \sqrt[4]{F_0}}{\sqrt{n \cdot \Delta t_0 \cdot g}}; \quad (1.39)$$

- для плоских струй

$$H = \sqrt[3]{b_0 \cdot T_\infty^2 \frac{(m_1 \cdot V_0)^4}{(n_1 \cdot \Delta t_0 \cdot g)^2}}. \quad (1.40)$$

Расчет максимальной скорости приточной струи и избыточной температуры в струе предлагается производить по формулам

$$V_x = \frac{m \cdot V_0 \cdot \sqrt{F_0}}{x} K_c \cdot K_n; \quad (1.41)$$

$$\Delta t_x = \frac{n \cdot \Delta t_0 \cdot \sqrt{b_0}}{\sqrt{x}} \frac{1}{K_c \cdot K_n}, \quad (1.42)$$

где K_c – коэффициент стеснения (1.20) (1.21), (1.23), (1.24);

K_n – коэффициент неизотермичности.

Коэффициент неизотермичности K_n определяется по формуле

$$K_n = \sqrt{1 \pm \left(\frac{x}{H}\right)^4}. \quad (1.43)$$

В формуле (1.43) знак «плюс» соответствует подаче теплого воздуха, знак «минус» – подаче холодного воздуха.

Необходимо отметить, что (1.38) и (1.43) были получены из следующих формул И.А. Шепелева [78] путем подстановки $\alpha=0^\circ$ в:

- формулу для определения траектории наклонной струи

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \alpha \pm \frac{x^3}{3H^2 \cos^3 \alpha}; \quad (1.44)$$

- формулу для определения осевой скорости неизотермической наклонной струи

$$V_x = \frac{mV_0\sqrt{F_0}}{x} \cos(\alpha) \cdot \sqrt{\cos^2(\alpha) + \left[\pm \sin(\alpha) \pm \left(\frac{x_g}{H \cdot \cos(\alpha)} \right)^2 \right]^2}. \quad (1.45)$$

Приведенные формулы (1.44), (1.45) были получены И.А. Шепелевым аналитическим способом для свободных струй. Подтверждение адекватности расчета по данным формулам для стесненных струй не приводится.

В работе **Н.Д. Черепнина** и **С.В. Полякова** [74] приведены результаты исследования стеснённой струи, проведенного на стенде по своим габаритам соответствующем модели помещения в [9]. В ходе натурного эксперимента были произведены замеры скоростей в прямом и обратном потоках. Результаты эксперимента представлены в безразмерном виде: $\bar{V}_x = f(x)$, $\bar{F}_x = f(x)$ $\bar{L}_x = f(x)$.

Эта же задача была решена аналитически. В результате решения получены формулы для определения продольной компоненты скорости по длине канала, ширины струи, расхода в её активной части, давления. Для апробации результатов, полученных аналитически, проведено сравнение основных характеристик с опытными данными. Отмечено, что результаты расчёта и эксперимента хорошо согласуются на основном участке. Отличие наблюдается в зоне, где струя занимает всю ширину канала, что объясняется погрешностями, связанными с трудностью измерений малых скоростей.

В период с 1981 по 1985гг. **Г.А. Глебов** в соавторстве с А.Н. Щелковым и В.Н. Петровым публикует ряд статей [19, 20, 21, 22, 23], в которых приводятся результаты аналитического решения для изотермической и неизотермической осесимметричной и плоской струи. Рассмотрены разные варианты течений: струя в проточном и тупиковом канале [19, 20, 21], струя в спутном потоке [22] и неизотермическая струя [23]. Решение приводится с использованием интегральных методов расчёта. Возможность применения такого подхода для расчёта задач о струйных течениях в ограниченном пространстве была продемонстрирована А.С. Гиневским [18].

Авторами выведена система из пяти дифференциальных уравнения, содержащая пять неизвестных, для расчета осевой скорости, профиля и других параметров стесненной струи.

Как отмечают сами авторы, данный метод решения возможен только для расчёта течения в пределах дальнобойности струи в длинном канале. За пределами дальнобойности струи расчёт может дать неверные результаты из-за образования вихрей малой интенсивности.

Р.Н. Шумилов в [79] предлагает свою методику расчета воздухораспределения стесненными струями, разработанную на базе натурных исследований [9], собственных натурных исследований [57, 80] и методики [27].

Схема течения стесненной струи по [79], полученная в результате обработки данных [9]: на участке до x_1 струя расширяется как свободная и занимает около 35 % площади поперечного сечения помещения; на участке между x_1 и x_2 расширение струи уменьшается из-за встречного потока воздуха и составляет до 38 % площади помещения, но подмешивание окружающего воздуха продолжается; после x_2 начинается отсоединение части воздуха от струи; до конца участка x_3 практически площадь струи не изменяется; после этого площадь струи начинает уменьшаться, и к концу участка x_4 струя распадается (рисунок 1.2).

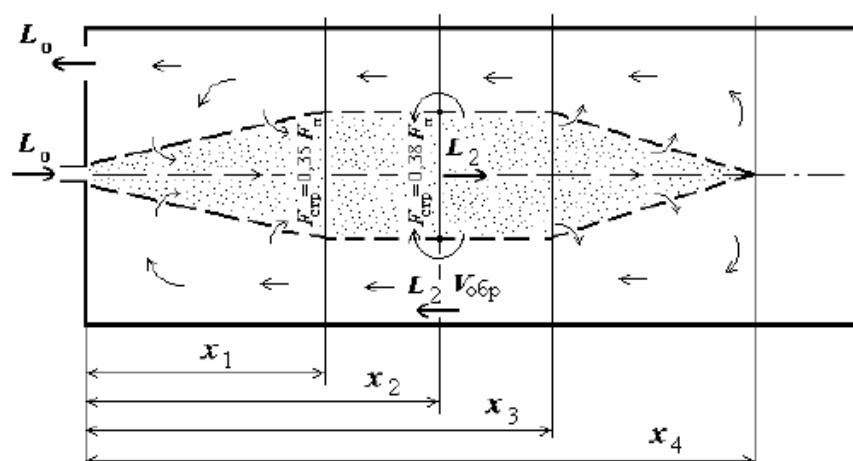


Рисунок 1.2. Схема приточной стеснённой тупиковой струи, предлагаемая Р.Н. Шумиловым

Несмотря на то, что описание схем распространения стесненной струи в [27] и [79] получено в результате обработки одного и того же эксперимента [9], в

них присутствует различие в проценте площади занимаемой струей по отношению к площади поперечного сечения помещения, а также наличии еще одного критического сечения (x_3) в схеме по [79].

Расстояние до критических сечений по [79] определяется по формуле

$$x_i = \bar{x}_i m \sqrt{F_n}, \quad (1.46)$$

где \bar{x}_i - относительное расстояние.

Относительные расстояния, полученные в результате обработки натурального эксперимента [9], представлены в таблице 1.2.

В таблице 1.2 $\bar{x}_{нач}$ – начальный участок струи, при этом для $\sqrt{F_n} / d_0 = 2,44$ выделенные цветом значения также относятся к начальному участку струи.

Представленные в таблице данные свидетельствуют о том, что значения \bar{x}_1 и \bar{x}_2 в среднем составляют 0,25 и 0,32 соответственно, что согласуется с (1.26) и (1.28). Положение критических сечений \bar{x}_3 и \bar{x}_4 зависит от параметра $\sqrt{F_n} / d_0$, т.е. от размера воздухораспределителя, что противоречит (1.30).

Таблица 1.2 – Относительные расстояния до критических сечений

$\sqrt{F_n} / d_0$	Относительное расстояние \bar{x}_i				
	$\bar{x}_{нач}$	\bar{x}_1	\bar{x}_2	\bar{x}_3	\bar{x}_4
2,44	0,25	0,13	0,24	0,73	1,0
4,84	0,18	0,26	0,33	0,64	0,76
9,24	0,05	0,24	0,30	0,42	0,61
25,2	0,03	0,25	0,35	0,40	0,58
50	0,02	0,245	0,32	0,40	0,59
71,5	-	0,25	0,32	0,40	0,53

Для расчета осевой скорости стесненной струи Р.Н. Шумиловым также, как и М.И. Гримитлиным, предлагается использовать коэффициент стеснения $K_c = \frac{V_x^{cm}}{V_x}$. В таблице 1.3 приведены коэффициенты стеснения, определенные Р.Н. Шумиловым по данным работы [9].

Таблица 1.3 – Коэффициент стеснения K_c для компактной тупиковой струи

$\frac{F_0}{F_n}$	Относительное расстояние \bar{x}										
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
до 0,0012	1	1	1	1	1	1	1	–	–	–	–
0,0092	1	1	0,78	0,62	0,35	0,25	0,21	–	–	–	–
0,034	1	1	1	1	0,89	0,67	0,23	0,17	–	–	–
0,13	1	1	1	1	1	1	0,76	0,54	0,31	0,24	0,20

Анализируя данные, приведенные в таблице 1.3, Р.Н. Шумилов делает вывод, что ограждающие конструкции помещения не оказывают влияние на осевую скорость при $\frac{F_0}{F_n} \leq 0,0012$, а также на относительном расстоянии $\bar{x} = 0,2 \div 0,6$ в зависимости от $\frac{F_0}{F_n}$.

Для компактной тупиковой струи относительное расстояние от истечения \bar{x}_0 , на котором струя не испытывает стеснения ($K_c=1$), определяется соотношением

$$\bar{x}_0 = 1,5 \frac{F_0^{0,4}}{F_n} . \quad (1.47)$$

На участке струи $\bar{x} > \bar{x}_0$ коэффициент стеснения для компактной тупиковой струи можно определить по полученной автором эмпирической формуле

$$K_c^T = 0,9 + 2,5(\bar{x} - \bar{x}_0)^2 - 2,7(\bar{x} - \bar{x}_0). \quad (1.48)$$

Для остальных видов струй коэффициенты стеснения предлагается определять по формулам:

- для веерной тупиковой струи

$$K_c^T = 1 - 0,3 \sqrt{\frac{h - h_{p3}}{F_n}}; \quad (1.49)$$

- для плоской тупиковой струи

$$K_c^T = 1,09 - \frac{1,19x}{m^2 h}; \quad (1.50)$$

- для компактной проточной струи

$$K_c^{\Pi} = K_c^T + 0,9 \frac{L_{\text{кон}} x \sqrt{F_0}}{L_0 m F_n}; \quad (1.51)$$

где $L_{\text{кон}}$ – расход воздуха, удаляемого из помещения в конце развития струи, м³/ч;

- для плоской проточной струи

$$K_c^{\Pi} = K_c^T + 0,9 \frac{L_{\text{кон}} x \sqrt{x b_0}}{L_0 m h}. \quad (1.52)$$

Определять скорость в обратном потоке автор предлагает по (1.35), перепад температур по (1.37).

В 1996 г. была представлена работа **Taghi Karimipannah** [82], в которой отражены результаты исследований стесненной настилающей струи с помощью

натурного эксперимента и численного моделирования в программе TEACH. Модель исследования представляла собой помещение с постоянным поперечным сечением, но переменной длиной: «длинное» помещение с открытыми торцевыми стенками; «длинное» помещение с открытой стенкой, расположенной напротив воздуховыпускного отверстия; помещение – тупик длиной $L=2h$, $L=4h/3$, $L=2h/3$, $L=h$ и др. Струя истекала из щелевого отверстия длиной равной ширине помещения, высота отверстия – варьировалась.

Taghi KarimipanaH делает вывод о том, что струя развивается в помещениях кардинально по-разному: в «длинном» помещении ($L=4h$) струя рассеивается, не достигая противоположной стены, вдоль пола создается рециркуляционный поток, подпитывающий струю; в «коротком» помещении ($L=2h$, $L=h$) струя настигает на противоположную стенку и опускается по ней к полу, вдоль которого продолжает свое распространение в направлении противоположном истечению.

В результате натурных исследований получены графики зависимости скорости в стесненной струе от длины помещения.

Для помещения $L=2h$ приведены профили скорости в обратном потоке на различных расстояниях от истечения. Анализируя их, автор делает вывод о том, что максимальные значения скорости в обратном потоке находятся на расстоянии $5/6L$ от истечения. Данный вывод не согласуется с описанием характера развития струи других авторов [9, 27, 79], но при этом следует учитывать, что приточная струя истекает в «короткое» помещение, поэтому не успевает полностью развиться и рассеяться.

Taghi KarimipanaH делает вывод, что скорость в обратном потоке зависит от высоты щелевого отверстия, длины помещения и скорости истечения, но при этом не зависит от поперечного размера помещения, что не согласуется с результатами большинства исследований [9, 27, 65, 66, 79]. Для расчета максимальной скорости у пола автор предлагает использовать формулу P.V. Nielsen

$$V_{обp} = K_p K_{rm} V_0 \sqrt{\frac{b_0}{L + x_0}}, \quad (1.53)$$

где K_p , K_{rm} – эмпирические константы;

x_0 – расстояние от истечения до ядра струи [2].

В диссертации **Ю.Р. Кареевой** [44] представлены исследования стесненных струй, выполненные с помощью численного моделирования. Автор исследовал осесимметричную и плоскую струи, истекающие из отверстий или точечных источников в тупик разной длины. Длина тупика l выбиралась таким образом, что исследуемые области представляли собой: «длинный» тупик (дальнобойность струи x_0 была значительно меньше l), «средний» тупик ($x_0 \approx l$) и «короткий» тупик ($x_0 < l$). В качестве исходных данных для «длинного» тупика были использованы размеры области исследования и кинематические параметры струи из натурального эксперимента [9]. Следует отметить, что все расчеты проводились на двумерной области. На основании полученных результатов разработана методика расчета воздухораспределения для осесимметричных и плоских струй.

В работе [44] предлагается рассматривать только два критических сечения струи: \bar{x}_1 – относительное расстояние ($\bar{x}_1 = \frac{x}{R}$ – для компактной струи, $\bar{x}_1 = \frac{x}{0,5h}$ – для плоской струи), до которого идет увеличение площади струи и за которым начинается зона разворота струи; \bar{x}_0 – относительная дальнобойность струи.

Расчетные формулы для определения первого критического сечения:

- для осесимметричных струй

$$\bar{x}_1 = 176,6\bar{r}_0^3 - 118,5\bar{r}_0^2 + 16,9\bar{r}_0 + 2,2; \quad (1.54)$$

- для плоских струй

$$x_1 = 2,48 - 6,924\bar{b}_0, \quad (1.55)$$

где $\bar{r} = r/R$ – относительный параметр стеснения;

r – радиус воздухораспределителя;

R – радиус помещения;

$\bar{b}_0 = b_0/h$ – относительный параметр стеснения.

Дальнобойность струи определяется по следующим формулам:

- для осесимметричных струй

$$x_0 = 97\bar{r}_0^3 - 76\bar{r}_0^2 + 19,1\bar{r}_0 + 5,5; \quad (1.56)$$

- для плоских струй

$$x_0 = 6,03 - 5,021\bar{b}_0; \quad (1.57)$$

Скорость в прямом и обратном потоках автор предлагает определять с помощью графиков (рисунок 1.3÷1.4), представляющих собой зависимость безразмерных характеристик $k_u = \frac{V_x^{cm}}{V_x}$ (рисунок 1.3) и $k_{u^{обp}} = \frac{V_x^{обp}}{V_x}$ (рисунок 1.4) от относительного расстояния \bar{x} ($\bar{l} = 14,82$ – «длинный» тупик, $\bar{l} = 4,82$ – «средний» тупик, $\bar{l} = 2,94$ – «короткий» тупик). При этом можно заметить, что k_u для прямого потока соответствует коэффициенту стеснения K_c в [27] и [79].

Представленные графики (рисунок 1.3÷1.4) получены по результатам численного моделирования плоской струи, но автор утверждает, что их возможно использовать и для расчета осесимметричных.

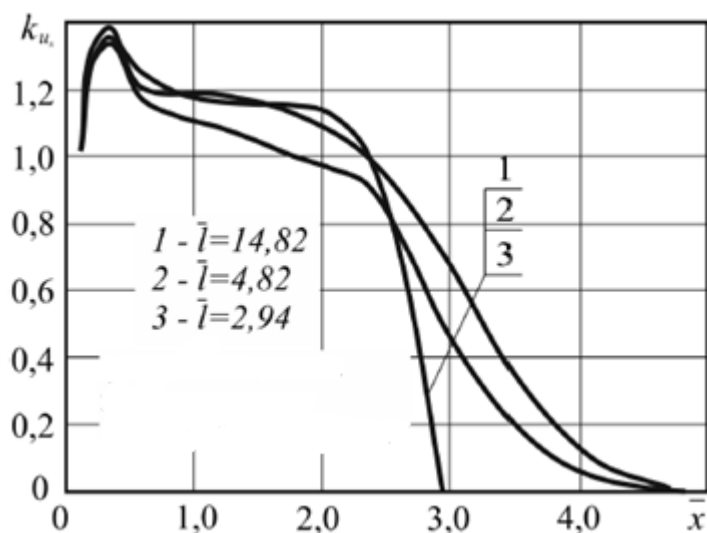


Рисунок 1.3 – Изменение относительной максимальной скорости в прямом потоке

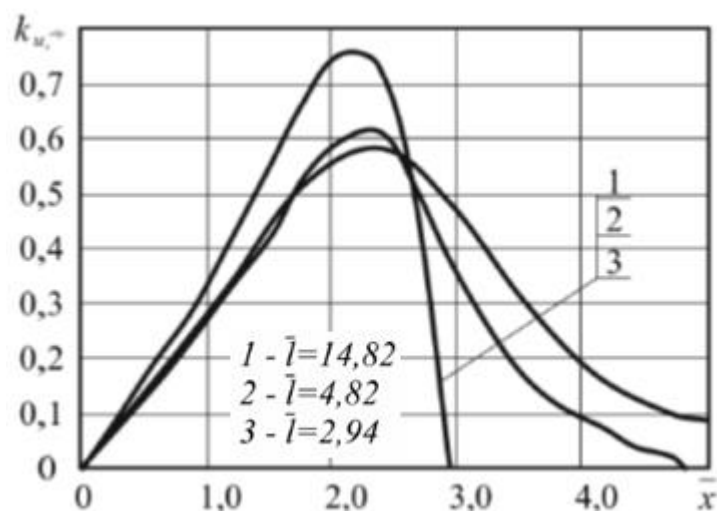


Рисунок 1.4 – Изменение относительной максимальной скорости в прямом потоке

На основании полученных зависимостей (рисунок 1.4) автор подчеркивает, что максимальные значения скорости в обратном потоке находятся на расстоянии $\bar{x} = 0,2$. Учитывая кардинально различный характер течения свободной приточной струи и обратного потока (скорость на основном участке свободной струи монотонно убывает, а скорость в обратном потоке имеет максимум в определенном сечении и минимальные значения в начальном и в конечном сечениях), вызывает сомнение адекватность представления скорости в обратном

потоке через параметр $k_{иобр}$ в целом и вывод о максимальных значениях скорости в обратном потоке на $\bar{x} = 0,2$ в частности.

1.2 Анализ методов расчета параметров стесненной струи и обратного потока

Произведённый обзор позволяет выделить некоторые исследования, результаты которых наиболее широко применяются в практике проектирования систем вентиляции: натурный эксперимент и полученные формулы В.А. Бахарева и В.Н. Трояновского [9], аналитические исследования И.А. Шепелева и М.Д. Тарнопольского [70, 76, 77], аналитические исследования М.И. Гримитлина и Г.М. Позина [26], аналитические и натурные исследования А.М. Гримитлина [28], исследования Р.Н. Шумилова [79], также следует отметить работу Ю.Р. Кареевой [44], которая вошла в [42, 43, 63].

Для сравнения предлагаемых вышеупомянутыми авторами методик, проанализируем их по способам расчета геометрических и кинематических параметров стесненной струи (СТ) и обратного потока (ОП).

Дальнобойность приточной струи

По [9] дальнобойность струи определяется по таблице 1.1 и зависит от: поперечного стеснения струи $\sqrt{F_n}/d_0$, типа воздухораспределителя (ВР), характеризуемого коэффициентом a , но не зависит от скорости истечения струи V_0 .

В формуле (1.30) из [26], полученной в результате обработки данных [9], демонстрируется, что дальнобойность струи также зависит от типа ВР (но характеризуемого коэффициентом m), линейного размера помещения $\sqrt{F_n}$ и не зависит скорости на истечении V_0 и размера ВР.

По [79] дальнобойность можно определить по формуле (1.46), которая полностью соответствует (1.30). При этом в таблице 1.2 приведены значения

дальнобойности для конкретных случаев в зависимости от параметра $\sqrt{F_n}/d_0$, что противоречит предлагаемой автором формуле (1.46), в которой этой зависимости нет.

В работе [44] дальнобойность (1.54) зависит только от параметра поперечного стеснения $\bar{r} = r/R$.

В итоге все авторы однозначно сходятся на том, что дальнобойность струи зависит от линейного размера помещения $\sqrt{F_n}$ (или R) и не зависит от V_0 . Зависимость от таких параметров, как: тип ВР, размер ВР, продольное стеснение – требует уточнения.

Высота установки ВР

Большинство исследований СТ и ОП, кроме работы [66], было произведено при условии установки ВР либо на полувысоте помещения, либо непосредственно под потолком. Поэтому в предлагаемых методиках расчетные зависимости справедливы для установки ВР на полувысоте помещения. В [27] сказано, что при установке ВР выше $0,85h$ дальнобойность струи и расстояние до критических сечений увеличивается в $\sqrt{2}$ раза вследствие возникающего эффекта Коанда.

В итоге остается неизученным вопрос влияния высоты установки ВР в промежутке $0,5 < h < 1$ на геометрические и кинематические параметры СТ и ОП.

Осевая скорость стесненной струи

Большинство авторов приводят формулы для расчета осевой скорости СТ в виде скорости свободной струи, скорректированной коэффициентом стеснения K_c . При этом K_c каждый автор предлагает рассчитывать по-своему в зависимости от ряда отличающихся параметров. Для сравнения и анализа результатов расчета по формулам различных авторов, приведем пример расчета осевой скорости по формулам (1.3), (1.13), (1.19-1.20), (1.48), (рисунок 1.3) для одних и тех же исходных данных. Результат расчета представлен в графическом виде на рисунке

1.5. Коэффициенты стеснения, рассчитанные по формулам (1.19-1.20), имеют одинаковые значения, в связи с чем на графике представлена одна общая кривая.

Исходные данные для расчетов: длина помещения $a = 30$ м, ширина помещения $b = 8$ м, высота помещения $h = 8$ м, размеры приточного отверстия $a_0 \times b_0 = 400 \times 400$ мм, скорость воздуха на истечении $V_0 = 10$ м/с, высота установки приточного отверстия $h_0 = 4$ м.

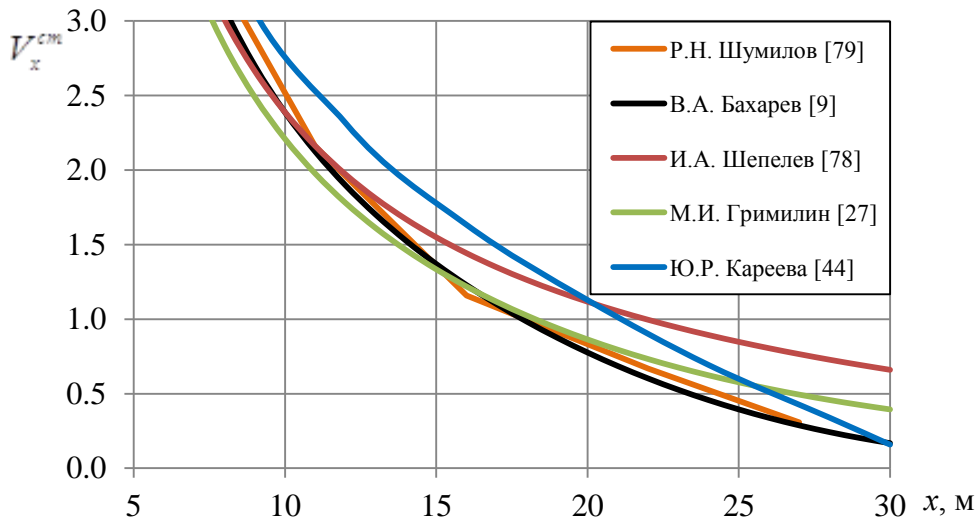


Рисунок 1.5 – Осевая скорость стесненной струи

Анализ полученных результатов (рисунок 1.5) позволяет сделать вывод: расчет осевой скорости по формулам рассматриваемых авторов приводит к существенно различающимся значениям, в некоторых сечениях скорость отличается в 3 раза.

Учитывая тот факт, что формулы (1.3) и (1.48) получены по экспериментальным данным [9], кривые, построенные по ним, хорошо согласуются. При этом стоит отметить, что расчет по формуле (1.48) значительно проще, что удобнее для применения в практике проектирования. Также существует возможность воспользоваться таблицей 1.3, вместо (1.48).

Так как зависимость В.А.Бахарева получена на основании экспериментальных данных, а формулы И.А.Шепелева и М.И.Гримилина

выведены аналитическим способом с рядом допущений, для дальнейших исследований будем опираться на расчетную формулу (1.48) и таблицу 1.3.

Максимальная скорость в обратном потоке

Некоторые авторы предлагают расчетные формулы для определения как максимальной, так и средней скорости в обратном потоке. Но, учитывая тот факт, что в нормативных документах регламентируется только значение максимальной скорости [67], анализировать расчетные формулы для средней скорости представляется нецелесообразным.

На сегодняшний день существует две наиболее часто используемые формулы для определения максимальной скорости ОП (1.15) и (1.35), которая была получена путем преобразования (1.5). Если в (1.15) раскрыть значение начального импульса, то получим

$$V_{обп}^{max} = 0,656 \cdot V_0 \sqrt{\frac{F_0}{F_n}}. \quad (1.58)$$

Полученная формула (1.58) и (1.35) отличаются только числовыми коэффициентами, разница между которыми составляет $\approx 20\%$, следовательно, и результаты расчета по ним будут отличаться на $\approx 20\%$. Обе формулы свидетельствуют о зависимости максимальной скорости в ОП от скорости на истечении (или от начального импульса) и от параметра поперечного стеснения.

Необходимо отметить, что формулы были выведены для расчета струй, истекающих из незатененных отверстий. Учитывая, многообразие производимых на сегодняшний день воздухораспределителей, которые используются для подачи приточного воздуха стесненными струями, необходимо проверить адекватность расчета по формулам (1.15) и (1.35) для различных видов ВР.

Также необходимо отметить, что (1.15) и (1.35) были выведены при условии истечения струи в «длинный» тупик с полувысоты помещения, т.е. при расчете не учитывается продольное стеснение струи и высота установки ВР.

Тупиковая и проточная схемы течения

Большинство исследований производилось при подаче приточной струи в «длинный» тупик. В работе [27] приводятся коэффициенты стеснения, как для тупиковой, так и для проточной схемы, при этом при расчете конкретного примера (см. выше) были получены практически одинаковые значения коэффициентов. Автор исследований [44] утверждает, что существенного различия между тупиковой и проточной схемой не наблюдается.

Необходимо подтвердить или опровергнуть влияние схемы течения стесненной струи на ее параметры и формируемый обратный поток.

1.3 Выводы по главе 1

1. В практике проектирования нет нормативно утвержденной методики расчета воздухораспределения стесненной струей и обратным потоком, при этом существует несколько методик различных авторов [9, 27, 44, 78, 79], результаты расчета по которым существенно отличаются друг от друга.

- Необходимо провести исследование с помощью современных способов проведения экспериментов – численного моделирования, и установить влияние на геометрические и кинематические параметры струй, в частности на максимальную скорость в обратном потоке, с минимальными допущениями и предпосылками таких факторов как: продольное стеснение, положение вытяжного устройства относительно приточного, высота установки приточного устройства, тип воздухораспределительного устройства.

3. На основании полученных результатов (п.2) необходимо усовершенствовать методы расчета воздухораспределения в помещениях стесненными струями.

ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Постановка задач исследований

Для реализации поставленной цели: усовершенствования методов воздухораспределения стесненными струями – была поставлена задача произвести экспериментальное исследование с помощью численного моделирования с минимальными упрощениями и допущениями.

Численное моделирование широко используется при исследованиях воздухораспределения в помещениях различных назначений [13, 35, 36, 38, 39, 52, 53]. При этом результат численных расчетов во многом определяется используемыми параметрами моделирования [29, 61, 72]. Поэтому на первом этапе для подтверждения возможности адекватного использования численного моделирования определялись параметры и модели турбулентности, приемлемые для численного экспериментального исследования вентиляционных струйных течений. С этой целью были произведены натурные эксперименты и аналогичные им численные моделирования для трех видов воздухораспределительных устройств ДКУ, ДПУ-К и РВР, производства завода «Арктос» [16], формирующих различные виды струй, и трех моделей турбулентности.

Диффузор ДКУ

Для формирования веерной настилающейся на прилегающую поверхность струи был выбран многоконусный диффузор ДКУ 315 (рисунок 2.1). Диффузор состоит из внешнего корпуса и подвижной внутренней вставки, при положении которой заподлицо с корпусом, формируется веерная струя. Диаметр подводящего патрубка диффузора $d_n = 315$ мм, диаметр внешнего корпуса $D_k = 633$ мм. В качестве расчетной площади для определения кинематического

коэффициента m использовалась площадь подводящего патрубка $F_0 = F_{\text{п}} = 0,078 \text{ м}^2$.

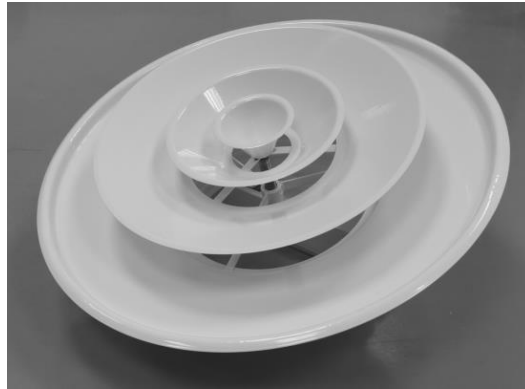


Рисунок 2.1 – Диффузор ДКУ

Диффузор ДПУ-К

Для формирования конической смыкающейся струи был использован диффузор ДПУ-К 125 (рисунок 2.2), который также состоит из внешнего корпуса и подвижной внутренней вставки. При выдвинутом положении внутренней вставки на расстояние $b = 2 \text{ Змм}$ от корпуса диффузора, формируется коническая смыкающаяся струя. Диаметр подводящего патрубка диффузора $d_n = 125 \text{ мм}$. В качестве расчетной площади для определения кинематического коэффициента m использовалась площадь подводящего патрубка $F_0 = F_{\text{п}} = 0,012 \text{ м}^2$.



Рисунок 2.2 – Диффузор ДПУ-К

Рециркуляционный воздухоораспределитель РВР

С целью численного исследования взаимодействия струй было принято решения о проведении испытаний рециркуляционного воздухоораспределителя РВР (рисунок 2.3), который состоит из двух независимых приточных устройств: диффузора ДПУ-К (поз.3) и панели с пластиковыми турбулизирующими ячейками (поз.4). На истечение из воздухоораспределителя происходит формирование приточной струи путем слияния приточного воздуха из диффузора и рециркуляционного воздуха из пластиковых ячеек.

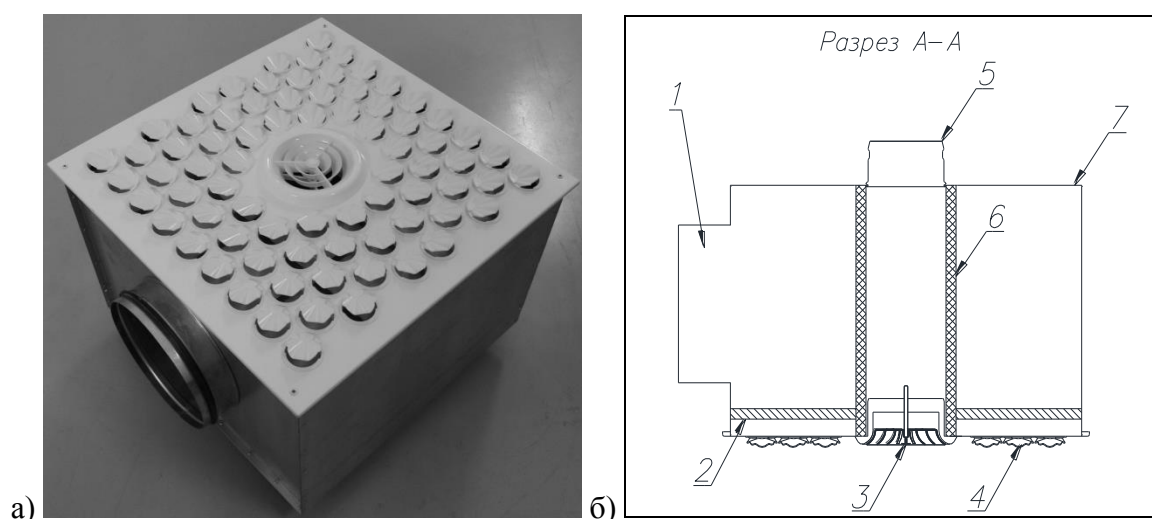


Рисунок 2.3 – Рециркуляционный воздухоораспределитель РВР

а – фотография; б – разрез

1 – патрубок рециркуляционного воздуха; 2 – воздушный фильтр; 3 – диффузор ДПУ-К;
4 – лицевая панель с турбулизирующими ячейками; 5 – патрубок приточного воздуха;
6 – теплоизоляция; 7 – камера статического давления

Диаметр подводящего патрубка (поз.5) диффузора ДПУ-К $d_{n1} = 125$ мм. Внутренняя подвижная вставка установлена заподлицо с корпусом $b = 0$ мм, что способствует формированию веерной струи. Размер панели (поз.4) с пластиковыми ячейками 595×595 мм. Турбулизирующие ячейки повернуты радиально (рисунок 2.4) для получения веерной настилающейся струи. Диаметр подводящего патрубка рециркуляционного воздуха $d_{n2} = 250$ мм. В качестве расчетной площади для определения кинематического коэффициента m использовалась площадь поперечного сечения камеры $F_0 = 0,303$ м².

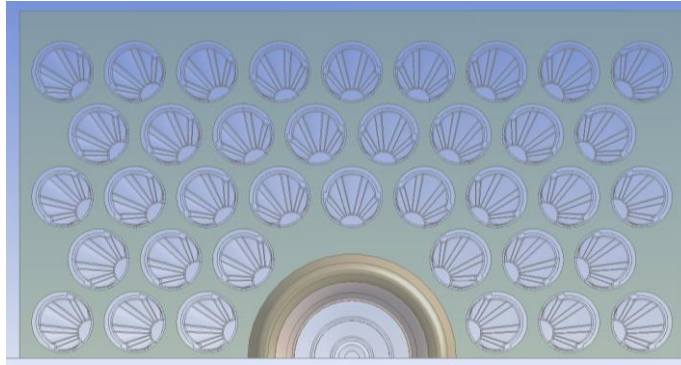


Рисунок 2.4 – Схема поворота ячеек

2.2 Математические модели, использованные при проведении численных расчетов

Все численные исследования в рамках данной работы были проведены с помощью пакета ANSYS CFX (бессрочная лицензия ООО «Арктос»).

Как и во всех других CFD-пакетах, в ANSYS CFX основой для расчета турбулентных течений являются осредненные по Рейнольдсу уравнения движения Навье-Стокса [81]:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_i}, \quad (2.1)$$

где $R_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$ тензор Рейнольдсовых напряжений.

Для замыкания уравнения движения ANSYS CFX содержит в себе широкий спектр разнообразных полуэмпирических моделей турбулентности, которые осуществляют связь между тензором Рейнольдсовых напряжений и параметрами осредненного течения. В настоящей работе использовались три модели турбулентности: «стандартная» k - ε модель, «стандартная» модель k - ω и модель SST [29, 36, 45, 81, 93].

Двухпараметрическая «стандартная» k - ε модель

Наиболее популярной при решении задач струйных течений в вентиляции является хорошо зарекомендовавшая себя двухпараметрическая «стандартная» высокорейнольдсовая k - ε модель турбулентности [81]. Эта модель включает два дифференциальных уравнений для переноса характеристик турбулентности:

- уравнение переноса кинетической энергии турбулентности k

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb}; \quad (2.2)$$

- уравнение диссипации ε кинетической энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{sb}); \end{aligned} \quad (2.3)$$

где k — кинетическая энергия турбулентности;

ε — скорость диссипации кинетической энергии турбулентности;

μ_t — турбулентная вязкость;

$C_{\varepsilon 1}=1,44$, $C_{\varepsilon 2}=1,92$, $\sigma_k=1$, $\sigma_\varepsilon=1,3$ — полуэмпирические коэффициенты.

Двухпараметрическая «стандартная» k - ω модель

«Стандартная» модель k - ω , разработанная Уилкоксом, разрабатывалась и рекомендуется для расчета пристеночных течений [81]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb}; \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + a \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + P_{\omega b}, \quad (2.5)$$

где $\beta'=0,09$, $\alpha=5/9$, $\beta=0,075$, $\sigma_k=2$, $\sigma_\omega=2$.

Модель Shear Stress Transport

Гибридная модель Ментера ShearStressTransport (SST) включает в себя две модели: «стандартную» k - ε и модифицированную k - ω [81]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta^* \rho k \omega; \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + a \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + (1 - F_1) \rho \frac{2}{\sigma_\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Для реализации двух зональности, модель SST содержит специальную функцию F_1 , которая у поверхности имеет значения равное 1, а при удалении от поверхности стремится к 0, и осуществляет автоматический переход от модели k - ω вблизи поверхности к модели k - ε .

Пристеночные функции

Существует два подхода для моделирования течения вблизи стенок, где молекулярная вязкость существенно влияет на характер течения.

Один подход заключается в использовании пристеночных функций – полуэмпирические соотношения, связывающие параметры потока с расстоянием до стенки [60]:

$$u^+ = \frac{U_t}{u_\tau} = \frac{1}{k} \ln(y^+) + C, \quad (2.8)$$

где $y^+ = \frac{\rho \Delta y u_\tau}{\mu}$ – параметр, выражающий безразмерное расстояние до стенки;

$$u_\tau = \left(\frac{\tau_\omega}{\rho} \right)^{1/2} - \text{динамическая скорость};$$

k – постоянная Кармана, значение которой $k=0.42$;

C – константа, $C=5,5$.

При использовании пристеночных функций, значение безразмерного расстояния должно находиться в диапазоне $y^+ \approx 20 \div 200$.

Использование пристеночных функций позволяет существенно экономить вычислительные ресурсы. Такой подход используется при расчетах с применением «стандартной» k - ε модели.

Альтернативный подход – пристеночное моделирование. Для его реализации необходимо, чтобы несколько ячеек сетки (не меньше 10) оказались внутри вязкого подслоя струи, что в свою очередь приводит к сильному измельчению сетки у стенок, и как следствие, к серьезному увеличению количества ячеек в целом.

Такой подход используется при расчетах с применением «стандартной» k - ω и SST моделей.

2.3 Исходные данные для численного моделирования

Диффузор ДКУ

Численное моделирование диффузора ДКУ производилось для расчетной области размерами $20 \text{ м} \times 20 \text{ м}$ и высотой 5 м , в которую заподлицо с потолком был помещен диффузор. Учитывая симметричность задачи, расчет производился для $1/4$ области.

Граничные условия, принятые в расчете:

- потолок – непроницаемая стенка (Wall);
- на остальных границах области – открытые граничные условия, имитирующие безграничное пространство (Opening) или условия симметрии (Symmetry);

- скорость воздуха (Inlet) в подводящем патрубке $V_0 = 5$ м/с.

Для генерации расчетной сетки использовался модуль ANSYS Meshing. Для каждой модели турбулентности генерировалась своя сетка, учитывающая особенности модели. Адекватность сетки проверялась методом сеточной сходимости: при измельчении сетки в 2 раза по всем направлениям, основные расчетные параметры должны оставаться неизменными.

Параметры сетки для каждой модели турбулентности, использовавшейся при проведении основной серии расчетов, представлены в таблице 2.1. На рисунке 2.5 показан фрагмент сетки вокруг элемента диффузора для моделей $k-\varepsilon$ и SST .

Таблица 2.1 – Параметры моделирования диффузора ДКУ

Модель турбулентности	Количество ячеек сетки, млн	Максимальное значение параметра y^+
«стандартная» $k-\varepsilon$	4,6	30
«стандартная» $k-\omega$	7,2	≈ 1
модель SST	7,1	≈ 1

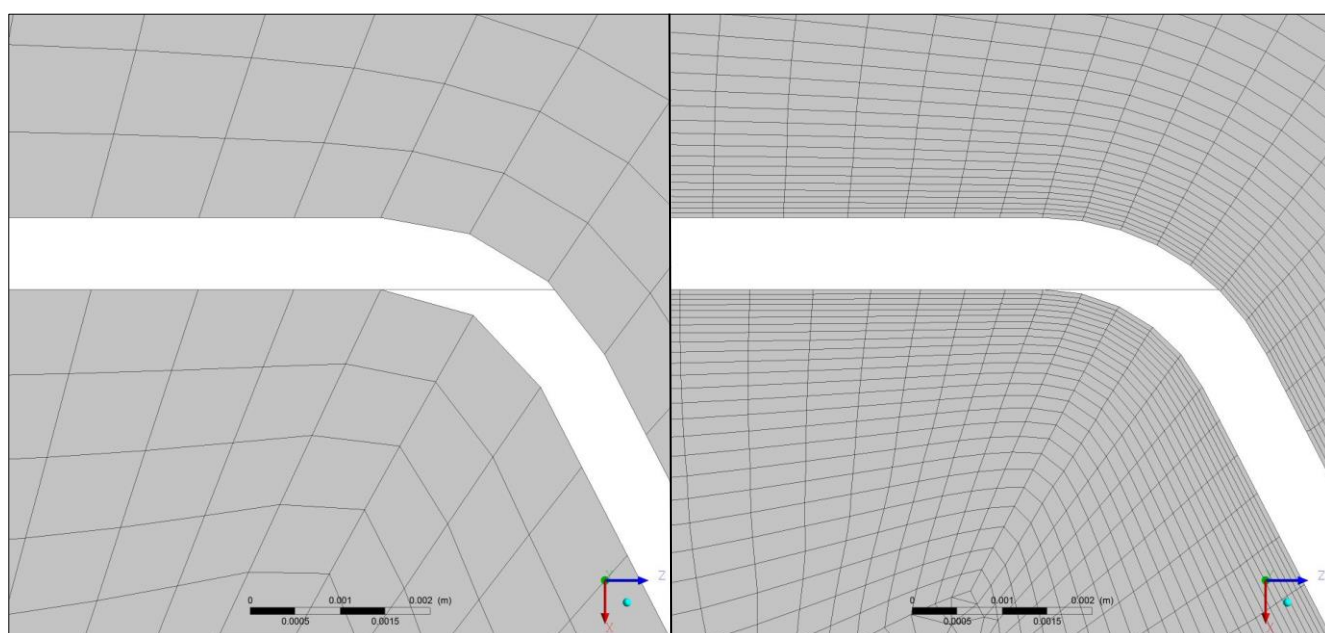


Рисунок 2.5 – Фрагмент сетки вокруг изгиба корпуса диффузора для модели $k-\varepsilon$ (слева) и модели SST (справа)

Диффузор ДПУ-К

Численное моделирование диффузора ДПУ-К производилось для расчетной области размерами 5×5 м и высотой 11 м. Диффузор размещался на расстоянии 1 м от верхнего края расчетной области.

Граничные условия, принятые в расчете:

- границы области – открытые граничные условия, имитирующие безграничное пространство (Opening);

- скорость воздуха (Inlet) в подводящем патрубке $V_0 = 11$ м/с.

Параметры сетки для каждой модели турбулентности представлены в таблице 2.2. На рисунке 2.6 показан фрагмент расчетной сетки диффузора для моделей $k-\varepsilon$ и SST .

Таблица 2.2 – Параметры моделирования диффузора ДПУ-К

Модель турбулентности	Количество ячеек сетки, млн	Максимальное значение параметра y^+
«стандартная» $k-\varepsilon$	1,6	79
«стандартная» $k-\omega$	1,9	≈ 1
модель SST	1,9	≈ 1

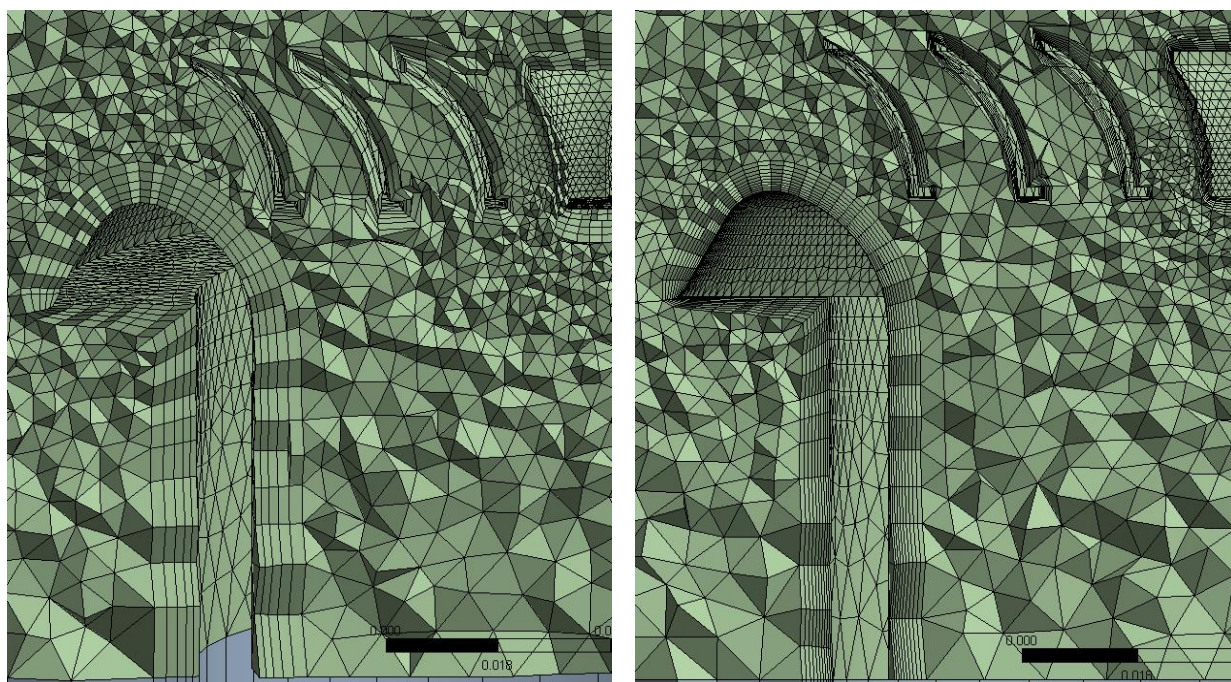


Рисунок 2.6 – Фрагмент расчетной сетки вокруг элементов диффузора для модели $k-\varepsilon$ (слева) и модели SST (справа)

Рециркуляционный воздухораспределитель РВР

Численное моделирование рециркуляционного воздухораспределителя РВР производилось только с использованием «стандартной» $k-\varepsilon$ модели турбулентности.

Размеры расчетной области – 20 м × 20 м высота 5 м. В расчетную область заподлицо с потолком был помещен воздухораспределитель РВР. Учитывая симметричность задачи, расчет производился для 1/2 области.

Граничные условия, принятые в расчете:

- потолок – непроницаемая стенка (Wall);
- на остальных границах области – открытые граничные условия, имитирующие безграничное пространство (Opening) или условия симметрии (Symmetry);

- скорость воздуха (Inlet) в подводящем патрубке диффузора $V = 2,7$ м/с, скорость воздуха в подводящем патрубке рециркуляционной части $V = 2,7$ м/с.

Скорость воздуха в расчетном сечении – $V_0 = 0,55$ м/с.

Параметры сетки представлены в таблице 2.3. На рисунке 2.7 показан фрагмент расчетной сетки.

Таблица 2.3 – Параметры моделирования воздухораспределителя РВР

Модель турбулентности	Количество ячеек сетки, млн	Максимальное значение параметра y^+
«стандартная» $k-\varepsilon$	22	148

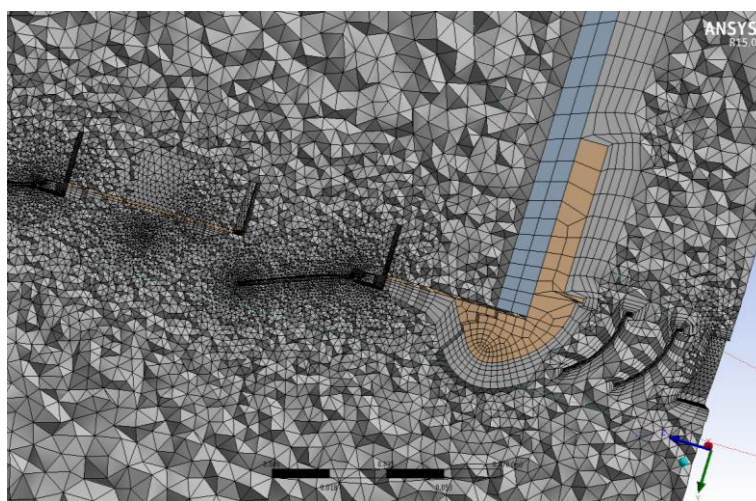


Рисунок 2.7 – Фрагмент расчетной сетки РВР

2.4 Методика проведения натуральных испытаний

Стенд для проведения натуральных испытаний

Натурные испытания (или физический эксперимент, сокращенно ФЭ) всех воздухораспределителей проводились на аэродинамическом стенде научно-исследовательской лаборатории аэродинамики и акустики завода «Арктос» (рисунок 2.8). Размеры измерительного помещения $20 \text{ м} \times 12 \text{ м} \times 10 \text{ м}^3$. Приточный воздух в стенд для испытаний нагнетается вентиляционной установкой «Стандарт» (поз.1, далее обозначается ТВ2), расположенной в отдельном помещении, в камеру статического давления (КСД, поз.2) размерами $2 \times 1,5 \times 1,5 \text{ м}^3$. В КСД для выравнивания потока установлен выпрямитель (поз.3) глубиной 100 мм. На выходе из КСД располагается профилированное сопло (поз.4) диаметром $D = 200 \text{ мм}$, обеспечивающее равномерный профиль скорости на истечении. С помощью воздуховодов требуемого диаметра испытуемый воздухораспределитель (поз.5) подсоединяется к КСД. Удаление воздуха из помещения аэродинамического стенда производится через отверстие в потолке (поз.8) с помощью установки «Стандарт». Система работает в режиме 100% рециркуляции, что обеспечивает изотермические условия при проведении испытаний.

Измерение скорости приточного воздуха в воздуховоде

Для определения скорости воздуха, подаваемого в воздухораспределитель, производилось измерение динамического давления P_d , Па, в мерном сечении измерительного участка стенда (см. рисунок 2.8 поз.7) по методике, описанной в [31]. Измерения производились с помощью средств измерений (СИ), описанных в таблице 2.4, поверенных в установленном порядке.

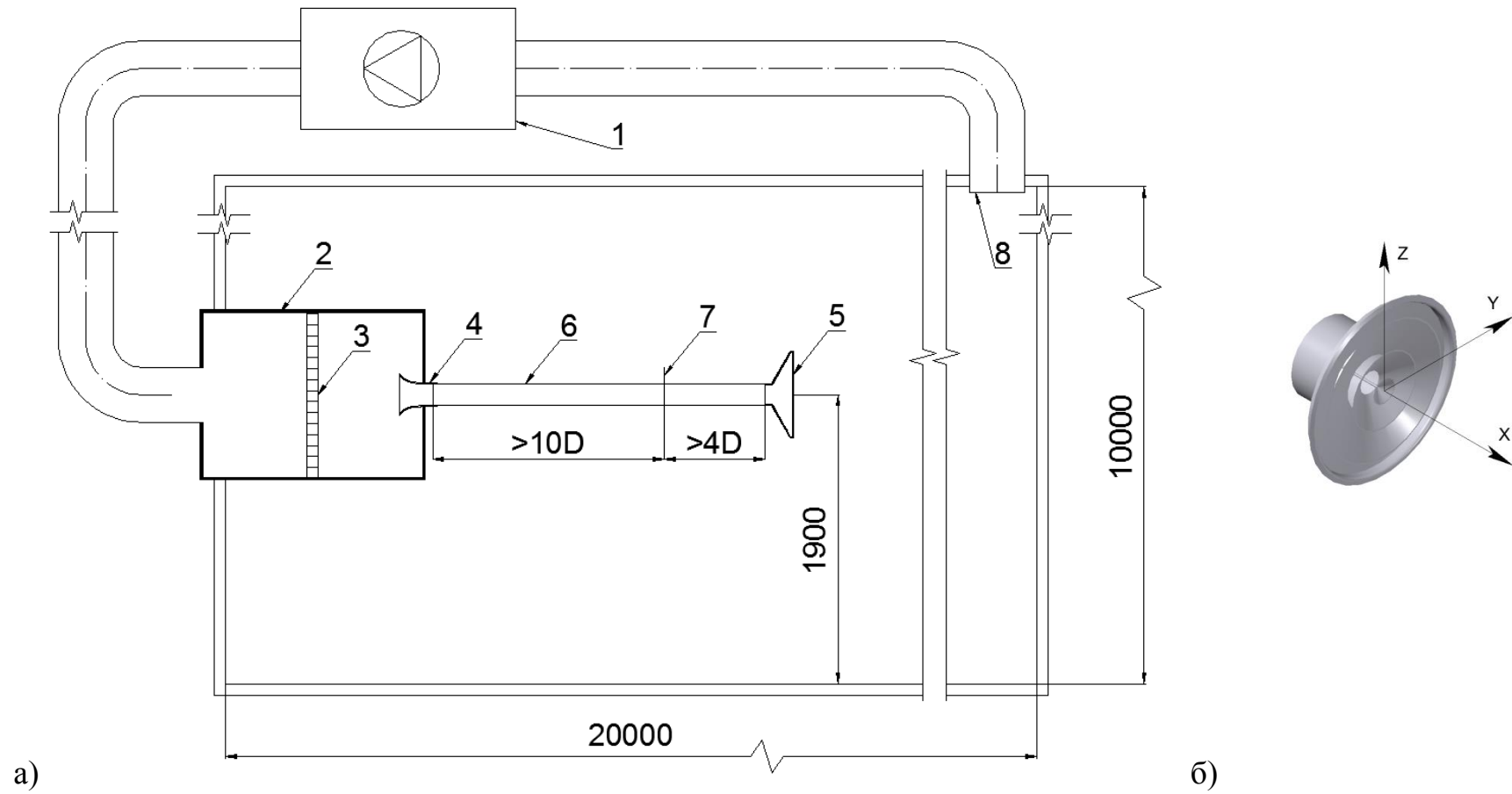


Рисунок 2.8 – Схема аэродинамического стенда

а – схема, б – воздухораспределитель и система координат

1 – вентиляционная установка; 2 – камера статического давления; 3 – выпрямитель; 4 – профилированное сопло (коллектор);
5 – воздухораспределитель; 6 – воздуховод; 7 – измерительное сечение; 8 – вытяжное отверстие

Таблица 2.4 – Описание средств измерений

Наименование СИ	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Погрешность
Многофункциональный микроанометр МР200Р (КИМО)	давление	от 0 до 500Па	± 100Па: ±0,2% от показаний ±0,8Па; за пределами указанного диапазона: ±0,2% от показаний ±1,5Па
Многофункциональный микроанометр МР200М (КИМО)	давление	от 0 до 2500Па	±0,2% от показаний ±2Па
Комбинированный приемник давления (трубка Пито)	давление	от 2 до 30 м/с	±3% от показаний; $K_{\text{Пито}}=1,007$
Термогигрометр 610 (Testo)	температура	-10 +50 °С	±0,5 °С от показаний
	относительная влажность	0 -100%	±2,5% от показаний в диапазоне 5-95%
Барометр БР-52	давление	96 -104 кПа 720-780 мм.рт.ст	не более ±0,8 мм.рт.ст

Полученные в измерительных точках значения динамического давления усреднялись, и для расчета скорости использовалось усредненное значение. Расчет скорости воздуха в измерительном воздуховоде $V_{\text{п}}$, м/с, производился по формуле

$$V_{\text{п}} = \sqrt{\frac{2(P_{\text{д}} * K_{\text{Пито}})}{\rho}}, \quad (2.9)$$

где $K_{\text{Пито}}$ – поверочный коэффициент трубки Пито, безразмерный;
 ρ – плотность воздуха, кг/м³.

Плотность перемещаемого воздуха определялась по формуле

$$\rho = \frac{B_a + P_{\text{п}}}{RK_{\varphi}(t + 273)}, \quad (2.10)$$

где B_a – барометрическое давление окружающей среды, кПа;

P_{Π} — полное давление потока, Па;

K_{φ} — коэффициент, зависящий от температуры и влажности перемещаемого воздуха. Значение K_{φ} определяется по таблице 1 [31];

t — температура окружающего воздуха, °С.

По измеренной скорости воздуха определялся расход L , м³/ч, подаваемого приточного воздуха по формуле:

$$L = 3600 \cdot V_{\Pi} F_{\Pi}, \quad (2.11)$$

где F_{Π} — площадь подводящего патрубка, м².

Результаты замеров и расчетов приведены в Приложении Б.

Предельная относительная погрешность определения расхода воздуха в процентах рассчитывалась по следующей формуле [31]

$$\delta_L = (2\sigma_L + \delta_{\varphi}), \quad (2.12)$$

где σ_L — среднеквадратичная относительная погрешность, обусловленная неточностью измерений в процессе испытаний;

δ_{φ} — предельная, относительная погрешность определения расхода воздуха, связанная с неравномерностью распределения скоростей в мерном сечении; величины δ_{φ} даны в таблице 1 [31].

Величина σ_L определялась по формуле

$$\sigma_L = \left(4\sigma_D^2 + \frac{1}{4}\sigma_B^2 + \frac{1}{4}\sigma_t^2 + \frac{1}{4}\sigma_p^2 \right)^{0.5}, \quad (2.13)$$

где σ_D — среднеквадратичная погрешность определения размеров мерного сечения, зависящая от диаметра воздуховода; при $100 \text{ мм} \leq d_n \leq 300 \text{ мм}$ величина $\sigma_D = \pm 3 \%$, при $d_n > 300 \text{ мм}$ $\sigma_D = \pm 2 \%$;

σ_p , σ_B , σ_t — среднеквадратичные погрешности измерений, соответственно, динамического давления P_d потока, барометрического давления B_a , температуры t потока. Величины σ_p , σ_B , σ_t даны в таблице 2 [31].

Предельная относительная погрешность измерения расхода воздуха составила:

- при $100 \text{ мм} \leq d_n \leq 300 \text{ мм}$ – $\delta_L = +14\%$, -10% ;
- при $d_n > 300 \text{ мм}$ – $\delta_L = +10\%$, -6% .

Измерение скоростных полей

Для определения аэродинамических характеристик струи, проводились измерения скорости воздуха V , м/с, в поперечных сечениях формируемой приточной струи на различных расстояниях Y (для настилающихся струй, рисунки 2.8 б и 2.9) от центра диффузора или X (для прямооточных струй) от плоскости истечения. Измерения проводились по методике, описанной в [32].

Скорость воздуха измерялась в сечениях, удаленных друг от друга на расстояние 0,5 или 1 м в зависимости от значения измеряемых величин и вида струи. Первое сечения располагалось на расстоянии 0,5 м. Последнее сечение – на расстоянии, где скорость воздуха варьировалась от 0,4 до 0,5 м/с.

На каждом расстоянии измерения проводились на горизонтальной линии (или вертикальной линии – в зависимости от вида струи), проходящей через максимум скорости воздуха и перпендикулярной основному направлению его потока. Измерение включало такое количество точек на каждой стороне основного направления потока, которое позволило определить 50% границу струи.

Результаты измерений приведены в Приложении Б.

Измерения выполнялись с помощью средств измерений, поверенных в установленном порядке, описание которых приводится в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Описание средств измерений

Наименование СИ	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Погрешность
Термоанемометрическая система ТТМ-2/16-06 (Эксис)	скорость воздуха	от 0.05 до 20 м/с	$\pm(0,05+5\%$ от показаний)
Термоанемометрическая система НТ-400 (Sensor)	скорость воздуха	сферические датчики: от 0.05 до 10 м/с	сферические датчики: 0.05÷1 м/с: 0.02 м/с $\pm 1\%$ от показаний 1÷5 м/с: $\pm 3\%$ от показаний
		цилиндрические датчики: от 0.15 до 20 м/с	цилиндрические датчики: 0.15÷1.5 м/с: 0.03 м/с $\pm 1\%$ от показаний 1.5÷10 м/с: $\pm 3\%$ от показаний



Рисунок 2.9 – Аэродинамические испытания диффузора ДКУ

2.5 Сравнение результатов численного и натурального экспериментов

Испытания диффузора ДКУ

Полученная в результате численного моделирования трехмерная картина течения веерной струи позволяет понять, каким образом формируется струя, и оценить область ее распространения, чего нельзя добиться при проведении физического эксперимента. Визуализация потока воздуха позволяет увидеть, что использование различных моделей турбулентности оказывает существенное влияние на вид веерной настилающейся струи, истекающей из одного и того же воздухораспределителя. На рисунке 2.10 представлены поля скоростей в плоскости симметрии, анализируя которые можно понять, что скорости и характер течения воздуха внутри воздухораспределителя схожи для моделей $k-\omega$ и SST и отличается для модели $k-\varepsilon$, что является результатом различного подхода при описании течения струи вдоль стенок диффузора.

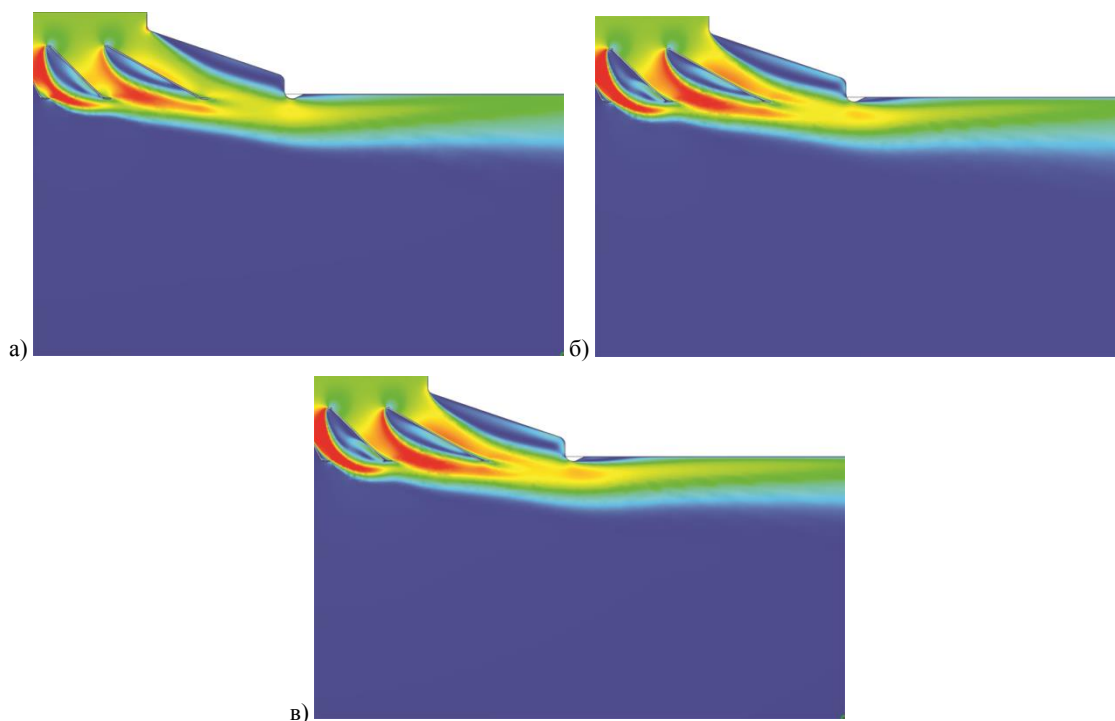


Рисунок 2.10 – Поля скоростей на плоскости симметрии:
а – $k-\varepsilon$ модель; б – $k-\omega$ модель; в – модель SST

Существенное отличие в форме и характере струи можно наблюдать, если построить изоповерхность для скорости $V=0.2$ м/с (рисунок 2.11): при использовании модели турбулентности $k-\omega$ струя раскрывается шире в направлении по нормали от потолка, вследствие чего ее дальнобойность значительно меньше, чем для $k-\varepsilon$.

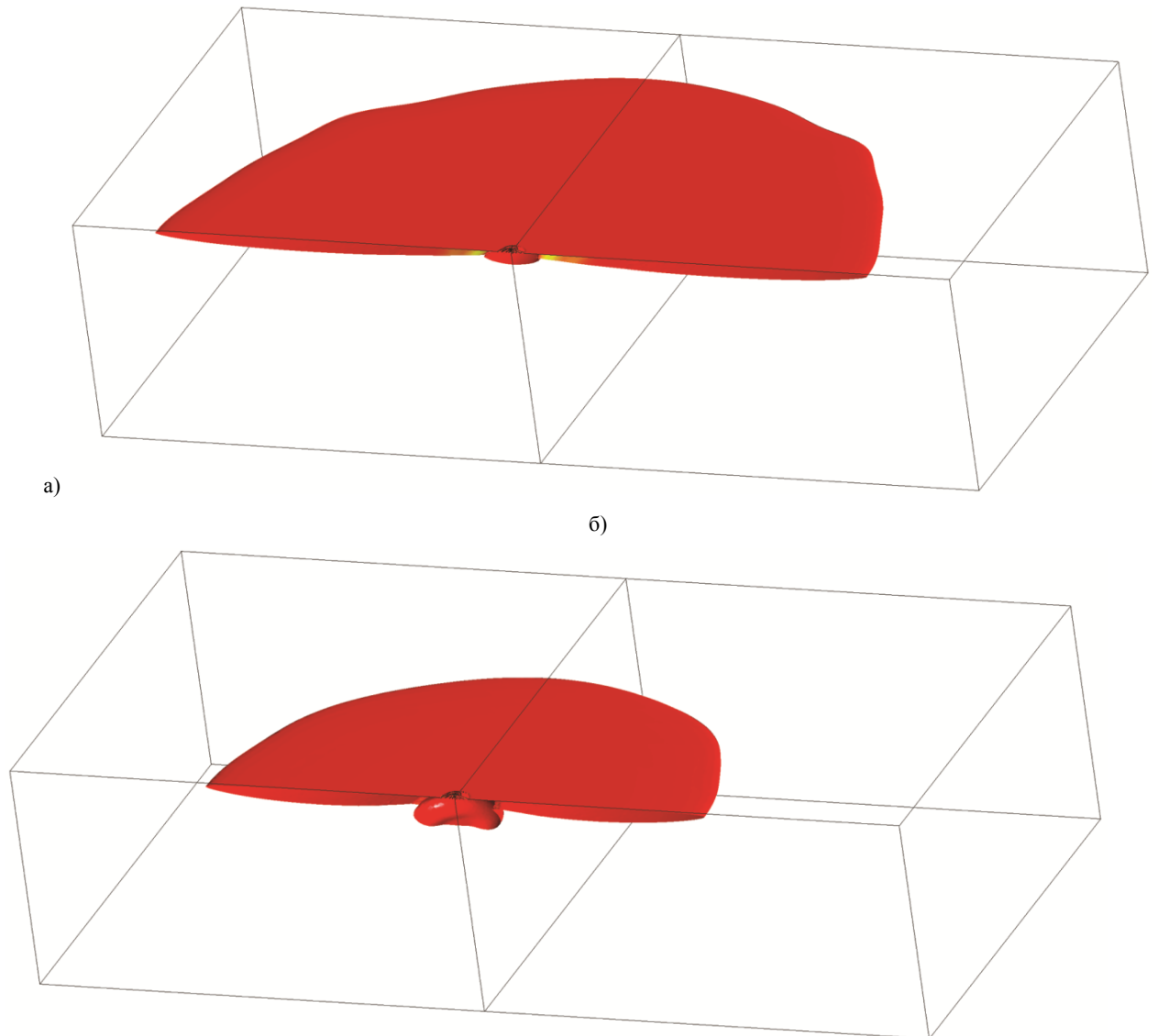


Рисунок 2.11 – Изоповерхность по скорости $V=0.2$ м/с:
а – $k-\varepsilon$ модель; б – $k-\omega$ модель

Для анализа и сравнения полученных данных натуральных измерений и численных расчетов [50], были построены профили скорости в безразмерных

величинах $\bar{V}_y = \frac{V_y}{V_y^{\max}}$ (рисунок 2.12, Приложение А) и графики изменения

относительной максимальной скорости $\bar{V} = \frac{V^{\max}_y}{V_0}$ (рисунок 2.13, Приложение А) по

длине струи. Преимуществом такой обобщенной обработки опытных данных заключается в том, что они остаются справедливыми для всех аэродинамически подобных опытов.

Анализ построенных профилей скорости на расстоянии $y=0,5 \div 2$ м демонстрирует, что наименьше отклонение от результатов физического эксперимента имеют значения, полученные в результате численного моделирования с использованием модели турбулентности $k-\varepsilon$ (отличие составляет не более 10%). Несмотря на то, что в модели $k-\varepsilon$ для расчета течения используются пристеночные функции, профиль скорости на расстоянии $y=0,5$ м (минимальное расстояние от воздухораспределителя) близок к натурным испытаниям. Полученный результат свидетельствует о корректности расчета течения струи вдоль стенок диффузора.

Представляет интерес результат, полученный при расчете с использованием $k-\omega$ модели. На расстоянии близком к истечению из воздухораспределителя ($y=0,5$ м) струя по своим значениям и характеру ближе всего по значениям к физическому эксперименту, что свидетельствует о корректном расчете течения струи внутри диффузора. Но с расстояния $y=1$ м и далее наблюдается изменение вида струи (что также было показано на изоповерхностях) и существенное отличие в значениях от натурального эксперимента (расхождение более 15%).

Гибридная модель SST позволила получить удовлетворительные результаты, сопоставимые к данным натурального эксперимента (расхождение в пределах 10%). Необходимо отметить, что на истечении из диффузора (расстояние 0,5 м) профиль скорости для модели SST наиболее сильно отличается от профиля физического эксперимента и от профиля для «стандартной» модели

$k-\omega$, что говорит о том, что использованная в SST модифицированная модель $k-\omega$ менее корректно описывает обтекание элементов конструкции диффузора.

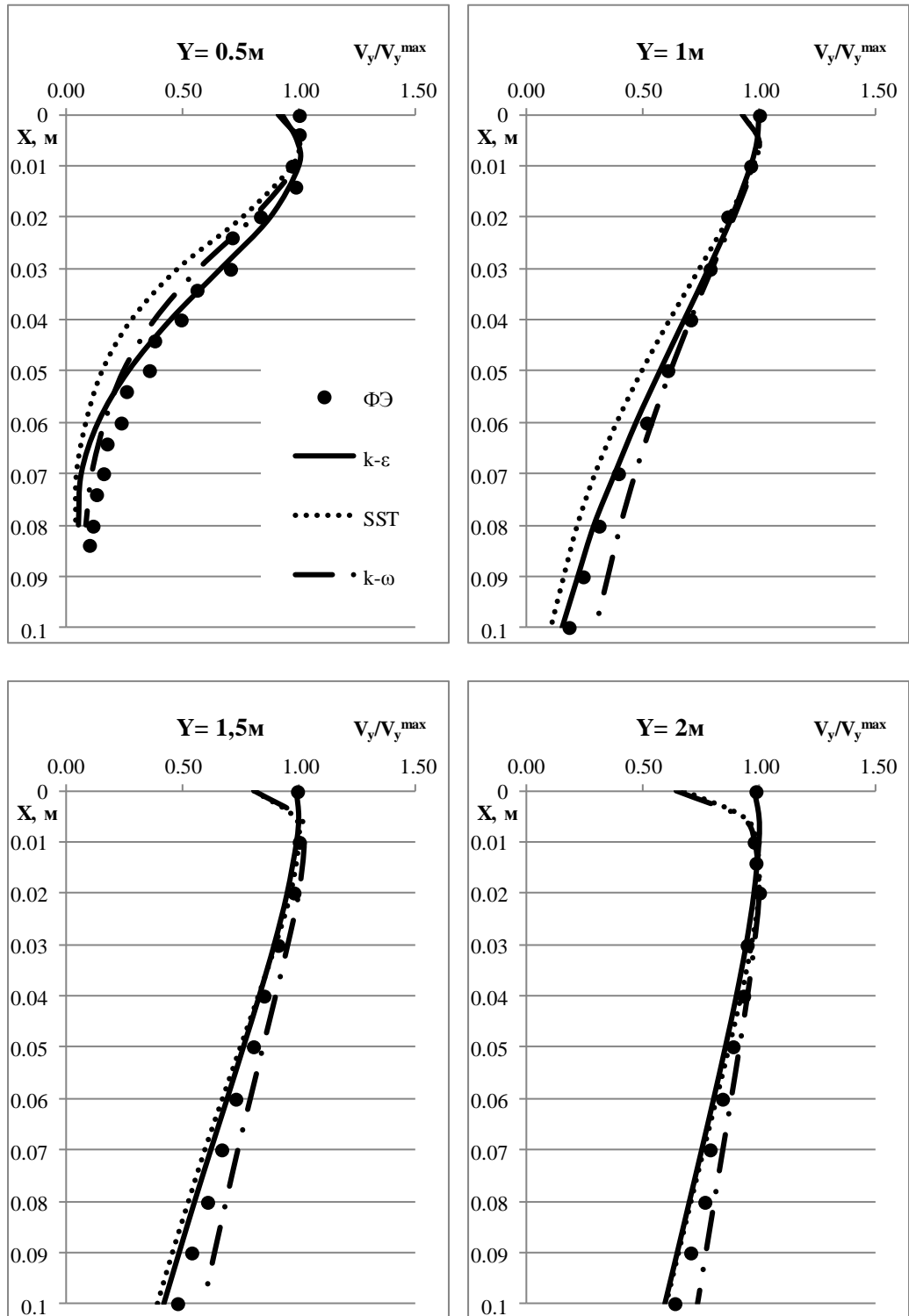


Рисунок 2.12 –Профили скорости на расстояниях Y , м, от оси диффузора, построенные по результатам численного моделирования (ЧМ) и физического эксперимента (ΦE)

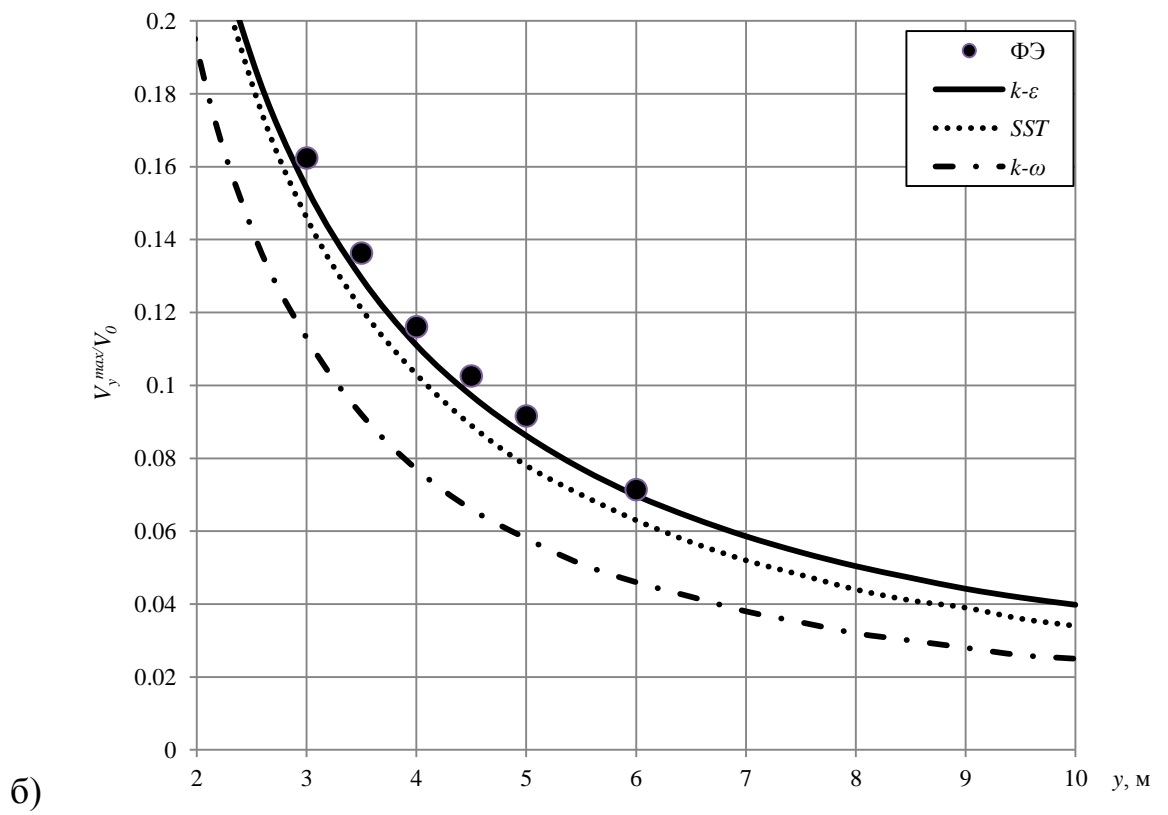
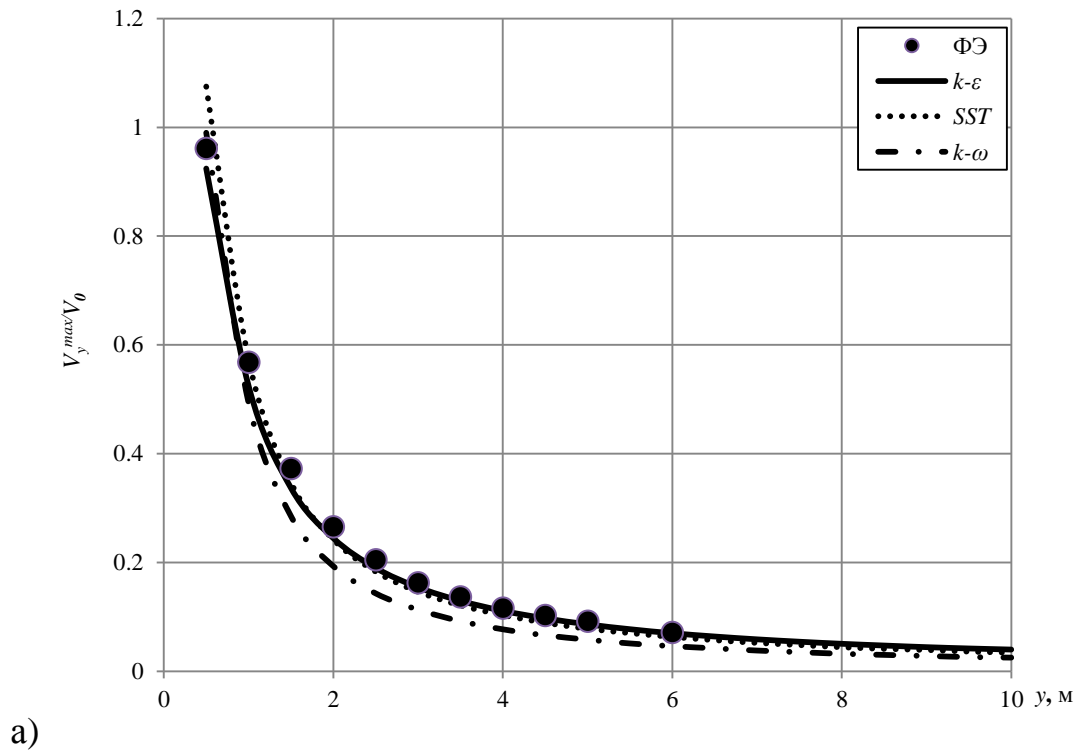


Рисунок 2.13 – Зависимость относительной максимальной скорости струи от расстояния (при разных диапазонах значений вертикальной оси)

Анализ графиков изменения относительной максимальной скорости по длине струи (рисунок 2.13) позволяет подтвердить выводы, сделанные ранее: наиболее близкие значение в ходе численного моделирования получены при использовании «стандартной» $k-\varepsilon$ модели турбулентности (отклонение в среднем составляет $5\div 7\%$).

По полученным данным в ходе натурных испытаний и численного моделирования с использованием «стандартной» $k-\varepsilon$ модели турбулентности (Приложение А и Б) по формуле (1.32) построен график изменения кинематического коэффициента m по длине струи (рисунок 2.14). Необходимо отметить, что полученный вид графика не соответствует существующей теории [27, 78] о постоянстве значений кинематического коэффициента на основном участке струи, которое впоследствии используется при расчете аэродинамических характеристик струи. Обнаруженное явление нуждается в дополнительном исследовании.

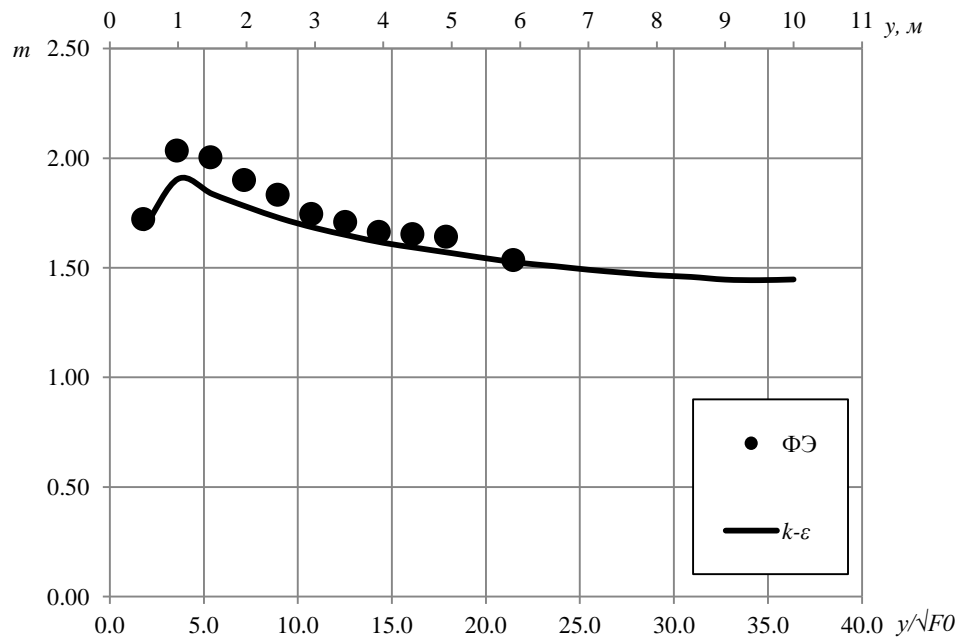


Рисунок 2.14 – Кинематический коэффициент m веерной настиляющей струи от диффузора ДКУ

Полученные в ходе исследования веерной настиляющей струи, формируемой коническим диффузором ДКУ, результаты демонстрируют, что

использование при численном моделировании «стандартной» $k-\varepsilon$ и гибридной SST моделей турбулентности позволяет получить достоверные данные, хорошо согласующиеся с результатами физического эксперимента. Но в целях экономии вычислительных ресурсов предпочтение следует отдавать «стандартной» $k-\varepsilon$ модели турбулентности.

Испытания диффузора ДПУ-К

Анализируя результаты численных расчётов диффузора ДПУ-К, можно сделать вывод о том, что, как и в случае с диффузор ДКУ, использование разных моделей турбулентности приводит к отличным картинкам течения формируемой струи (рисунок 2.15). Если при расчете веерной настилающейся струи от диффузора ДКУ, вид струи и значения ее скоростей для разных моделей турбулентности начинают существенно различаться с расстояния 1 м, то для конической смыкающейся (свободной) струи от диффузора ДПУ-К кардинальные различия наблюдаются уже с момента истечения (рисунки 2.15). При использовании «стандартной» $k-\varepsilon$ модели турбулентности полученная струя имеет больший угол раскрытия на истечении, чем при использовании SST и $k-\omega$ моделей, что отражается на дальнейшем течении.

Сравнение значений относительной максимальной скорости по длине струи (рисунок 2.16), позволяет сделать вывод, что наиболее близкие к результатам натуральных испытаний значения, полученный в ходе численного моделирования с использованием «стандартной» $k-\varepsilon$ модели турбулентности, максимальное отличие составляет 10%.

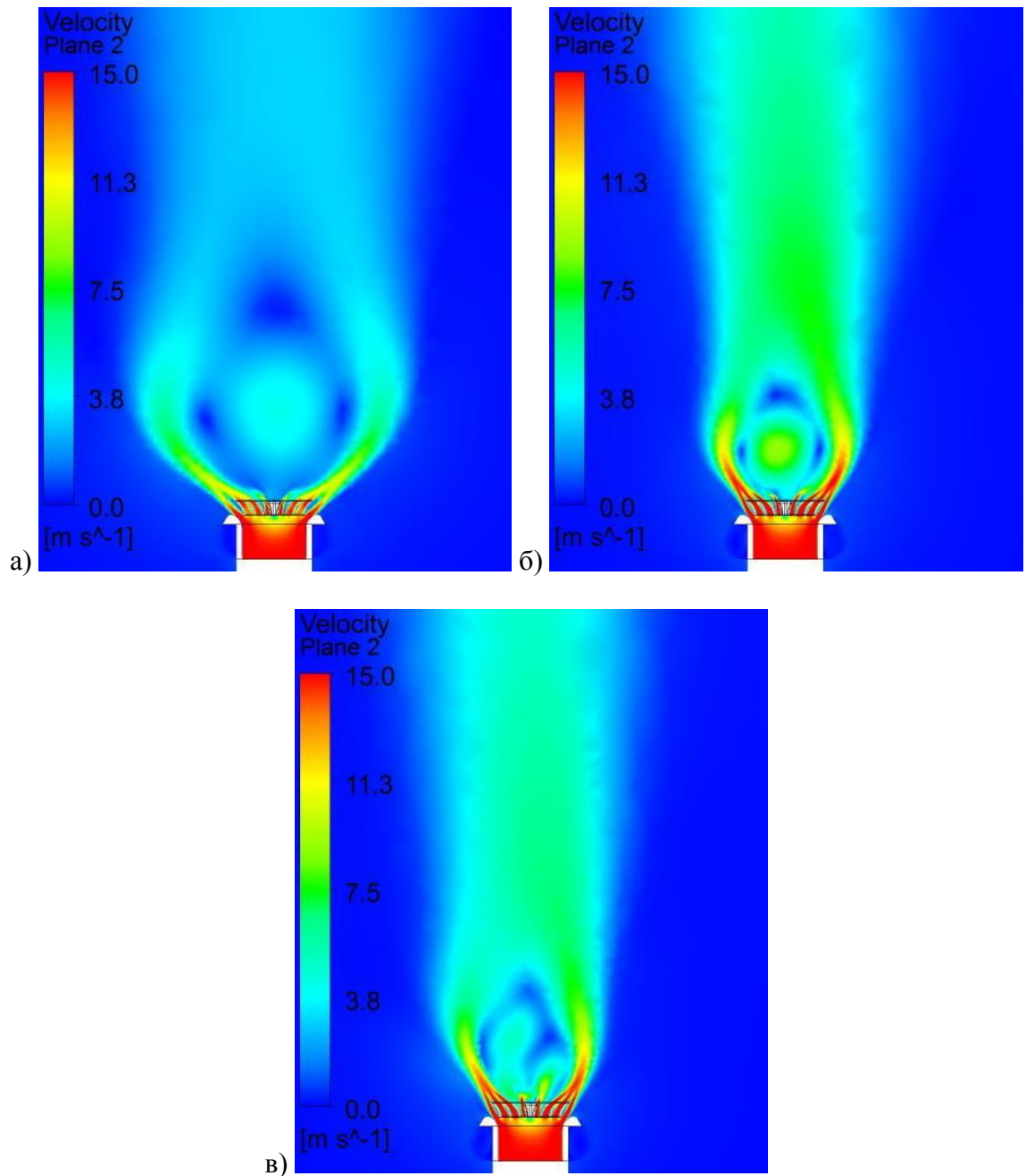


Рисунок 2.15 – Поля скоростей на плоскости симметрии:
а – $k-\varepsilon$ модель; б – модель SST; в – $k-\omega$ модель

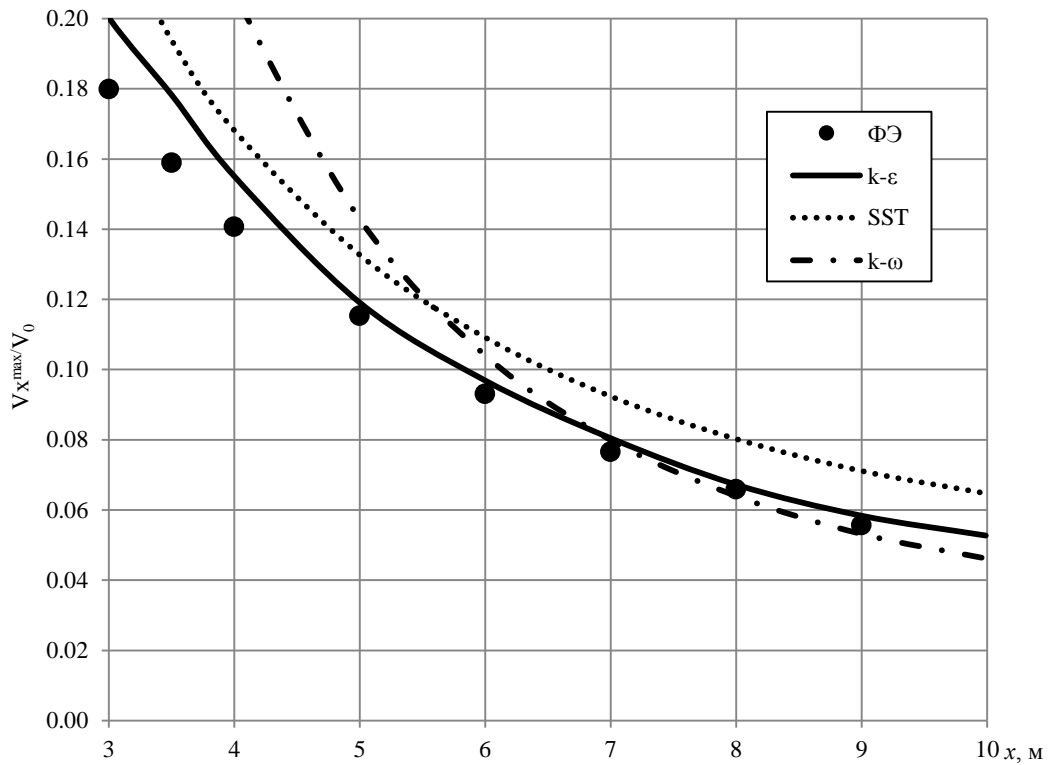
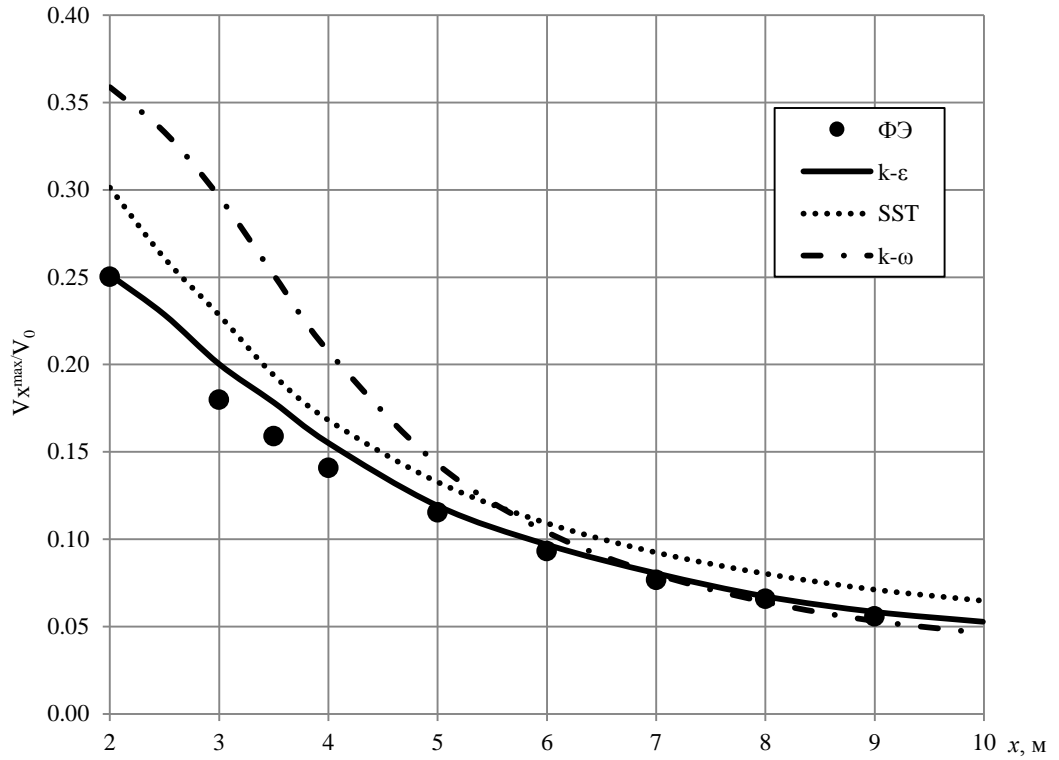


Рисунок 2.16 – Зависимость относительной максимальной скорости от расстояния (при разных диапазонах значений вертикальной оси)

Испытания рециркуляционного воздухораспределителя РВР

Учитывая тот факт, что в результате испытаний диффузоров ДКУ и ДПУ-К наиболее близкие значение в ходе численного моделирования были получены с использованием «стандартно» $k-\varepsilon$ модели турбулентности, было принято решение провести численные испытания рециркуляционного воздухораспределителя РВР только с использованием вышеуказанной модели [84].

На рисунке 2.17 показано истечение струй из диффузора и пластиковых ячеек, которые сливаясь, формируют единый поток.

На рисунке 2.18 показана изменение относительной максимальной скорости по длине струи по результатам численного моделирования и физического эксперимента.

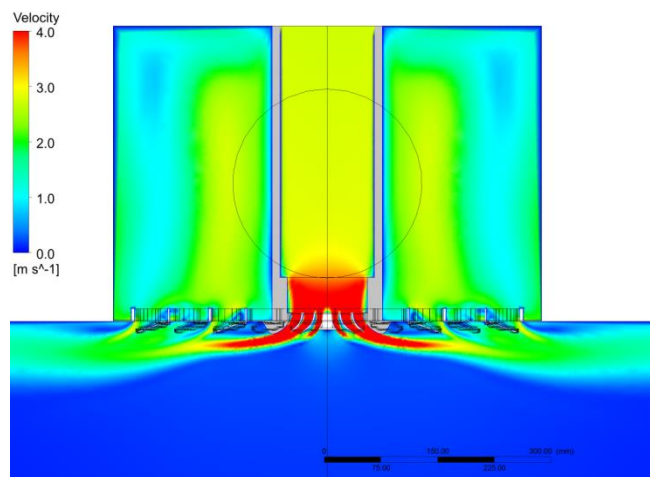


Рисунок 2.17 – Зависимость относительной максимальной скорости от расстояния

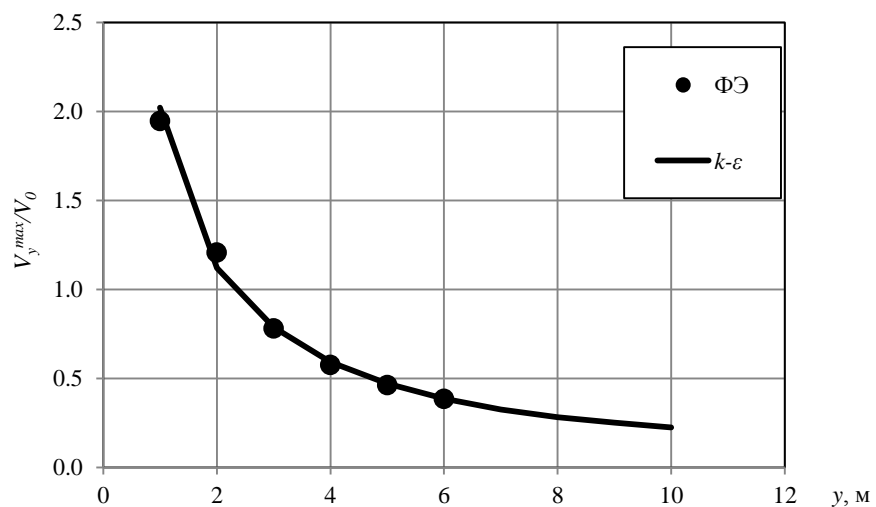


Рисунок 2.18 – Зависимость относительной максимальной скорости от расстояния

Максимальное отклонение данных численного моделирования от натуральных испытаний составляет 7%. Полученный результата еще раз доказывает, что применение «стандартной» k - ε модели турбулентности при численном моделировании струйных течений для задач вентиляции позволяет получить близкие к результатам натурального эксперимента значения.

2.7 Выводы по главе 2

1. Физический эксперимент и численное моделирование с использованием двух моделей турбулентности («стандартная» k - ε и SST) показали хорошую сходимость результатов, что позволяет в дальнейшем использовать численное моделирование с использованием этих моделей для проведения экспериментальных исследований вентиляционных струйных течений.

2. В результате проведенных испытаний было определено, что использование «стандартной» k - ε модели турбулентности позволяет получить наиболее близкий результат, отличие от значений натуральных испытаний не превышает 10%, что является приемлемым результатом и находится в пределах погрешности физических измерений.

3. Для последующих численных исследований целесообразно принять «стандартную» k - ε модель турбулентности с соответствующими параметрами расчетной сетки.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ, ХАРАКТЕРИЗУЕМЫХ НЕПОСТОЯННЫМ КИНЕМАТИЧЕСКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ

3.1 Постановка задач исследований

Кинематический коэффициент воздухораспределительного устройства m является основным параметром, используемым при расчете воздухораспределения в помещении, в частности при определении максимальной скорости на входе в рабочую зону.

На переменное значение константы c (постоянная Рейхардта), входящей в состав коэффициента m (1.32), в ходе своих экспериментальных исследований обратил внимание профессор В.Н. Талиев [68, 69]. Во всех трех описанных им случаях (истечение из трубы с разным начальным полем скоростей) постоянная c варьировалась в некотором диапазоне: 1. $c=0,076\div 0,094$; 2. $c=0,094\div 0,119$; 3. $c=0,089\div 0,111$. Причина полученного непостоянства константы c не указывалась.

В ходе экспериментальных исследований (глава 2) также было обнаружено, что у конусного диффузора ДКУ при формировании веерной настиляющей струи значение кинематического коэффициента m для основного участка струи не постоянно, как принято считать, а монотонно убывает по длине струи (рисунок 2.14). При этом различие между максимальным и минимальным значениями коэффициента m на основном участке составляет $\approx 33\%$. Такое поведение коэффициента m было получено как при проведении физического, так и численного эксперимента.

Обнаруженное явление противоречит определению коэффициента m , которое подразумевает его постоянство на основном участке струи [27, 78]. Кроме того, использование в этом случае постоянного значения m при проектировании будет приводить к заметным погрешностям в определении величины

максимальных скоростей на входе в рабочую зону, являющейся одним из основных параметров при расчете схемы воздухораспределения.

Ограничения методики испытаний по определению аэродинамических характеристик [32], не позволяют провести измерения на протяженном расстоянии по длине струи. Так, согласно данной методике, максимально возможное расстояние для диффузора ДКУ, исследуемого в главе 2, составляет 6м. При этом дальнобойность струи в условиях эксплуатации данного изделия может варьироваться в диапазоне от 3 до 10м.

При принятом постулате о том, что значение m не меняется на основном участке струи, истекающей из любого воздухораспределителя, использовании физических испытаний до 20 калибров достаточно для определения скоростного коэффициента изделия и использования полученного значения для последующего расчета скоростей и на больших расстояниях. Именно таким образом и определяются значения m при испытании воздухораспределительные устройства их производителями, например, для каталога [16].

Использование численного моделирования не ограничено расстоянием 6 м. Как видно из рисунка 3.1, характеристика струи длиной 10 м демонстрирует дальнейшее убывание значения кинематического коэффициента. Следовательно, использование осредненного значения кинематического коэффициента приводит в данном случае к погрешности в определении скорости на оси струи более чем на $15 \div 20\%$.

Отметим, что в работах [27, 78], в которых подтверждалось постоянство значения кинематического коэффициента m , рассматривалось истечение из отверстия с равномерным установившимся профилем скорости. В то время как в работе [68], исследовалось истечение с различными профилями скоростей, то есть имитировались различные воздухораспределительные устройства.

В настоящее время спектр производимых и используемых на практике воздухораспределительных устройств очень широк. Другими словами, профиль скорости на выходе из современных ВР существенно отличается от истечения из

отверстия, для которого изначально вводилось понятие кинематического коэффициента m и постулировалось его постоянство на основном участке струи.

Таким образом, кинематический коэффициент должен быть отдельно исследован для сложных современных воздухораспределительных устройств, формирующих профиль скорости, существенно отличный от классического истечения из отверстия.

В связи с вышесказанным, задачами исследования данной главы являлись:

1. анализ различных типов воздухораспределительных устройств с точки зрения изменения/постоянства их кинематического коэффициента по длине основного участка струи;
2. выявление причины изменения кинематического коэффициента по длине основного участка струи.

3.2 Натурные исследования течения приточных струй от воздухораспределителей различных типов

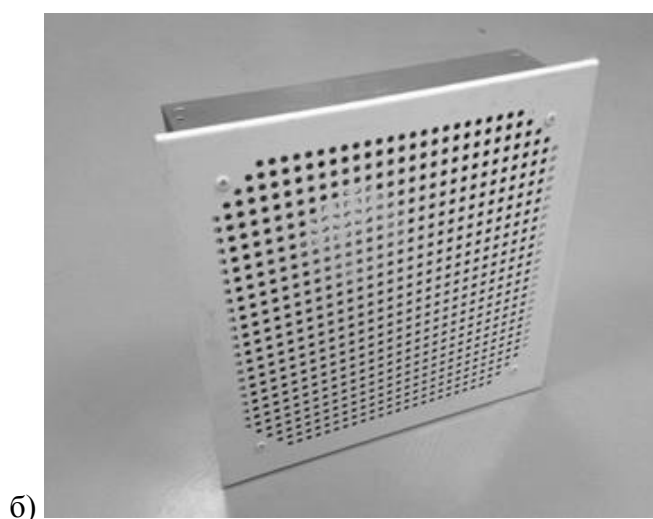
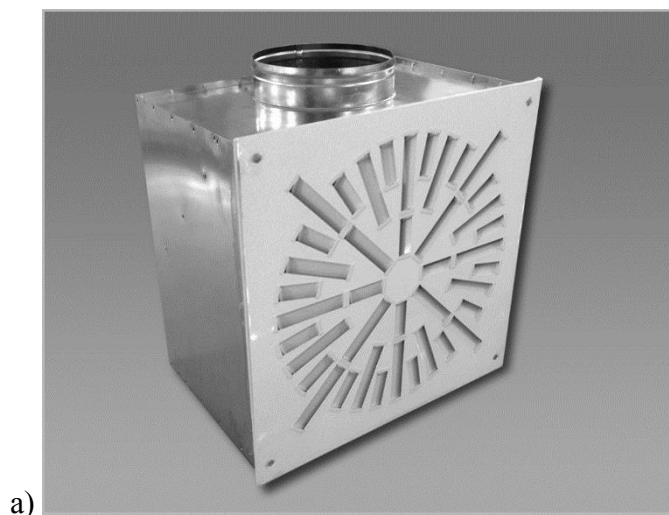
С целью выяснения, является ли обнаруженное непостоянство кинематического коэффициента особенностью только диффузора ДКУ, или характерно для других типов приточных устройств, были изучены архивы протоколов натурных испытаний различных воздухораспределителей компании «Арктос», а также проведен ряд дополнительных испытаний [47, 49].

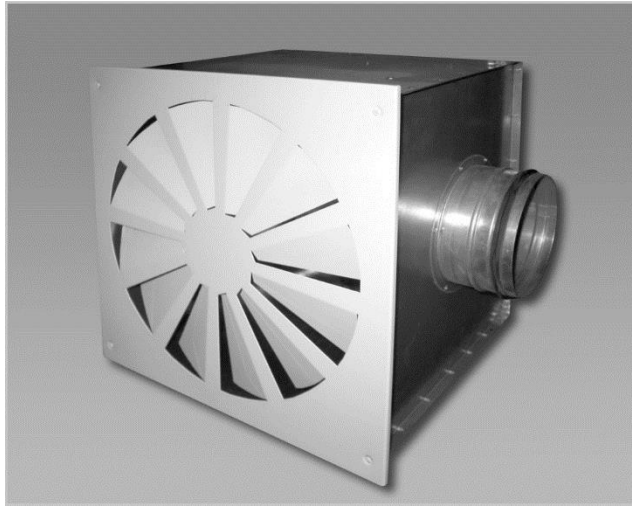
В ходе проведенных исследований удалось установить, что переменное значение кинематического коэффициента также наблюдалось для струй, формируемых следующими воздухораспределителями: панельным ячейковый 2ВПВ, перфорированным 3СПП, закручивающим 2ДПЗ М (рисунок 3.2). Результаты испытаний и расчетов приведены на рисунке 3.3. В таблице 3.1 представлены минимальные и максимальные значения кинематического коэффициента по результатам натурных испытаний, проводимых в лаборатории завода «Арктос». Как видно из представленных данных, изменение

кинематического коэффициента m по длине струи составляло от 25% до 50 % в зависимости от типа воздухоораспределителя.

Таблица 3.1 – Значения кинематического коэффициента m , полученные при испытаниях изделий

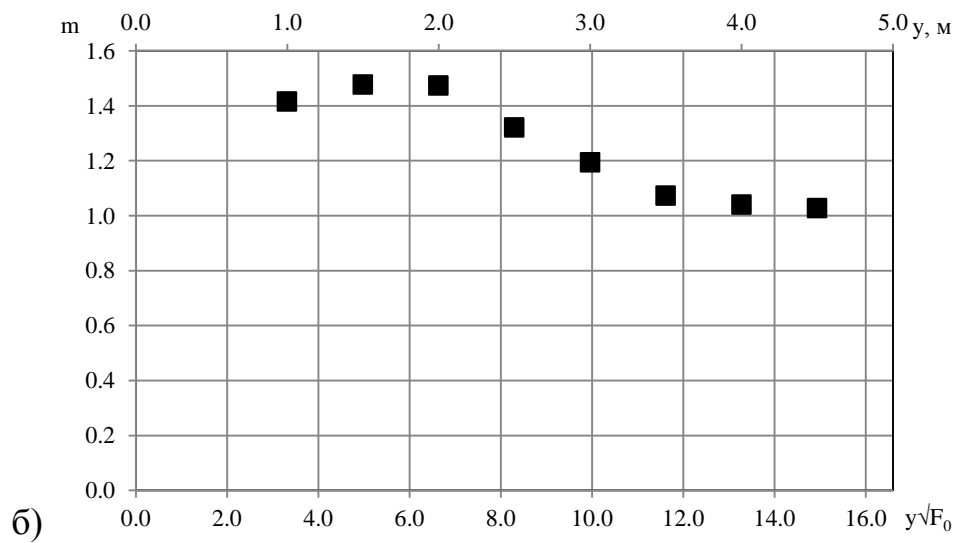
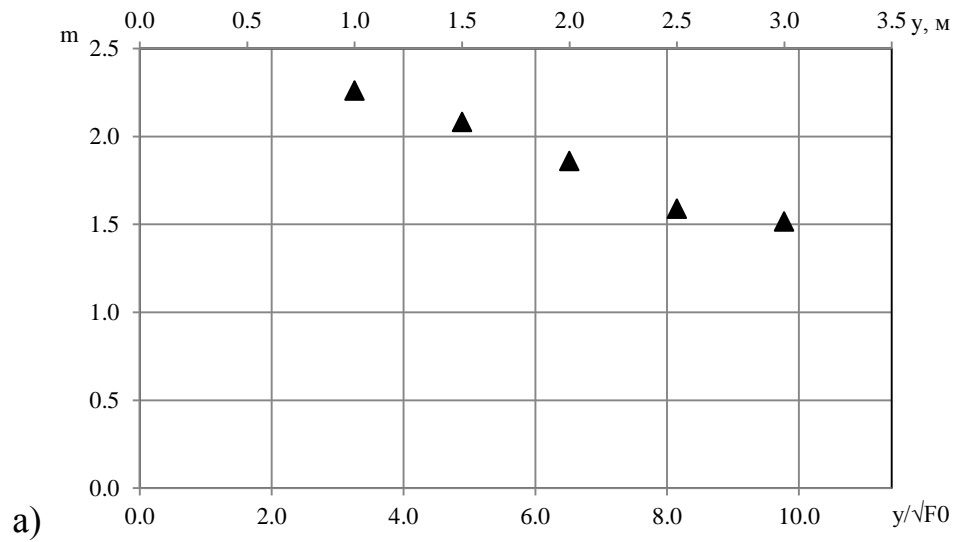
Воздухораспределитель	Значение кинематического коэффициента m		Δ , %
	min	max	
ДКУ	1,5	2,0	33,3
2ВПВ	1,5	2,3	53,3
3СПП	1,0	1,5	50,0
3ДПЗ М	3,1	3,9	25,0





в)

Рисунок 3.2 – Воздухораспределители:
а – 2ВПВ; б – 3СПП; в – 3ДПЗ М



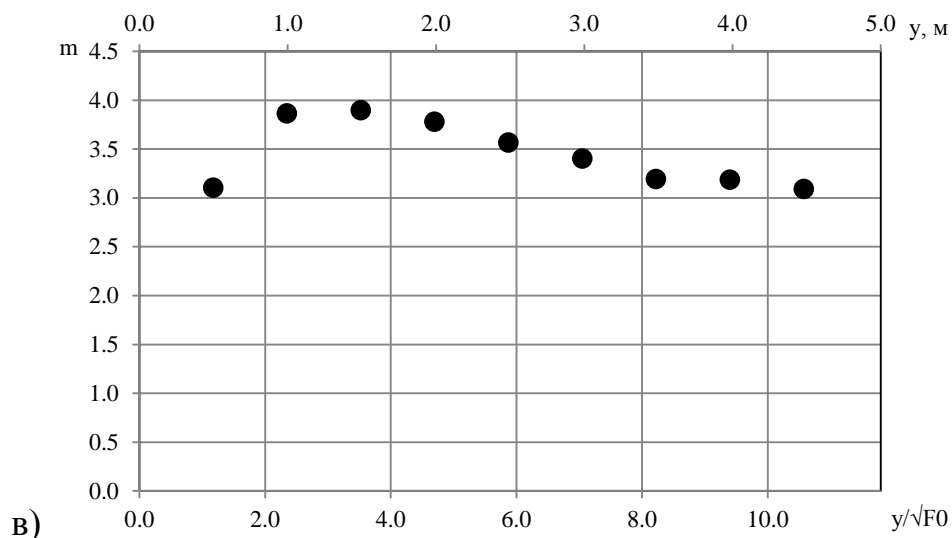


Рисунок 3.3 – Изменение кинематического коэффициента m по длине струи:
 а – воздухораспределитель 2ВПВ; б – воздухораспределитель 3СПП;
 в – воздухораспределитель 3ДПЗ М

Таким образом, проведенный анализ архивных данных натуральных испытаний показал, что изменение значения кинематического коэффициента по длине струи для различных воздухораспределителей действительно имеет место.

В качестве значения m для каталога бралось среднее арифметическое из замеряемых в ходе натуральных испытаний значений. Как было показано в подразделе 3.1 использование при проектировании систем вентиляции среднеарифметического значения коэффициента m в этом случае приводит к ошибке в определении максимальных скоростей на входе в рабочую зону до 30%.

3.3 Анализ причины непостоянства кинематического коэффициента m по длине струи

Результаты численного моделирования позволяют получить максимум информации о процессе формирования и дальнейшем развитии струйных течений. Именно поэтому данный подход наиболее информативен (по сравнению с физическим экспериментом) для подробного анализа полей скоростей и определения причин непостоянства кинематического коэффициента по длине струи.

Анализ проведен на примере течения, формирующееся при истечении из диффузора ДКУ. Достоверность результатов данного численного исследования подтверждена сравнением с натурным экспериментом по основным параметрам течения (глава2).

Изучение процесса формирования и развития струи из воздухораспределителя ДКУ (рисунок 2.10), позволяет сделать вывод о том, что формируемая приточная струя кардинальным образом отличается от «классической» веерной струи, описанной в [27, 78]. Истечение приточного воздуха осуществляется через щели между конусами отдельными струйками, под некоторыми углами к горизонтальной поверхности, в отличие от «классической», которая выходит из воздухораспределителя параллельно горизонтальной поверхности. После слияние отдельных струек в единый поток, за счет эффекта Коанда, происходит его налипание на потолок на расстоянии от края диффузора, приблизительно равном половине радиуса корпуса. Построение 50%-ой границы струи ($V_{0.5max}$) позволяет увидеть (рисунок 3.4) место максимального поджатия струи к потолку $y_1 \approx 0,50 \div 0,65$ м. То есть можно выделить два типа течения: начальный поток при истечении из диффузора (формирование отдельных «струек», их слияние) и распространение сформировавшегося классического струйного течения. Место перехода от одного типа течения к другому можно назвать участком истечения «классической» струи.

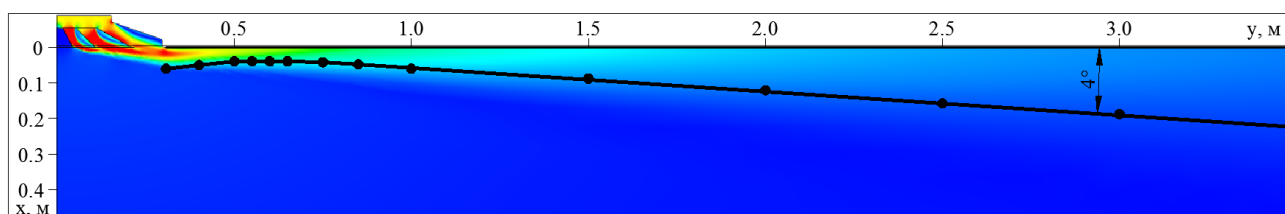


Рисунок 3.4 – Изотаха, проведенная через значения скорости, равные половине осевой $V_{0.5max}$.

Если ввести в расчетную формулу по определению кинематического коэффициента m [33]

$$m = \frac{y}{\sqrt{F_0}} \frac{V_y}{V_0} \quad (3.1)$$

поправку k_m , равную расстоянию от геометрической оси диффузора до указанного места формирования «классической» струи $y_l \approx 0,50$ м, тогда вид зависимости m меняется, и значение m становится постоянным (кривая ЧМкор, рисунок 3.5). Расчетная формула приобретает вид

$$\tilde{m} = \frac{y - k_m}{\sqrt{F_0}} \frac{V_y}{V_0}. \quad (3.2)$$

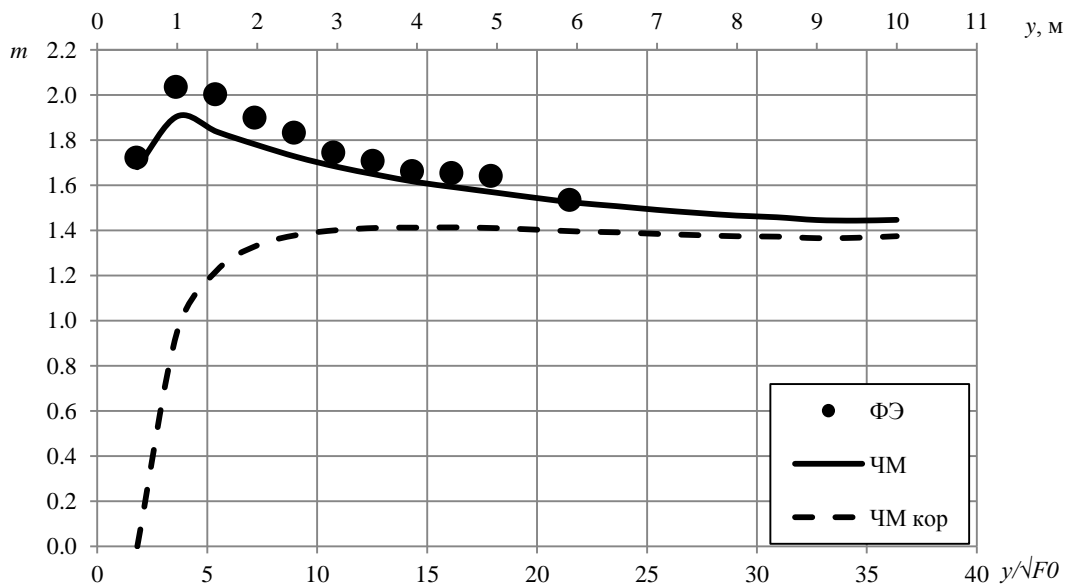


Рисунок 3.5 – Изменение кинематического коэффициента по длине струи диффузора ДКУ

Полученный результат дает основание полагать, что для течений из реальных воздухораспределительных устройств, для которых формирование «классической» струи происходит на некотором расстоянии от истечения, расчет кинематических характеристик должен учитывать это расстояние. По существующей теории расчет характеристик струйных течений, формируемых любыми воздухораспределительными устройствами, происходит от места истечения [27, 78].

При разработке теории свободной струи Абрамович Г.Н. ввел понятие «полюса струи» [2]. Полнос струи – условная точка, в которой сходятся изотакхи основного участка струи (рисунок 3.6). В формулах Абрамовича Г.Н. для расчета аэродинамических характеристик расстояние отсчитывается от полюса струи, а

нет от места истечения. Напомним, данной поправкой на расчет аэродинамических характеристик в работах [27, 78] предложили пренебречь в виду ее малости.

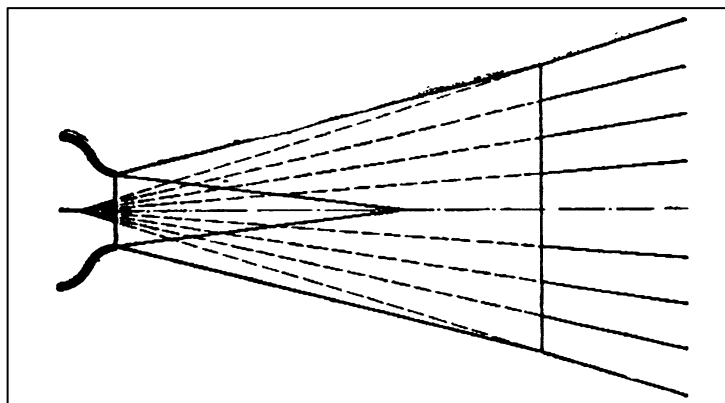


Рисунок 3.6 – Линии равных значений безразмерной скорости в основном участке струи по Абрамовичу Г.Н.

Отметим, что точка схождения изотак осевой скорости и 50% процентной границы струи, полученная графическим методом, располагается для течения из диффузора ДКУ внутри приточного устройства (рисунок 3.7).

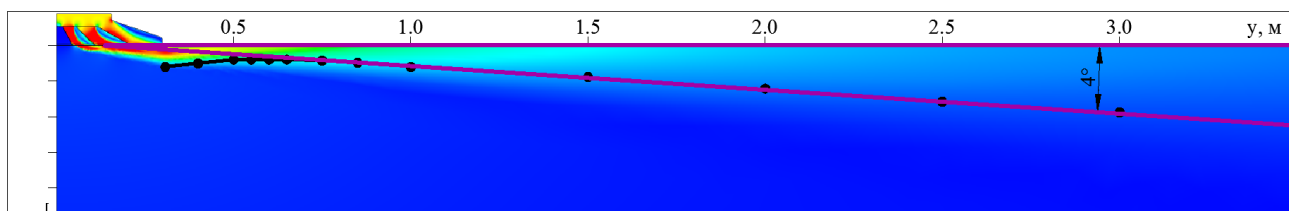


Рисунок 3.7 – Определение полюса струи для основного участка струи, формируемой диффузором ДКУ.

Учитывая тот факт, что характер истечения веерной настилающийся приточной струи для таких воздухораспределителей как 2ВПВ, 3СПП и 3ДПЗ М близок к характеру струи от диффузора ДКУ, то можно предположить, что процесс формирования и течения этих струй также подобный. В связи с этим, для данных изделий также необходимо определять поправку k_m . Для каждого изделия величина поправки k_m своя и должна определяться в ходе испытаний.

3.4 Методика определения \tilde{m} , k_m при проведении испытаний воздухораспределительных устройств

В ходе проведения аэродинамических испытаний по определению аэродинамических характеристик струи по методике, описанной в [32], необходимо производить построение графика изменения кинематического коэффициента \tilde{m} по длине струи (3.2). При этом следует принять значение $k_m = 0$. При обнаружении монотонного убывания значения кинематического коэффициента \tilde{m} , следует подобрать поправку k_m такую, чтобы значение \tilde{m} сохраняло постоянное значение по длине основного участка струи. Полученное в результате такого определения значение \tilde{m} и k_m позволяет при расчете воздухораспределения более достоверно определять максимальные скорости потока при входе в рабочую зону.

По данной методике были обработаны результаты аэродинамических испытаний воздухораспределителей 2ВПВ, 3СПП и 2ДПЗ М и определены значения поправки k_m . Значения кинематического коэффициента для воздухораспределителей 2ВПВ, 3СПП и 2ДПЗ М, откорректированных с учетом поправки представлены на рисунке 3.8 и в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Значения кинематического коэффициента m и \tilde{m} .

Воздухораспределитель	Значение кинематического коэффициента m		k_m , м	\tilde{m}
	min	max		
ДКУ	1,5	2,0	0,50	1,4
2ВПВ	1,5	2,3	0,75	1,1
3СПП	1,0	1,5	0,90	0,8
3ДПЗ М	3,1	3,9	0,50	2,8

Необходимо отметить, что применение кинематического коэффициента \tilde{m} имеет область ограничения. По виду полученных графиков следует (рисунок 3.5 и 3.8), что значение кинематического коэффициента имеет постоянный характер только с определенного расстояния. Для описанных случаев это расстояние ≈ 2 м.

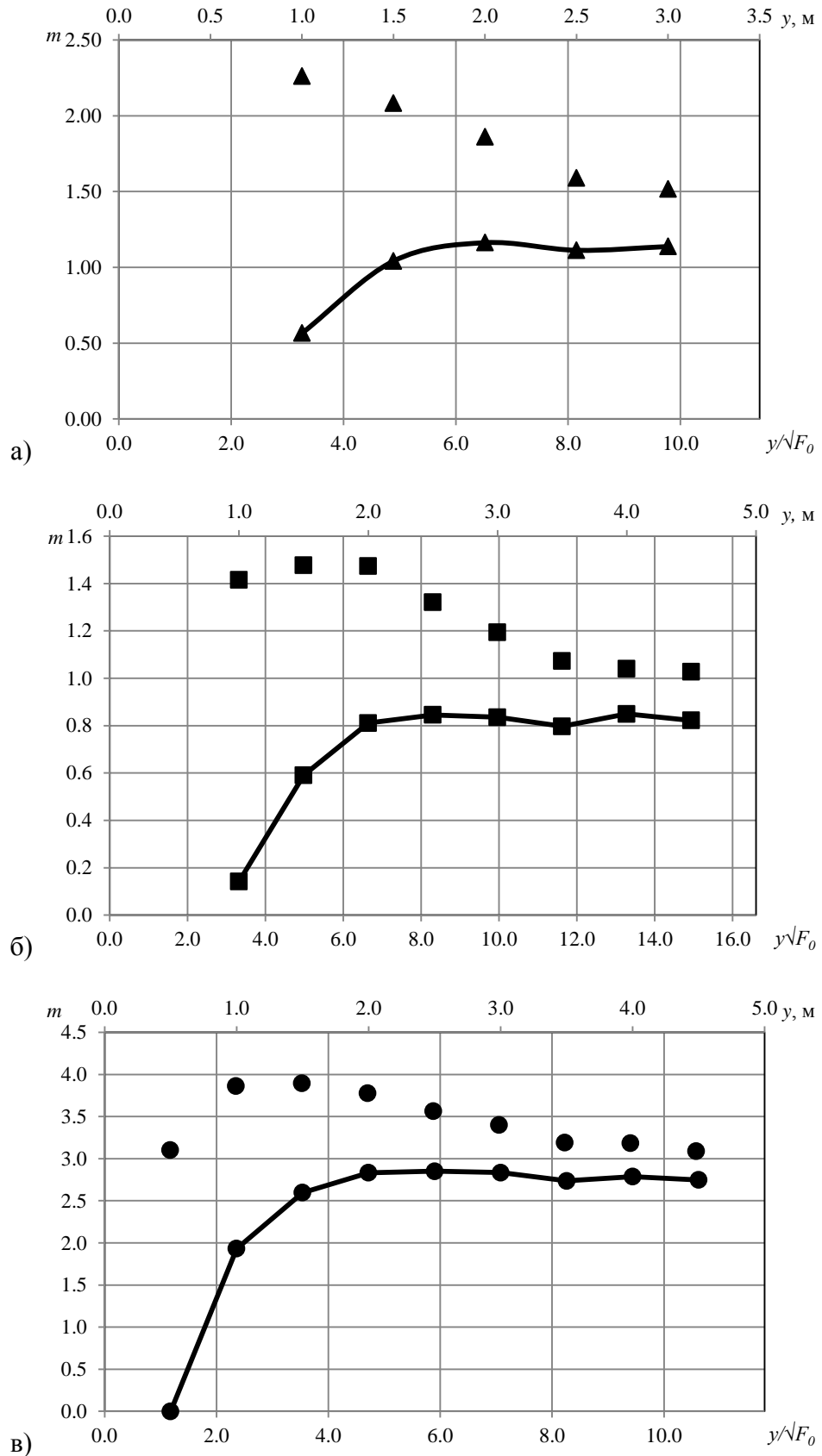


Рисунок 3.8 – Значения кинематического коэффициента m и \tilde{m} по длине струи:
 а – воздухораспределитель 2ВПВ; б – воздухораспределитель 3СПП;
 в – воздухораспределитель 3ДПЗ М

3.5 Выводы по главе 3

1. Подтверждено путем натуральных экспериментов и численного моделирования предположение о непостоянстве кинематического коэффициента m для основного участка струи для сложных по своей конструкции воздухораспределителей.

2. Произведен анализ и объяснена причина непостоянного значения кинематического коэффициента m : приточный поток, истекающий из сложных воздухораспределителей, состоит из отдельных струй, которые сливаются и формируют «классическую струю» на некотором расстоянии от истечения k_m , поэтому при определении кинематического коэффициента следует учитывать это расстояние.

3. Предложена зависимость (3.2) для расчета модифицированного кинематического коэффициента \tilde{m} для воздухораспределителей, у которых наблюдается непостоянство «классического» коэффициента m .

4. Разработана методика определения \tilde{m} , k_m при проведении испытаний производителями воздухораспределительных устройств, у которых наблюдается непостоянство «классического» кинематического коэффициента.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СТЕСНЕННОЙ СТРУИ И ФОРМИРУЕМОГО ЕЮ ОБРАТНОГО ПОТОКА С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

4.1 Постановка задач экспериментальных исследований

С целью изучения характера течения изотермической стесненной струи, подаваемой горизонтально выше рабочей зоны, и формируемого ею обратного потока, производилась серия численных экспериментальных исследований [46, 48].

Основной задачей экспериментальных исследований стесненной струи и обратного потока являлось изучение закономерностей изменения их характеристик, в частности, максимальной скорости воздуха в обратном потоке $V_{обp}^{max}$, м/с, определение которой является неотъемлемой составляющей инженерных расчетов воздухораспределения в помещении.

Известно [27, 62], что скорость в обратном потоке (ОП) зависит от скорости истечения приточного воздуха и параметра поперечного стеснения. Существуют методики определения максимальной скорости воздуха в обратном потоке в зависимости от значений данных параметров (глава 1).

При этом однозначно не установлена зависимость максимальной скорости в ОП следующих параметров [24, 44, 82]:

1. длины помещения (продольного стеснения);
2. положения приточного устройства по высоте помещения (высоты установки приточного устройства);
3. типа воздухораспределительного устройства, характеризуемого кинематическим коэффициентом m или \tilde{m} .

Следовательно, необходимо определить наличие влияния факторов 1÷3 на скорость в ОП с целью их дальнейшего включения в методику расчета воздухораспределения.

4.2 Истечение стесненной струи в помещения различной длины

Известно, что если дальнобойность стесненной струи меньше длины помещения, то за ней образуется слабовентилируемая или застойная зона [27, 62].

В другом случае, когда дальнобойность струи больше длины помещения, струя испытывает продольное стеснение. Данный вид течения мало исследован [62], а существующие в литературе данные носят противоречивый характер.

Так, по одной из существующих методик расчета [27] дальнобойность стесненной струи в относительных единицах формула (1.30) равна $x \approx 0,6$ и не зависит от размера приточного отверстия. Максимальная скорость в обратном потоке наблюдается на относительном расстоянии $\bar{x} \approx 0,3$. При этом в данных исследованиях не содержится информации о характере течения прямого и обратного потоков в помещении длиной меньшей, чем дальнобойность прямой струи.

Согласно исследованиям других авторов [44], дальнобойность струи зависит от размера приточного отверстия. Кроме того, результаты исследований [44] показали наличие влияния величины продольного стеснения на значение максимальной скорости в обратном потоке. Было установлено, что при увеличении продольного стеснения (уменьшение длины помещения), скорость в обратном потоке заметно увеличивается. Однако, численные исследования [44] выполнены для плоской задачи. В связи, с чем требуется проведение исследований с учетом трехмерности рассматриваемого течения.

Таким образом, в исследованиях других авторов практически отсутствует информация о поведении струи при длине помещения меньше, чем ее дальнобойность. Не решен вопрос о влиянии размера приточного отверстия на геометрические и кинематические характеристики прямого и обратного потоков.

В настоящем подразделе проведено исследование течения стесненной струи для различных вариантов длины помещения, в том числе для малоизученного случая, когда дальнобойность струи больше, чем длина помещения.

Постановка задачи

Для определения влияния продольного стеснения на скорость в обратном потоке с помощью численного моделирования исследовалась струя, истекающая из приточного отверстия в помещения различных размеров (таблица 4.1). При этом абсолютная длина помещения a , м, выбиралась таким образом, чтобы безразмерная длина помещения \bar{a} (1.3) для Вариантов №1 и 2 принимала значения $\bar{a} = 0,3; 0,5; 1$.

Известно, что скорость истечения стесненной струи не влияет на ее дальность [27, 62]. Увеличение скорости истечения способствует более интенсивной эжекции окружающего воздуха, что приводит к падению давления в окружающем пространстве. Образовавшееся разрежение сдерживает струю, не позволяя ей распространяться вглубь помещения. Поэтому эксперименты с разными скоростями не проводились.

Для определения значения кинематического коэффициента струи, вытекающей из приточного отверстия, был сделан дополнительный расчет свободно истекающей струи. В результате было получено значение коэффициента $m = 6,7$.

Вытяжное отверстие такого же размера, как и приточное, располагалось над ним непосредственно под потолком (тупиковая схема).

В виду симметричности задачи моделировать половина области.

Граничные условия:

- скорость воздуха в приточном отверстии – “Inlet” – $V_0 = 10$ м/с;
- вытяжное отверстие при расчете помещений и границы области для расчета свободной струи – граничное условие “Open”;
- стены в помещениях – “Wall”;
- на плоскости симметрии – “Symmetry”.

Таблица 4.1 – Геометрические характеристики области исследования

№ Варианта		Размеры помещения			Размер приточного отверстия $a_0 \times b_0$, мм	Высота установки приточного отверстия h_0 , м	Параметр стеснения $\sqrt{F_0/F_n}$	
		Длина		ширина b , м				высота h , м
		абсолютная a , м	относительная \bar{a}					
ВАРИАНТ 1	1.1	56	1	8	8	400x400	4 (0,5h)	0,05
	1.2	28	0,5					
	1.3	16	0,3					
ВАРИАНТ 2	2.1	28	1	4	4	400x400	2 (0,5h)	0.1
	2.2	14	0,5					
	2.3	8	0,3					
ВАРИАНТ 3	3.1	56	1	8	8	1000x1000	4 (0,5h)	0,125

Результаты расчетов

На рисунках 4.1 ÷ 4.2 представлены поля распределения абсолютных скоростей в плоскости симметрии, на рисунке 4.3 – изменение относительной максимальной скорости в прямом $\bar{V}_{np} = V_x/V_o$ и обратном $\bar{V}_{обр} = V_{обр}/V_o$ потоках по длине помещения.

По результатам численного моделирования Вариантов №1 и №2 следует, что при относительной длине помещения $\bar{a} = 1$ приточная струя распадается на относительном расстоянии $\bar{x} \approx 0,5 \div 0,6$, формируя при этом обратный поток, что согласуется с одной из существующих теорией течения стесненной струи [27]. За пределом развития струи образуется застойная зона малой подвижности воздуха. Из представленных рисунков видно, что геометрические (рисунок 4.2) и кинематические (рисунок 4.3) характеристики струи при длине помещения $\bar{a} = 0,5$ и $\bar{a} = 1$ идентичны. При относительной длине помещения $\bar{a} = 0,3$ приточная струя, не успев рассеяться, достигает противоположной стены, настигается на нее, и, разворачиваясь, попадает в рабочую зону со скоростями, превышающими максимальную скорость в обратном потоке под струей. Таким образом, при длине помещения меньшей, чем дальнобойность струи, течение приточного воздуха имеет существенно другой характер, в связи с чем, расчет скорости воздуха для подобного типа помещения следует производить как по обратному потоку, так и по прямому потоку, сравнивая полученные результаты. В этом случае для расчета можно использовать, например, методику, описанную в [27, 79].

При уменьшении линейного размера поперечного сечения помещения в 2 раза с сохранением размера приточного отверстия (переход от Варианта №1 к Варианту №2), дальнобойность струи также уменьшается в ≈ 2 раза, при этом относительная дальнобойность струи изменяется в пределах 10%. Полученный результат также согласуется с существующей теорией течения стесненной струи [27], но противоречит [44, 79], в том, что дальнобойность струи при установке приточного отверстия по центру высоты помещения зависит только от размера поперечного сечения, и не зависит от размера отверстия истечения.

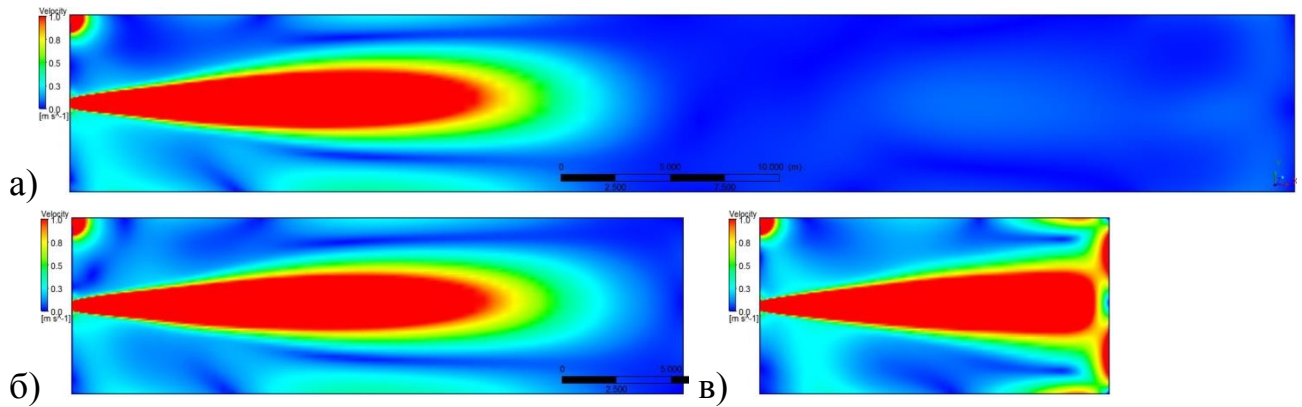


Рисунок 4.1 – Поля скоростей на вертикальной плоскости симметрии при различных относительных длинах помещения (Вариант №1)

а – $\bar{\alpha} = 1$; б – $\bar{\alpha} = 0,5$, в – $\bar{\alpha} = 0,3$.

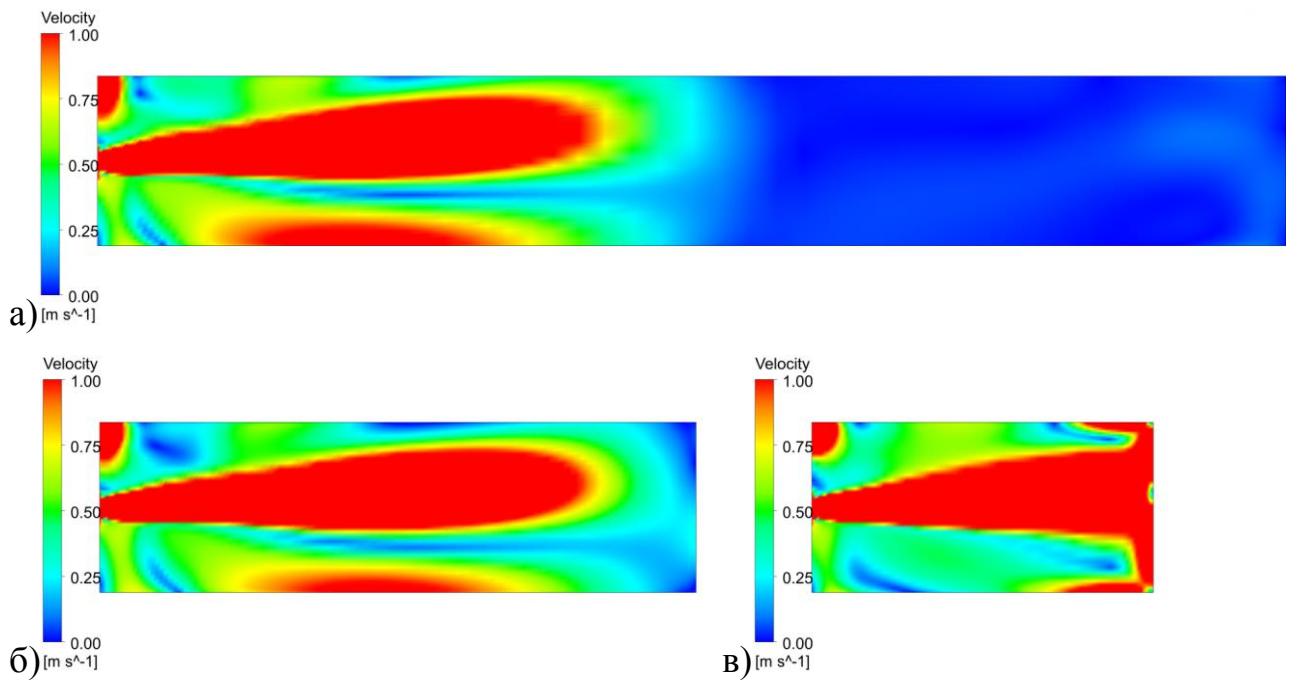


Рисунок 4.2 – Поля скоростей на вертикальной плоскости симметрии при различных относительных длинах помещения (Вариант №2)

а – $\bar{\alpha} = 1$; б – $\bar{\alpha} = 0,5$, в – $\bar{\alpha} = 0,3$.

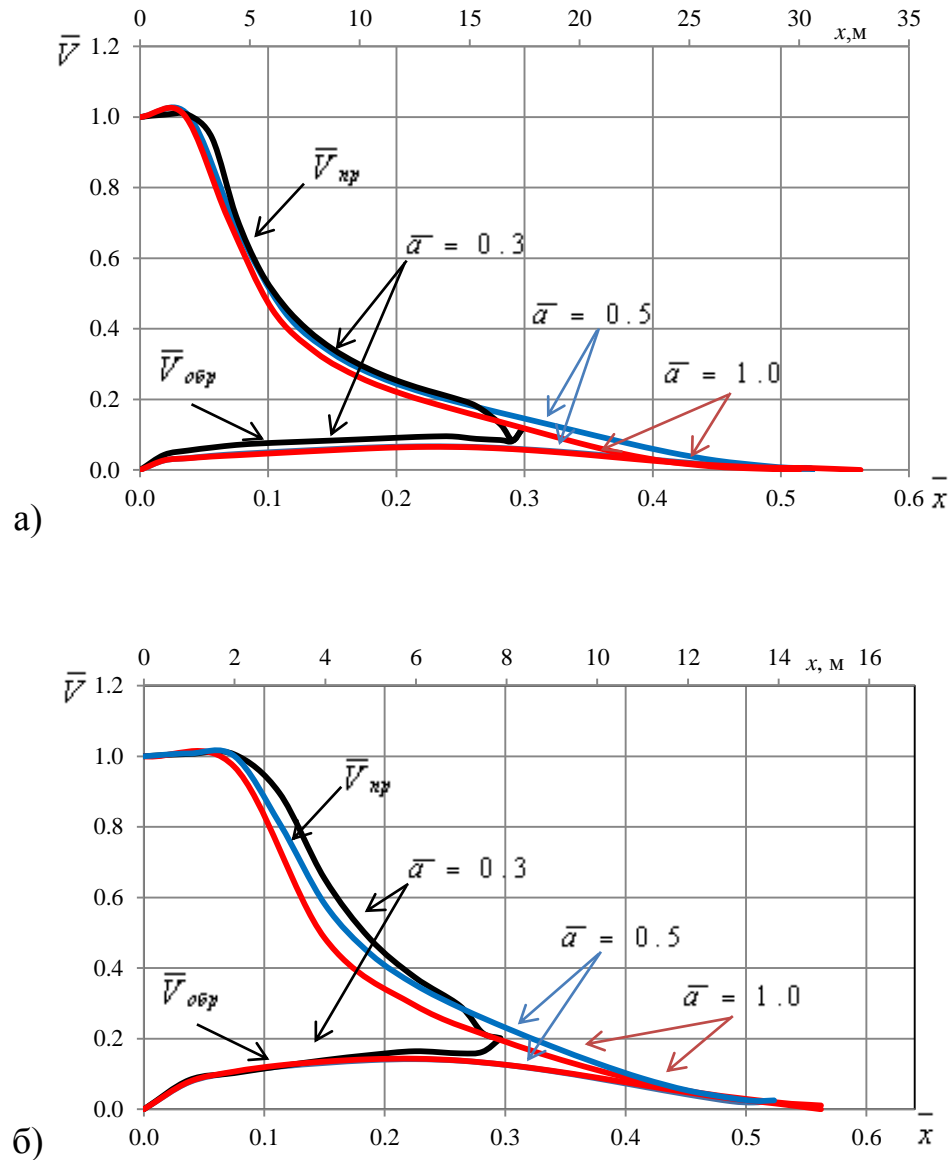


Рисунок 4.3 – Изменение относительной максимальной скорости в прямом и обратном потоках от абсолютного ($x, м$) и относительного (\bar{x}) расстояний для различных вариантов относительной длины помещения (\bar{a}): а – Вариант №1; б – Вариант №2

Для сопоставления результатов расчета для помещений с одинаковой площадью поперечного сечения ($8 \times 8 м$), но с различными по площади приточными отверстиями ($400 \times 400 мм$ и $1000 \times 1000 мм$) был произведен расчет Варианта №3. На рисунке 4.4 показано изменения скорости в прямом и обратном потоках для всех вариантов при относительной длине помещения $\bar{a} = 1$. Полученный результат подтверждает сделанный ранее вывод: дальнобойность

прямого потока в относительных единицах зависит от площади поперечного сечения помещения и не зависит от площади приточного отверстия.

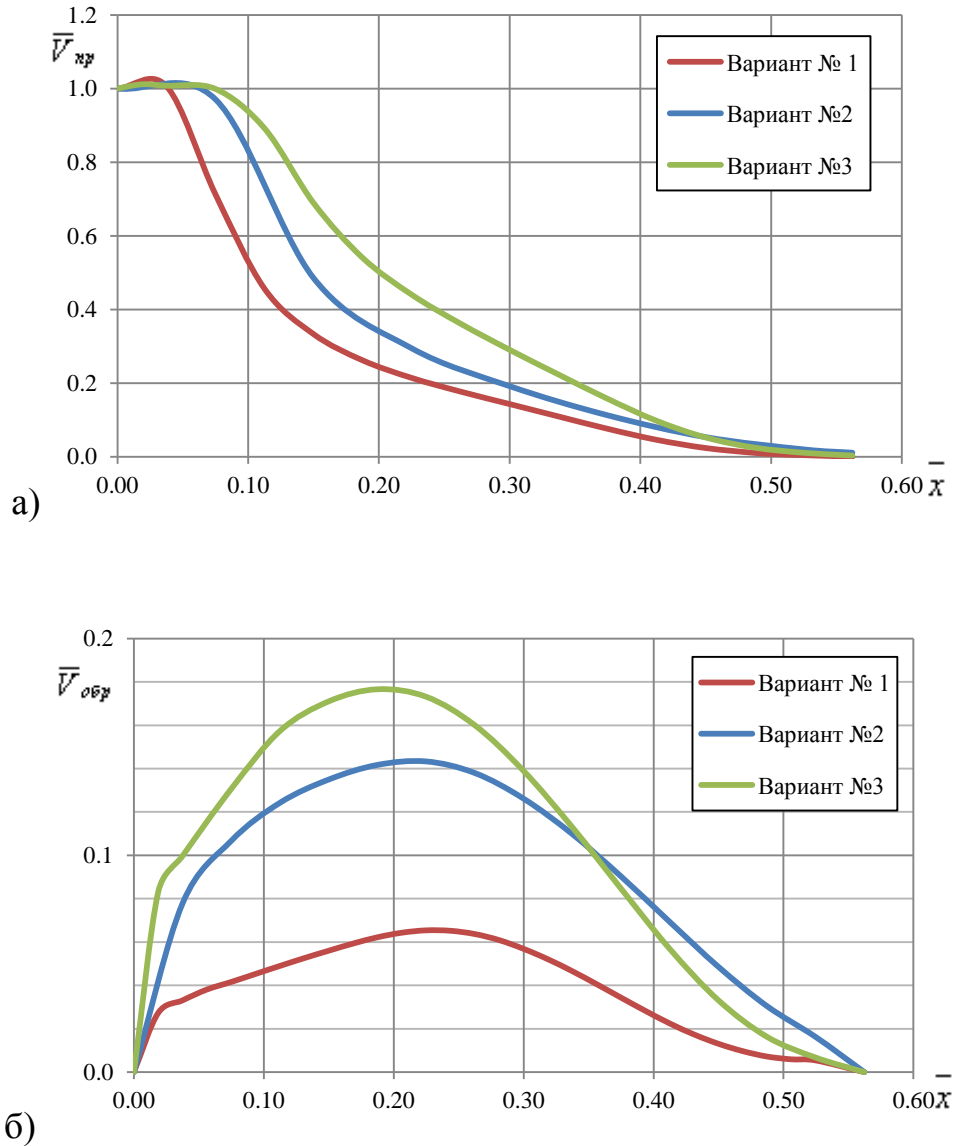


Рисунок 4.4 – Изменение относительной максимальной скорости при относительной длине помещения $\bar{a} = 1$: а – прямой поток; б – обратный поток

Максимальная скорость в обратном потоке для всех трех вариантов наблюдается в диапазоне $\bar{a} = 0,15 \div 0,25$.

На рисунке 4.5 для Варианта №1.1 показано распределение модуля скорости в поперечном сечении, проходящем через зону максимальных скоростей в

обратном потоке. Из представленной картины течения видно, что максимальные значения скорости в обратном потоке наблюдаются не под струей, как принято считать [9, 27, 44, 78, 79], а в углах помещения. Разница в значениях максимальной скорости непосредственно под струей и абсолютно максимальной, наблюдаемой в углах, составляет 71%!

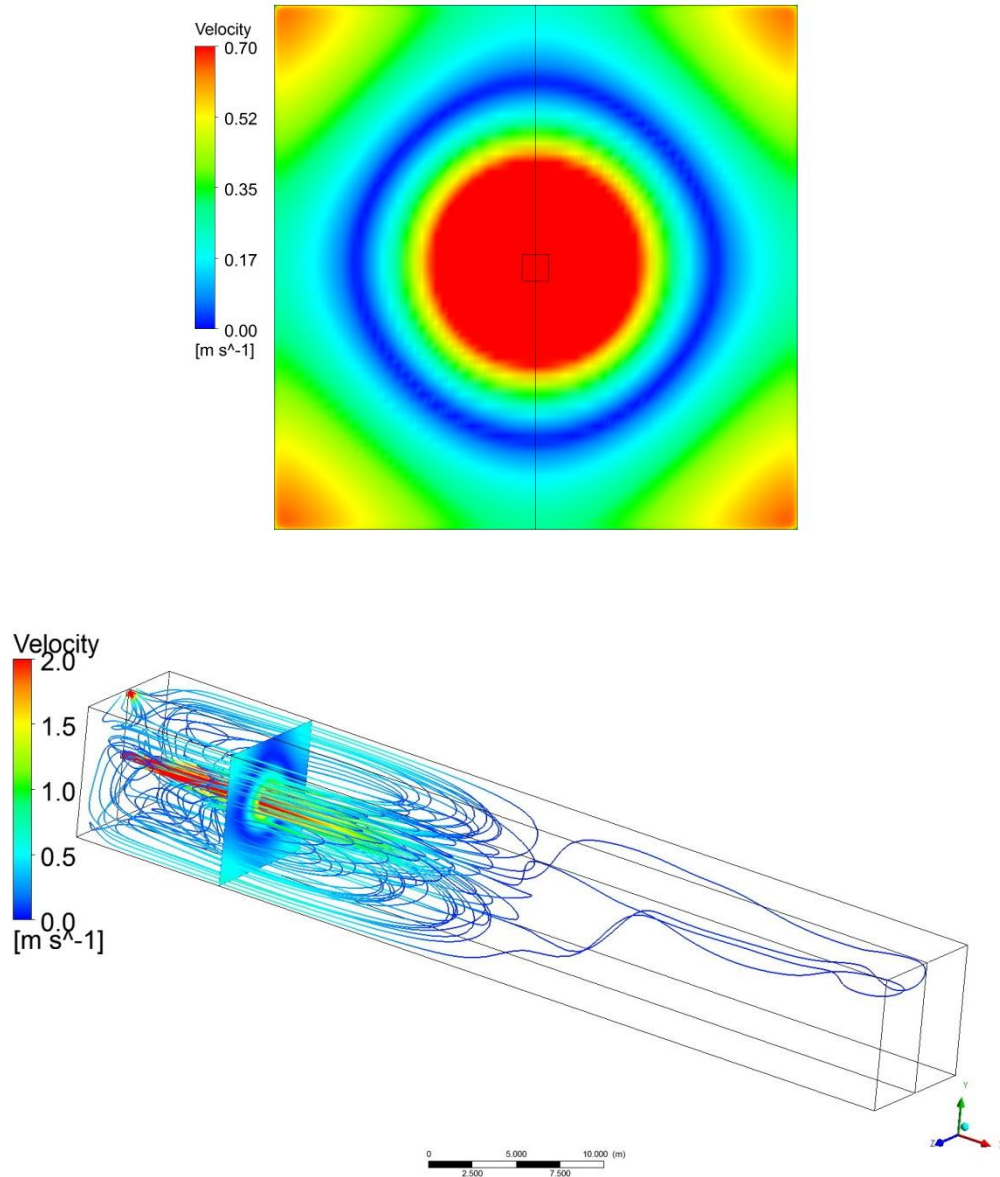


Рисунок 4.5 Поле скоростей в поперечном сечении помещения с максимальной скоростью в обратном потоке Вариант №1.1

Сравнение значений максимальных скоростей в обратном потоке $V_{обр}^{\max}$, полученных в результате численного моделирования и расчета по формуле (1.35),

представлено в таблице 4.2. Сравнение проведено как по значению абсолютных максимальных скоростей в ОП, приходящихся на угловые области помещения, так и с максимальными скоростями в обратном потоке, наблюдающимися непосредственно под струей.

Таблица 4.2 – Максимальная скорость в обратном потоке $V_{обр}^{max}$, м/с.

	Численное моделирование		Расчет по формуле (1.35)
	«под струей»	<i>max</i> значение в углу помещения	
Вариант №1.1	0,38	0,65	0,39

Согласно существующей теории максимальная скорость в обратном потоке находится во втором критическом сечении под струей, где площадь для прохода этого потока наименьшая. В ходе экспериментальных исследований других авторов [9], вероятно, в силу сложности и трудоемкости проведения физического эксперимента, а также учитывая непрямоугольную форму модели помещения, не было обнаружено, что максимальное значение скорости находится не под струей, а в углах помещения. В этом случае вывод формулы (1.35) основан на результатах замеров [9] непосредственно под струей, о чем также свидетельствует согласованность значений скорости, рассчитанной по формуле (1.35), и скорости «под струей» по результатам численного моделирования. Отсутствие учета отличия в значениях максимальных скоростей в углах помещения и в зоне под струей в размере 71% приведет к значительным погрешностям при расчете воздухораспределения при проектировании систем вентиляции, что еще раз доказывает необходимость уточнения формулы для расчета максимальной скорости обратного потока.

Полученный результат был подтвержден для случаев установки двух и трех приточных устройств (рисунок 4.6), когда максимальное значение скорости наблюдается не только в углах, но и в других областях рабочей зоны.

Необходимо отметить, что численные расчеты для подобного вида течений следует проводить только в трехмерной постановке, так как расчет плоских задач может привести к получению некорректных результатов.

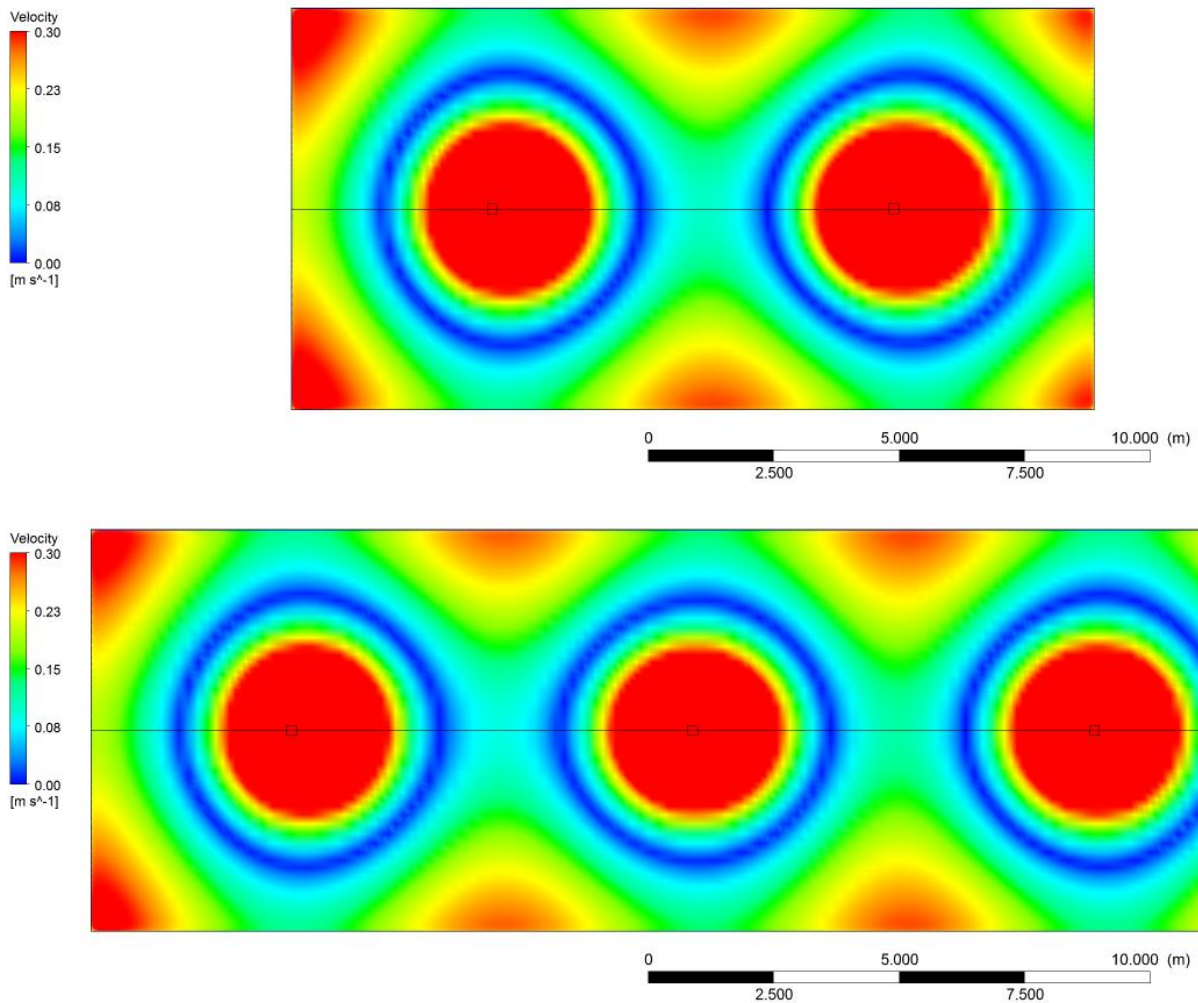


Рисунок 4.6 – Поле скоростей в поперечном сечении помещения с максимальной скоростью в обратном потоке: два приточных устройства (сверху), три приточных устройства (снизу).

С целью выбора формулы для расчета коэффициента стеснения из предложенных различными авторами было произведено сравнение значений осевой скорости приточной струи из Варианта 1.1 со значениями из примера (глава 1). Результаты сравнения представлены на рисунке 4.7

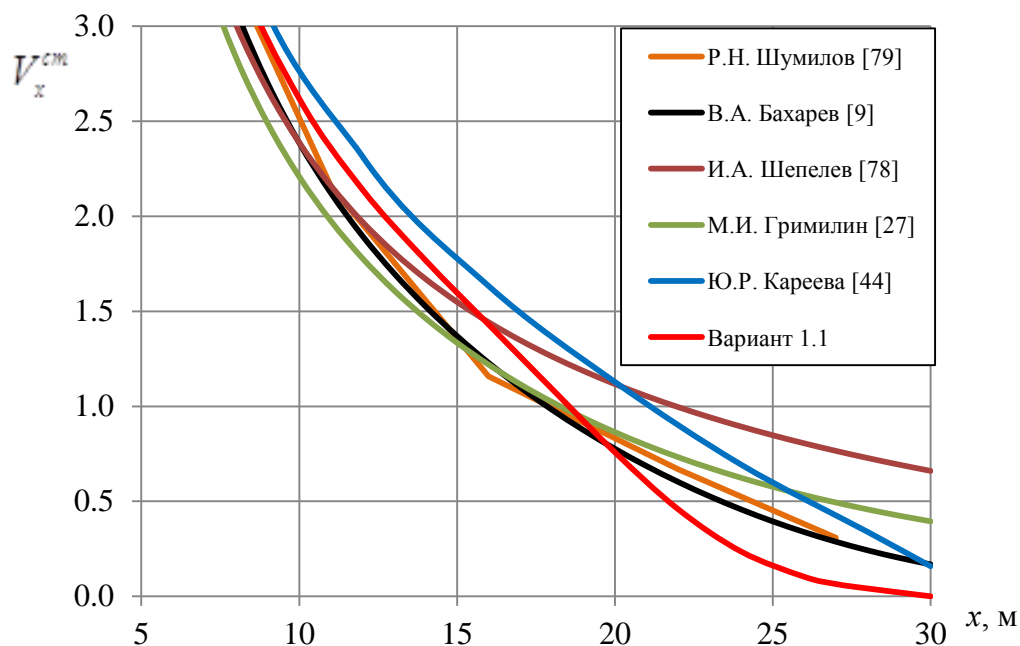


Рисунок 4.7 – Осевая скорость стесненной струи

Как следует из сравнения представленных на рисунке 4.7 данных, ни один из предложенных способов расчета коэффициента стеснения K_c [9, 27, 44, 78, 79] не учитывает реальную дальнобойность стесненной струи, только численного моделирование (Вариант 1.1) показывает полное затухание скорости на расстоянии 30 м. Наиболее близкие к полученным в Варианте 1.1 данным – значения скорости, рассчитанные по формуле, предложенной А.В. Бахаревым / Р.Н. Шумиловым. Учитывая, что задача определения формулы для расчета коэффициента стеснения не входит в рамки настоящей работы, примем для дальнейших расчетов методику определения K_c , предложенную Р.Н. Шумиловым.

По результатам численного моделирования течения струи в помещениях различной длины можно сделать вывод, что:

1. При длине помещения $\bar{a} \geq 0.5$ относительная дальнобойность стесненной струи, при установке приточного отверстия на высоте $h_0 = 0.5h$, зависит только от поперечного размера помещения и составляет $\bar{x} \approx 0.5 \div 0.6$, далее образуется зона малой подвижности воздуха, что согласуется с одной из существующих методик [27].

2. При длине помещения $\bar{a} < 0,5$ прямоочная струя не успевает рассеяться и попадает в рабочую зону прямым потоком. Вести расчет в данном случае следует по прямому потоку и обратному потоку с целью сравнения полученных результатов и определения наибольшего значения.

3. Численными методами подтверждена адекватность формулы (1.35) для расчета максимальной скорости в обратном потоке непосредственно под струей. Для определения максимальной скорости обратного потока во всей плоскости поперечного сечения помещения, необходим учет трехмерности течения и корректировка формулы (1.35).

4.3 Истечение стесненной струи из приточного отверстия, установленного на различной высоте

Целью данных исследований было определить, влияет ли высота расположения приточного отверстия на скорость в обратном потоке стесненной струи.

Использовать высоту установки как фактор при экспериментальных исследованиях для выведения уравнений нельзя, так как не соблюдается требование независимости: высота установки непосредственно под потолком определяется размером приточного отверстия. Следовательно, необходимо определить высоту установки приточного отверстия для дальнейших исследований.

Кроме того, в настоящем разделе было проведено исследование влияния расположения вытяжного отверстия на характер течения стесненной струи.

Как упоминалось в главе 1, исследования стесненной струи производились большинством авторов либо при установке приточного отверстия на полувысоте помещения, либо непосредственно под потолком. Согласно существующей методике [27] для расчета дальнобойности струи при установке воздухораспределителя на высоте $h_0 > 0,85h$ вводится корректировка формулы

(1.35) путем умножения кинематического коэффициента m на 1,4. После корректирования m , дальнобойность настильной струи в относительных единицах получается такой же, как для подаваемой с полувысоты помещения – $\bar{x} \approx 0,6$. При этом информации о влиянии высоты установки в промежуточных положениях на значение максимальных скоростей в ОП в исследовании различных авторов не содержится.

Постановка задачи

Для определения влияния высоты расположения приточного отверстия на значение скорости в обратном потоке на торцевой стенке помещения устанавливалось приточное отверстие различных размеров на высоте от $0,5h$ до «непосредственно под потолком». Геометрические характеристики исследуемых областей представлены в таблице 4.3.

Расположение приточного отверстия ниже полувысоты помещения не рассматривалось, так как в данном случае обратный поток формируется в верхней зоне помещения под потолком, а не в рабочей области.

Для определения влияния расположения вытяжного отверстия расчеты производились для тупиковой и проточной схем течения воздуха. В Варианте №1 вытяжное отверстие 400×400 мм находится под приточным непосредственно у пола (тупиковая схема), либо на противоположной стене непосредственно под потолком (проточная схема). В Вариантах №2 и №3 вытяжное отверстие размерами, соответствующими приточному, располагалось на противоположной стене соосно с приточным (проточная схема).

В виду симметричности задачи моделировать половина области.

Граничные условия:

- скорость воздуха в приточном отверстии – “Inlet” – $V_0 = 10$ м/с в Вариантах №1 и №2 и $V_0 = 5$ м/с в Варианте №3;
- вытяжное отверстие при расчете помещений – граничное условие “Open”;
- стены в помещениях – “Wall”;
- на плоскости симметрии – “Symmetry”.

Таблица 4.3 – Геометрические характеристики области исследования

№ Варианта		Размеры помещения				Размер приточного отверстия $a_0 \times b_0$, мм	Высота установки приточного отверстия h_0 , м	Параметр стеснения $\sqrt{F_0/F_n}$
		Длина		ширина b , м	высота h , м			
		абсолютная a , м	относительная \bar{a} , м					
ВАРИАНТ №1	1.1	56	1	8	8	400x400	4 (0,5h)	0,05
	1.2						5 (0,625h)	
	1.3						6 (0,75h)	
	1.4						7 (0,875h)	
	1.5						7,8 (0,975h)	
ВАРИАНТ №2	2.1	56	1	8	8	200x200	4 (0,5h)	0,025
	2.2						5 (0,625h)	
	2.3						6 (0,75h)	
	2.4						7 (0,875h)	
	2.5						7,9(0,988h)	
ВАРИАНТ №3	3.1	80	1,5	8	8	1000x1000	4(0,5h)	0,125
	3.2						6(0,75h)	
	3.3	100	1,9				7,5(0,938h)	

Результаты расчетов

Для Варианта №1 на рисунке 4.8 представлены поля скоростей на вертикальной плоскости симметрии, на рисунке 4.9 представлено изменение относительной максимальной скорости для прямого и обратного потоков.

Из анализа полученных данных следует, что вне зависимости от места расположения вытяжного отверстия, изменение высоты установки приточного отверстия приводит к отклонению струи в сторону потолка, налипанию на него и увеличению дальнобойности. Дальнобойность приточной струи в относительных единицах при установке приточного отверстия по центру высоты помещения составляет $\bar{x} \approx 0,6$. Максимальной дальнобойности $\bar{x} \approx 1$ струя достигает при установке приточного отверстия непосредственно под потолком, что согласуется с [27].

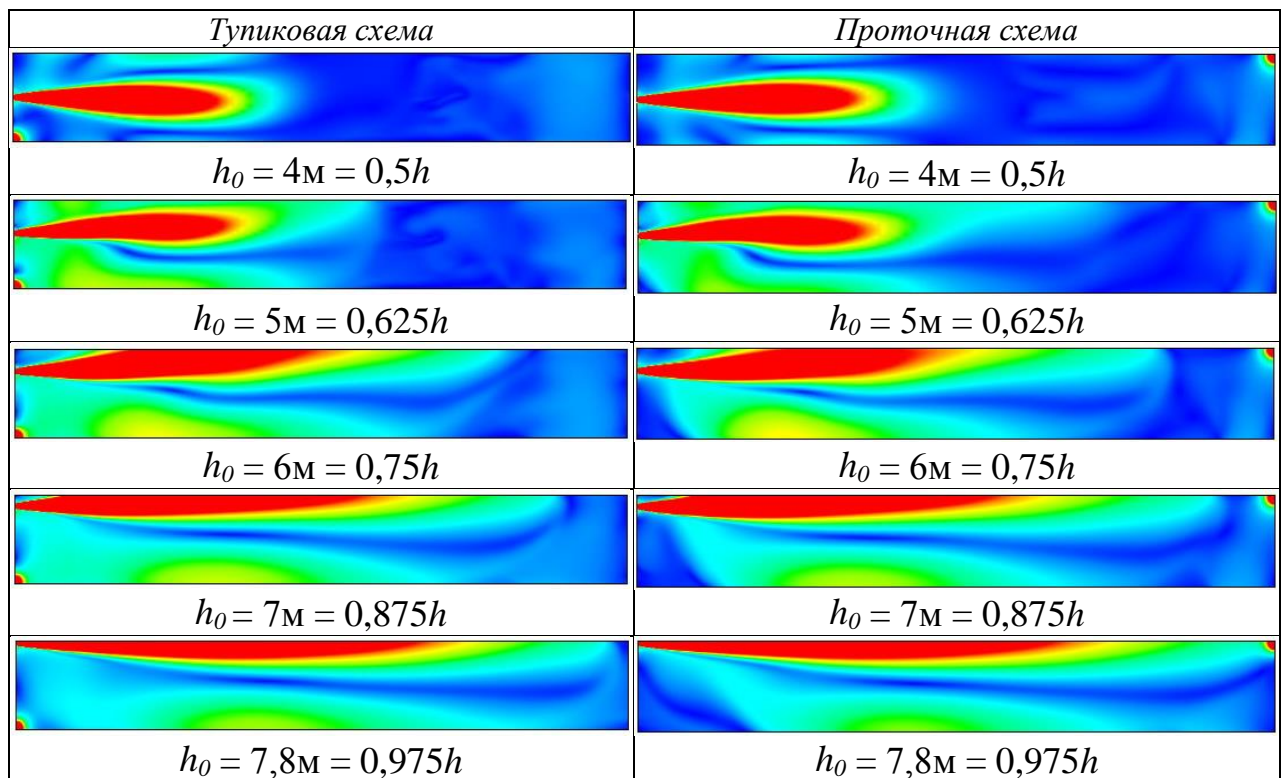


Рисунок 4.8 – Поля скоростей в плоскости симметрии. Вариант №1

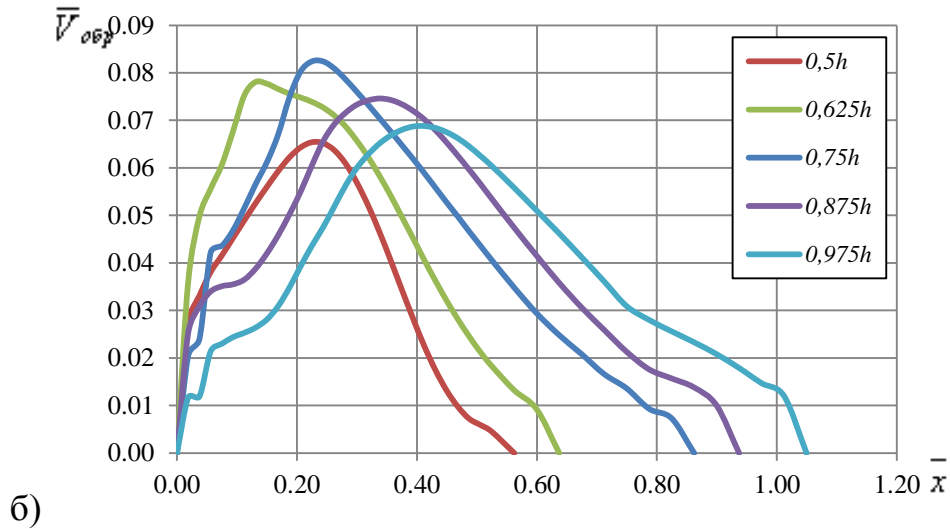
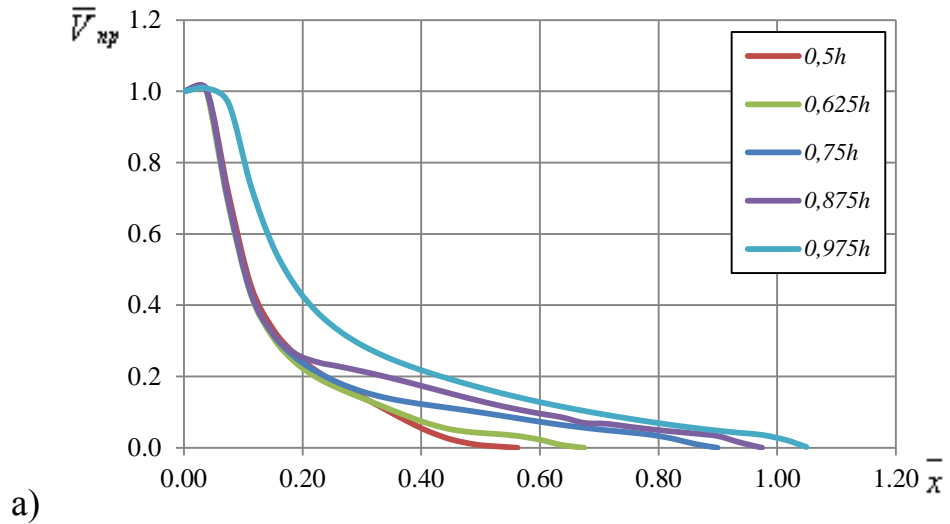


Рисунок 4.9 – Изменение относительной максимальной скорости для Варианта №1 (тупиковая схема)
а – прямой поток; б – обратный поток

Максимальное значение скорости в обратном потоке для Варианта №1 наблюдается при установке приточного отверстия на высоте $h_0=0,75h$ (рисунок 4.9, таблица 4.4), минимальное – при установке по центру или под потолком.

Таблица 4.4 – Результаты экспериментальных исследований Варианта №1

Высота установки приточного отверстия h_0	Максимальная скорость в обратном потоке $V_{обр}^{max}$, м/с			Относительная дальнобойность струи x		
	тупиковая	проточная	Δ , %	тупиковая	проточная	Δ , %
0,5h	0,65	0,65	1	0,49	0,51	4
0,625h	0,78	0,75	4	0,64	0,67	4
0,75h	0,83	0,83	0	0,86	0,88	2
0,875h	0,75	0,72	4	0,94	0,96	2
0,975h	0,69	0,65	6	1,03	1,01	2

Значения максимальных скоростей в зависимости от высоты установки приточного отверстия изменяются до 20%. То есть отсутствие учета влияния высоты установки на максимальную скорость в обратном потоке приведет к заметным погрешностям при инженерных расчетах.

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 (рисунок 4.10). При увеличении высоты установки происходит перераспределение занимаемых площадей: приточная струя, подтягиваясь к потолку, занимает всю верхнюю зону помещения, выдавливая обратный поток в нижнюю. При установке приточного отверстия на высоте $h_0=0,75h$ и выше, обратный потока 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.

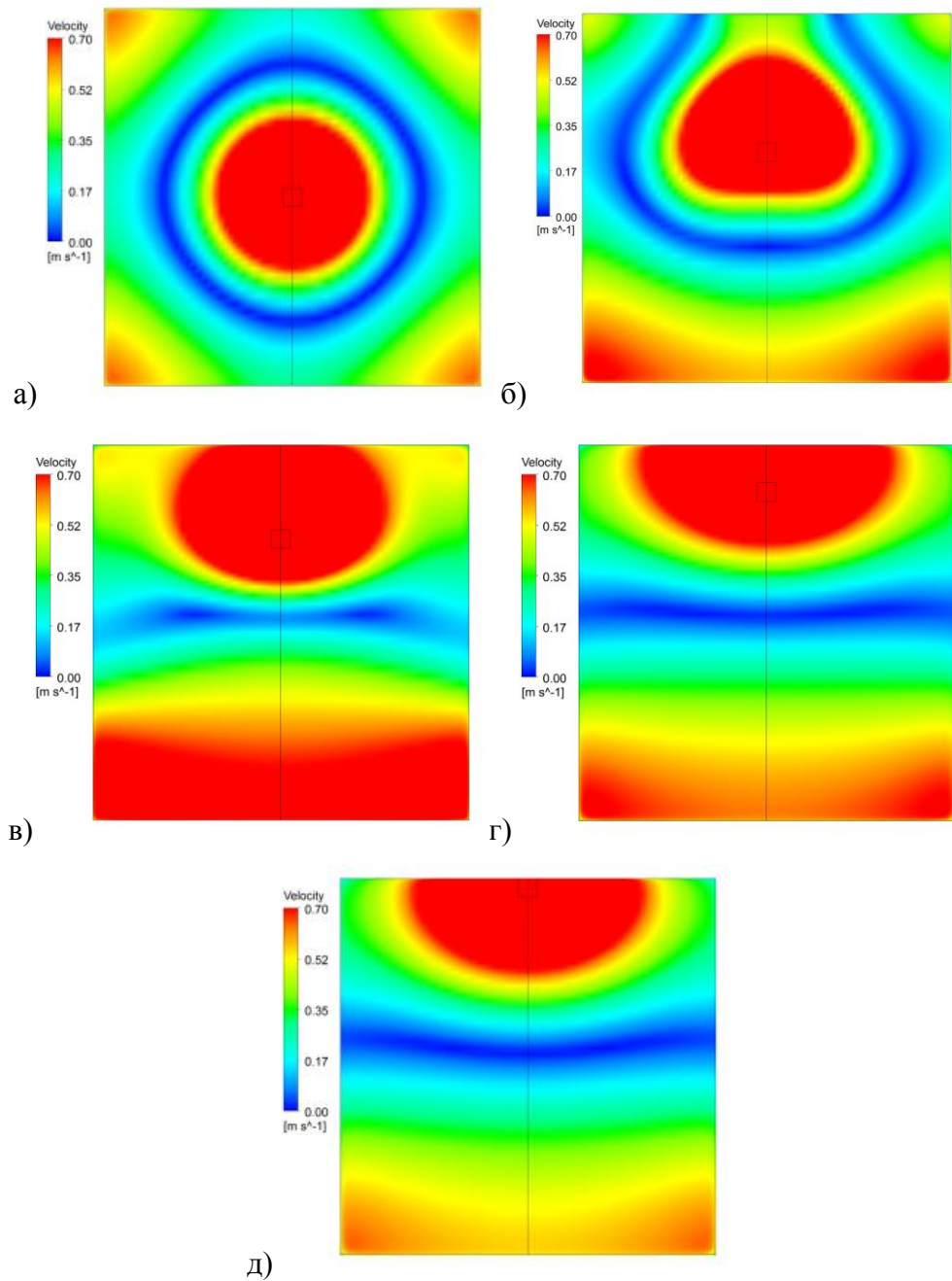


Рисунок 4.10 – Поля скоростей в поперечном сечении с максимальной скоростью в ОП в
Варианте №1:

а – $h_0=0,5h$; б – $h_0=0,625h$; в – $h_0=0,75h$; г – $h_0=0,875h$; д – $h_0=0,975h$

Как следует из результатов исследований тупиковой и проточной схемы течения воздуха для Варианта №1, место расположения вытяжного отверстия практически не влияет на геометрические и кинематические характеристики струи, разница в значениях составляет не более 6%. Это объясняется тем, что

радиус действия вытяжного отверстия не велик, и сопоставим с размерами самого отверстия.

Характер изменения геометрических и кинематических параметров стесненной струи для Вариантов №2 и №3 такой же, как и для Варианта 1: при увеличении высоты установки, дальность струи увеличивается, максимальная скорость в обратном потоке наблюдается при $h_0=0,75h$, разница между минимальным и максимальным значениями скорости составляет 19÷21%. В таблице 4.5 приведены результаты расчетов для Вариантов №2, 3.

Таблица 4.5 – Результаты экспериментальных исследований Вариантов №2, №3.

Высота установки приточного отверстия h_0	Максимальная скорость в обратном потоке $V_{\max}^{обп}$, м/с		Относительная дальность \bar{X}	
	Вариант №2	Вариант №3	Вариант №2	Вариант №3
0,5h	0,35	0,74	0,6	0,6
0,625h	0,37	-	0,6	-
0,75h	0,40	0,94	0,8	0,9
0,875h	0,37	-	0,9	-
0,988h / 0,938h	0,32	0,80	1,0	1,0

На рисунке 4.11 для Вариантов №1, 2, 3 в зависимости от относительной высоты установки приточного отверстия $\bar{h} = 1 - \left| \frac{h_0 - 0,75h}{0,25h} \right|$ точками показан

коэффициент $k_v = \frac{V_{обп}^{\max}}{V_{обп-0,75h}^{\max}}$, характеризующий изменение максимальной

скорости воздуха в обратном потоке при установке воздухораспределителя на

высоте $h_0 \neq 0,75h$ по отношению к максимальной скорости в обратном потоке воздуха при установке воздухораспределителя на высоте $h_0=0,75h$.

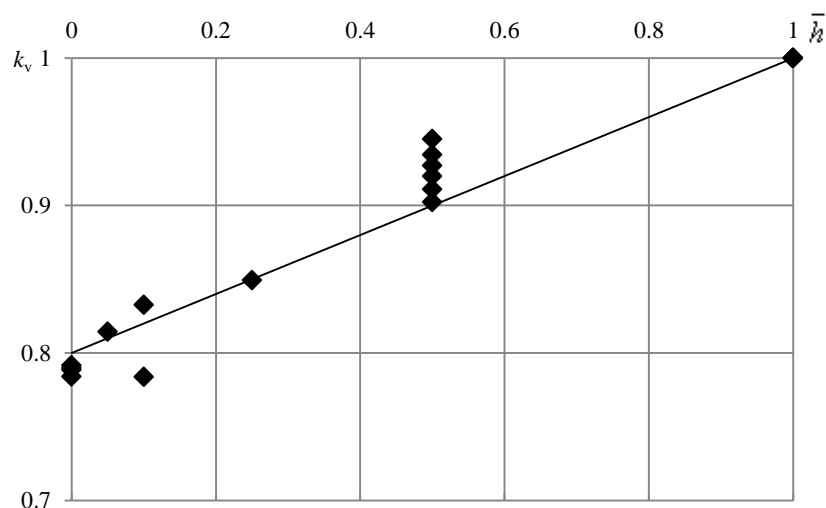


Рисунок 4.11 – Коэффициент корректировки скорости k_v в зависимости от относительной высоты установки воздухораспределителя \bar{h}

Полученный результат (рисунок 4.11) демонстрируют, что изменение параметра поперечного стеснения в диапазоне $\sqrt{F_0/F_n} = 0,025 \div 0,125$ не влияет на характер изменения скорости.

Аппроксимация точек позволяет получить зависимость для определения коэффициента корректировки скорости при различной высоте установки воздухораспределителя

$$k_v = 0,2\bar{h} + 0,8 \quad (4.1)$$

По результатам исследования течения стесненной тупиковой и проточной струи, истекающей из приточного отверстия, установленного на различной высоте, можно сделать следующие выводы:

1. Значение максимальных скоростей в обратном потоке зависит от высоты установки приточного отверстия: наибольшие скорости наблюдаются при высоте $h_0=0,75h$. Изменение максимальных скоростей в ОП в зависимости

от высоты установки можно описать формулой (4.1). При этом разница в значениях максимальных скоростей составляет около 20% и не зависит от параметра стеснения.

2. Место расположения вытяжного отверстия не влияет на геометрические и кинематические характеристики струи в исследованном диапазоне.

4.4 Истечение стесненной струи из различных типов воздухораспределителей

Целью данных исследований было определить влияние типа воздухораспределительного устройства на характеристики обратного потока стесненной струи.

Как было показано в главе 1, экспериментальные исследования стеснённой струи выполнялись, в основном, при истечении приточного воздуха из отверстий. Только Р.Н. Гобза [24] показал, что подвижность воздуха в рабочей зоне увеличивается с уменьшением значением коэффициента турбулентной структуры струи a , при этом никаких зависимостей получено не было.

Существующие и используемые в настоящее время методики [27, 44, 78, 79] не учитывают влияние воздухораспределительного устройство на течение обратного потока и на значение скорости в нем.

Для решения поставленной задачи исследовались струи, истекающие из типичных для данной схемы воздухораспределения приточных устройств: сопла, решетки и отверстия.

Постановка задачи

С целью определения влияния типа воздухораспределителя, характеризуемого кинематическим коэффициентом m , на характер течения струи в стесненных условиях, а также на значение максимальной скорости в

обратном потоке с помощью численного моделирования исследовалась струя, истекающая в помещение из различных по типу и размеру ВР, установленных на высоте $h_0=0,75h$.

Для моделирования ВР был разработан следующий подход. Приточное отверстие разбивается на несколько фрагментов, в каждом из которых задается свой вектор скорости. Благодаря такой схеме можно реализовать различные виды струй. Так, при делении приточного отверстия на 8 фрагментов была симитирована струя, истекающая из решетки с веерно раскрытыми ламелями в горизонтальной плоскости, а при делении на 16 фрагментов была симитирована струя, истекающая из сопла (рисунок 4.12). Угол наклона векторов скорости к геометрической оси изделия изменялся от 0° до $+30^\circ$ при имитации решетки, и от 0° до -60° при имитации сопла.

Разработанный и примененный подход позволил упростить геометрию экспериментальной области, сократить количество элементов расчетной сетки и соответственно время расчета. Кроме того, использование данного подхода позволило рассмотреть широкий диапазон значений коэффициента m .

Коэффициент m для исследуемых ВР 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; $m=8,1$, $m=9,5$ – сопло.

Размеры помещения: поперечное сечение $8 \times 8 \text{ м}^2$, длина – варьировалась в зависимости от значения коэффициента m и принималась таким образом, чтобы относительная длина составляла $a \geq 0,6$. Учитывая, что $h_0=0,75h$, коэффициент m при определении a корректировался в 1,4 раза. Параметры исследуемых вариантов представлены в таблице 4.6.

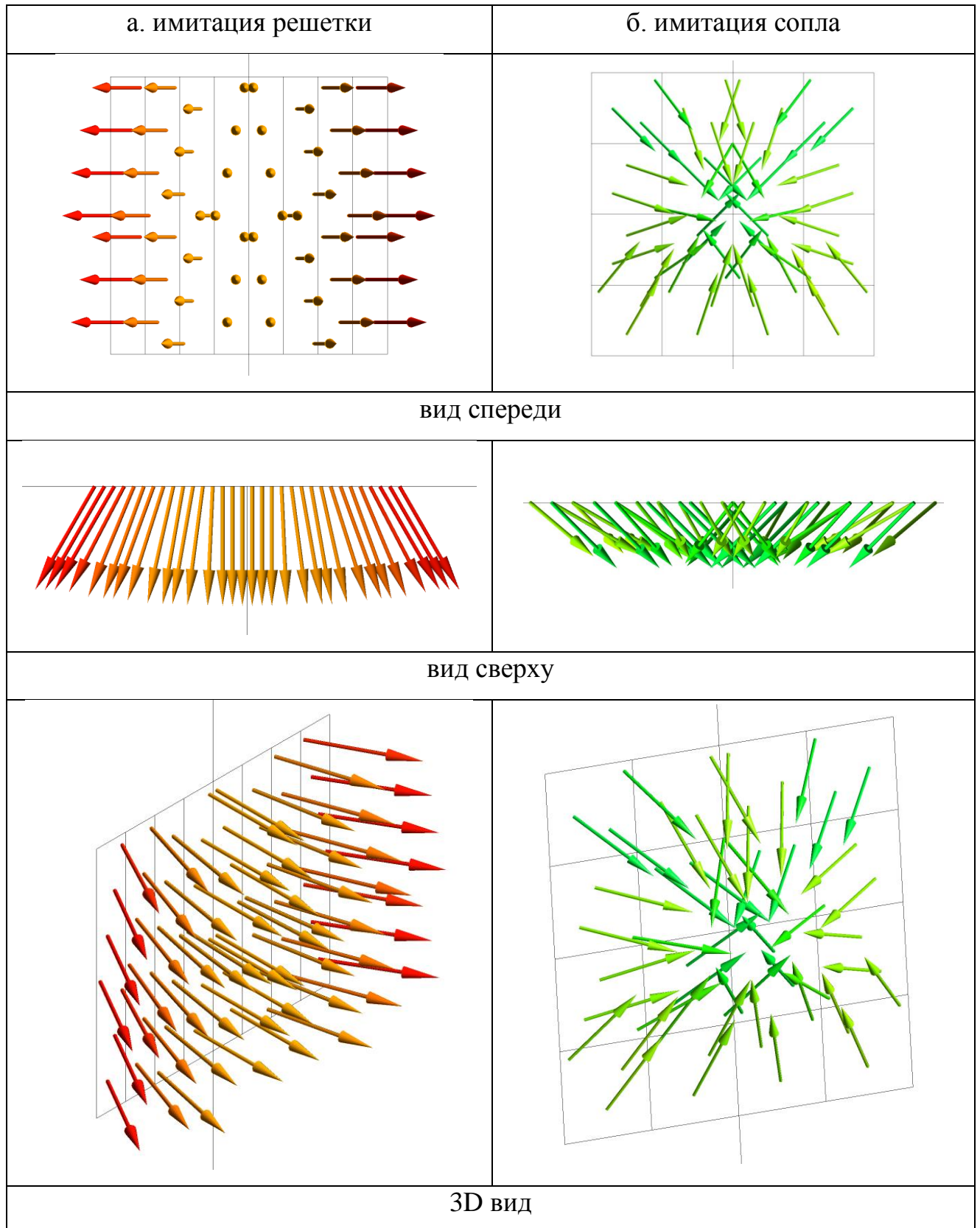


Рисунок 4.12 – Имитация воздухораспределительного устройства:

а – решетка, б – сопло

Таблица 4.6 – Параметры исследованных вариантов

№ Варианта		Размер приточного отверстия $a_0 \times b_0$, мм	Длина помещения		Кин. коэф m
			абсолютная a , м	относительная \bar{a}	
ВАРИАНТ №1	1.1	100x100	20	0,65	3,2
	1.2	100x100	38	0,60	6,7
	1.3	100x100	56	0,60	9,5
ВАРИАНТ №2	2.1	400x400	20	0,65	3,2
	2.2	400x400	38	0,90	4,4
	2.3	400x400	38	0,75	5,3
	2.4	400x400	38	0,60	6,7
	2.5	400x400	56	0,72	8,1
	2.6	400x400	56	0,60	9,5
ВАРИАНТ №3	3.1	1000x1000	22	0,60	3,2
	3.2	1000x1000	36	0,73	4,4
	3.3	1000x1000	36	0,60	5,3
	3.4	1000x1000	56	0,75	6,7
	3.5	1000x1000	56	0,62	8,1
	3.6	1000x1000	64	0,60	9,5

В виду симметричности задачи моделировать половина области.

Граничные условия:

- скорость воздуха в расчетном сечении – “Inlet” $V_0 = 7$ м/с;
- вытяжное отверстие при расчете помещений – граничное условие “Open”;
- стены в помещениях – “Wall”;
- на плоскости симметрии – “Symmetry”.

Результаты расчетов

В таблице 4.7 и на рисунке 4.13 представлены результаты численного моделирования исследованных вариантов. Для удобства сравнения значения максимальной скорости в обратном потоке для разных размеров воздухораспределительного устройства приведены относительные безразмерные значения $V_{обп}^{max} / \sqrt{F_0}$.

Таблица 4.7 – Результаты численного моделирования для
Вариантов №1÷3

№ Варианта	Размер приточного отверстия $a_0 \times b_0$, мм	Кин. коэф m	Максимальная скорость в обратном потоке $V_{обп}^{max}$, м/с	$V_{обп}^{max} / \sqrt{F_0}$
1.1	100x100	3,2	0,12	1,17
1.2	100x100	6,7	0,15	1,48
1.3	100x100	9,5	0,22	2,21
2.1	400x400	3,2	0,49	1,22
2.2	400x400	4,4	0,51	1,28
2.3	400x400	5,3	0,54	1,35
2.4	400x400	6,7	0,55	1,37
2.5	400x400	8,1	0,73	1,81
2.6	400x400	9,5	0,87	2,17
3.1	1000x1000	3,2	1,14	1,14
3.2	1000x1000	4,4	1,22	1,22
3.3	1000x1000	5,3	1,29	1,29
3.4	1000x1000	6,7	1,37	1,37
3.5	1000x1000	8,1	1,76	1,76
3.6	1000x1000	9,5	2,17	2,17

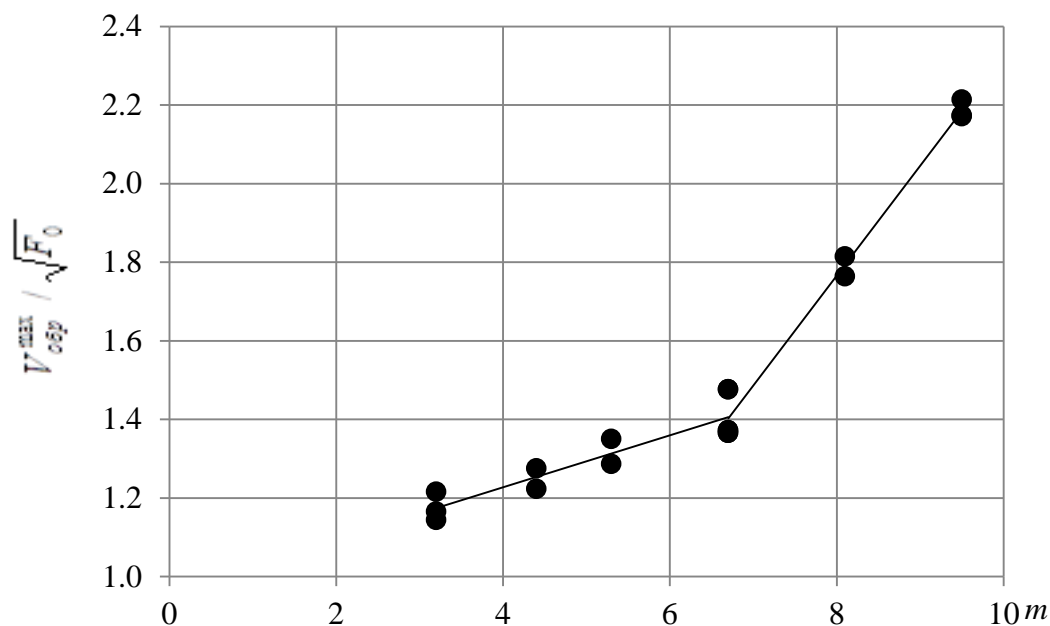


Рисунок 4.13 – График зависимости максимальной скорости в обратном потоке, выраженной в безразмерной величине $V_{обп}^{max} / \sqrt{F_0}$, от коэффициента m

Полученные результаты (таблица 4.7, рисунок 4.13) наглядно свидетельствуют о существующей зависимости между типом воздухораспределительного устройства и значением максимальной скорости в обратном потоке. На представленном графике (рисунок 4.13) можно четко 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 это тем, что характер распределения приточной струи в поперечном сечении помещения, истекающей из решетки с веерным раскрытием ламелей, кардинальным отличается для прямого и обратного потока по сравнению с компактной струей, истекающей из отверстия или сопла.

Рассмотрим детально результаты расчетов Вариантов №2.1, №2.4 и №2.6 (рисунки 4.14, 4.15).

На рисунке 4.14 представлено изменение площади S прямого и обратного потоков в процентах от поперечного сечения помещения, пунктиром показано сечение с максимальной скоростью в ОП.

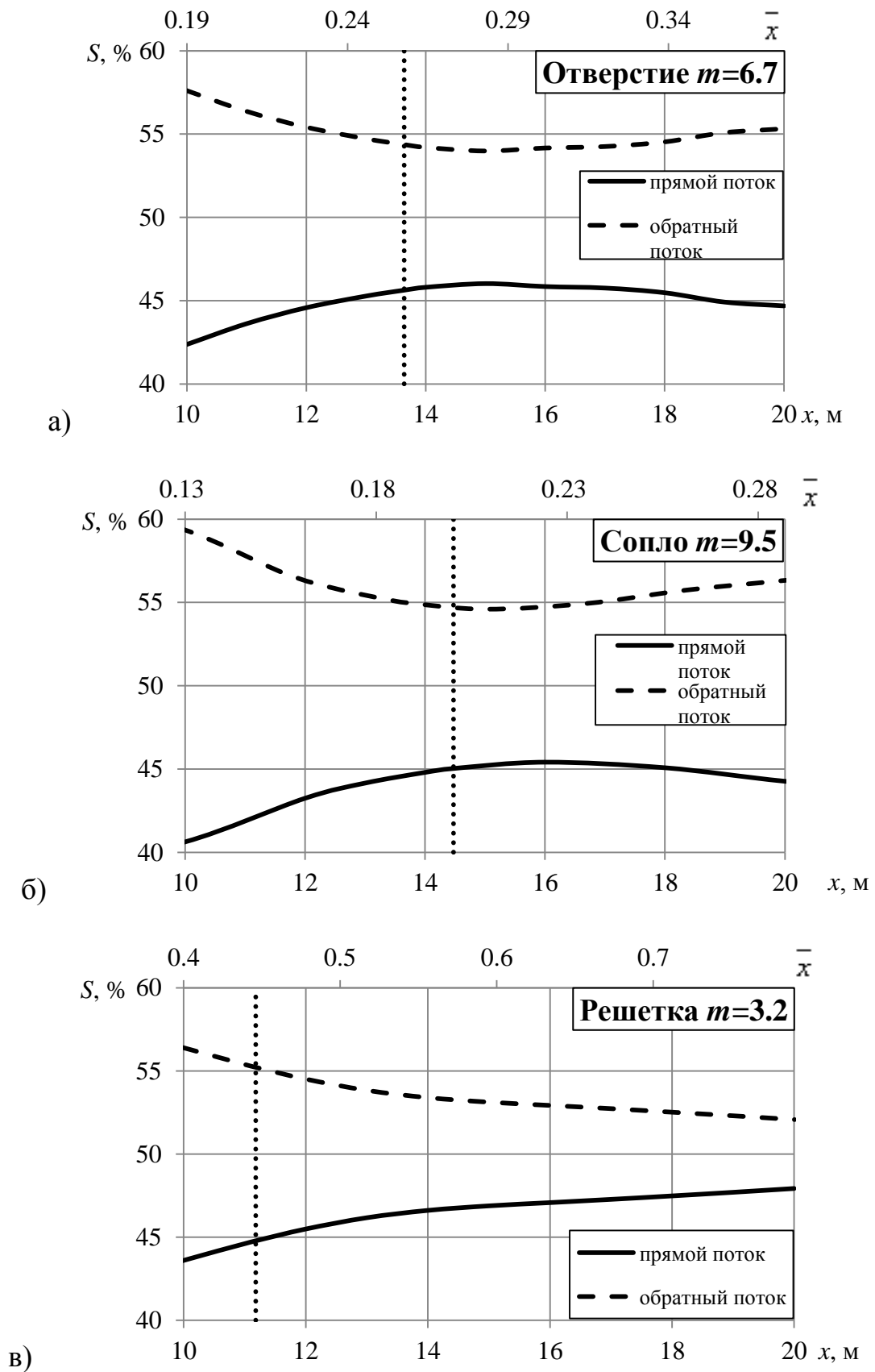


Рисунок 4.14 – Изменение площади прямого и обратного потока:
 а – истечение из отверстия; б – истечение из сопла; в – истечение из решетки.
 Пунктиром показаны сечения с максимальным значением скорости в ОП

Результаты расчета для отверстия (Вариант №2.4) согласуются с изложенной ранее теорией [9, 27, 79]: максимальная площадь поперечного сечения струи составляет $\approx 45\%$ от площади помещения; участок с максимальной поперечной площадью находится на относительном расстоянии $\bar{x} = 0.25 \div 0.35$, что соответствует второму критическому сечению [27]; максимальное значение скорости в обратном потоке находится также этом же участке.

Так как при истечении из сопла (Вариант №2.6) формируется такой же вид струи (компактная осесимметричная струя), как и для отверстия, характер течения и принцип распределения потоков в помещении для этих ВР качественно совпадает, площадь поперечного сечения струи также составляет $\approx 45\%$. Положение сечения с максимальной скоростью в абсолютных единицах примерно одинаковое $\approx 14\text{м}$ (отличие составляет 5%), но в относительных единицах наблюдается более существенная разница – 30%. Критическое сечение находится на $\bar{x} = 0.19$, что меньше $\bar{x} = 0.25 \div 0.35$ не согласуется с [9, 27].

Схема развития прямого и обратного потоков для истечения из решетки (Вариант №2.1) существенно отличается от отверстия и сопла, что подтверждает сделанный ранее вывод. Можно отметить, что полученный результат не согласуется с теорией о развитии стесненной струи с [9, 27]. При этом стоит отметить, что положение сечения с максимальной скоростью в обратном потоке находится примерно на таком же расстоянии, как и для других вариантов, отличие от отверстия составляет $\approx 18\%$. Таким образом можно сделать предположение, что положение сечения с максимальной скоростью в ОП в абсолютных единицах не зависит от типа воздухораспределителя.

На рисунке 4.15 показано изменение коэффициентов эжекции $K_{эж}$ для в прямом и обратном потоках для рассчитанных вариантов. Коэффициент эжекции определялся по следующей формуле

$$K_{эж} = \frac{L_x - L_0}{L_0}, \quad (4.2)$$

где L_x – объемный расход воздуха в струе на расстоянии x , $\text{м}^3/\text{с}$.

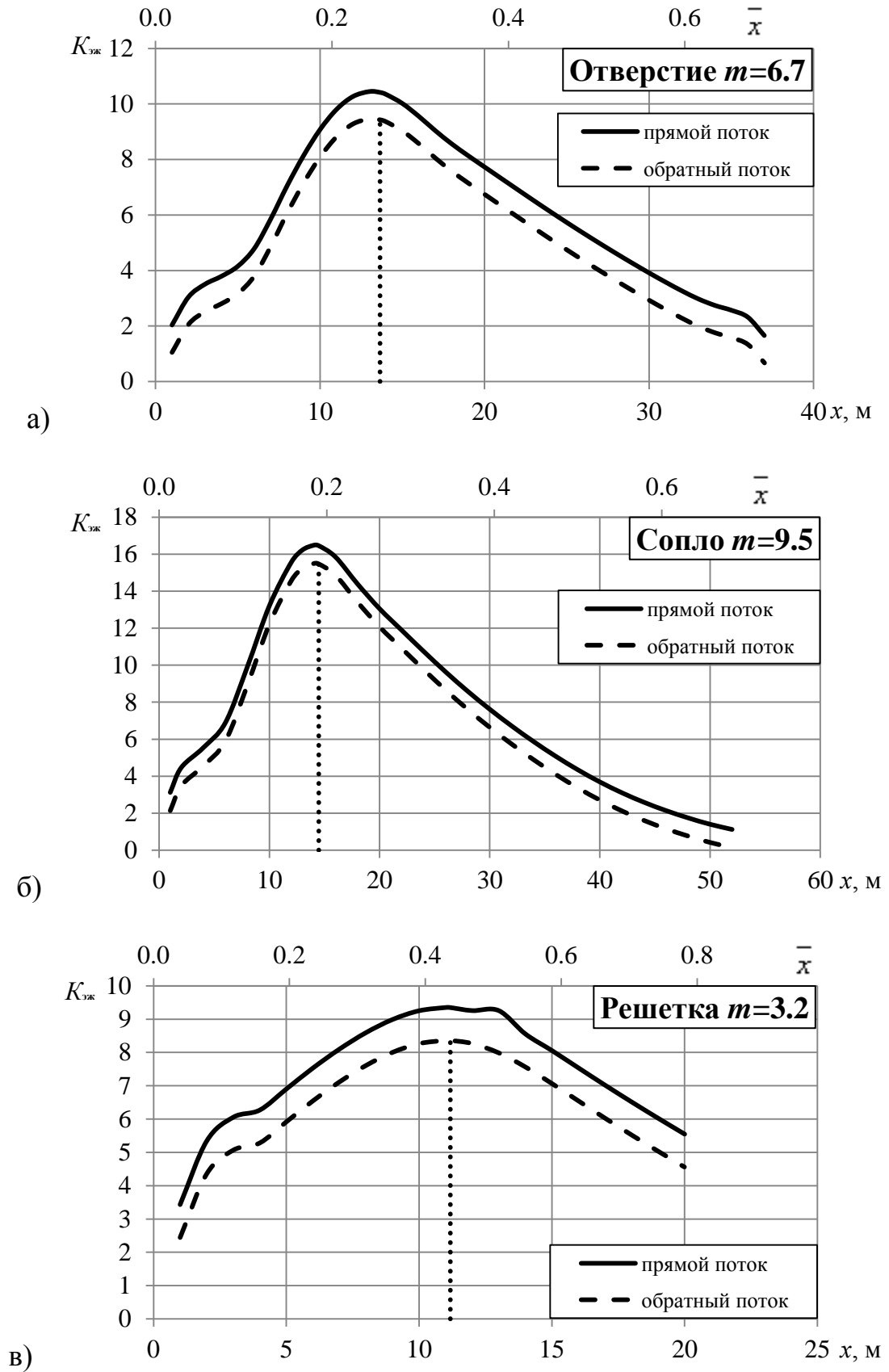


Рисунок 4.15 – Коэффициент эжекции и обратного потока:

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

Пунктиром показаны сечения с максимальным значением скорости в ОП

Приведенные на рисунке 4.15 значения коэффициентов эжекции характеризуют изменение расходов в приточной струе и обратном потоке.

Изменение расхода в струе из отверстия и сопла качественно совпадает, при этом количественно отличается до 60%, что объясняет разницу в максимальной скорости в этих вариантах, которая также составляет $\approx 60\%$.

Расход в струе, истекающей из решетки, меняется качественно по-другому, чем из отверстия, но при этом количественные значения достаточно близки, что отражается и на максимальных значениях скоростей (отличие составляет $\approx 30\%$).

Подводя итог вышесказанному, можно сделать вывод о целесообразности получения двух независимых расчетных уравнений для определения максимальной скорости в ОП (от $m=3,2$ до $m=6,7$ и от $m=6,7$ до $m=9,5$), учитывая кардинально отличный характер развития прямого и обратного потока для рассмотренных случаев.

По результатам исследования течения стесненной струи истекающей из трех видов воздухораспределительных устройств, можно сделать следующие выводы:

1. Значение максимальных скоростей в обратном потоке зависит от типа воздухораспределительного устройства, отличие в значениях доходит до 1,8 раз.

2. Учитывая кардинально различный характер течения прямого и обратного потоков при истечении осесимметричных и неполных веерных струй, целесообразно вывести два независимых расчетных уравнений для определения максимальной скорости в ОП для указанных видов струй.

4.5 Выводы по главе 4

1. Установлено, что значение максимальных скоростей в обратном потоке зависит от:

- продольного стеснения при длине помещения $\bar{a} < 0,5$, когда прямоочная струя не успевает рассеяться и попадает в рабочую зону прямым потоком. Вести расчет в данном случае следует по прямому потоку и обратному потоку совместно, выбирая максимальное значение из полученных для сопоставления с нормируемым;

- высоты установки приточного отверстия: наибольшие скорости наблюдаются при высоте $h_0 = 0,75h$. Изменение максимальных скоростей в ОП в зависимости от высоты установки можно описать линейным уравнением (4.1);

- типа воздухораспределительного устройства;

и не зависит от:

- места расположения вытяжного отверстия в исследованном диапазоне.

2. Уточнена схема развития обратного потока в реальных помещениях: максимальные значения скорости в обратном потоке наблюдаются не под струей, как принято считать [9, 27, 44, 78, 79], а в углах помещения при установке одного ВР или в углах посередине между воздухораспределителями при установке двух и более ВР. Отличие в значениях скорости составляет до 70%.

3. Апробировано и обосновано допущение использования замены при численном моделировании реальных сложных конструкций воздухораспределителей векторами скорости, позволяющей существенно сократить время на подготовку и расчет задачи и способствующей внедрению методов численного моделирования при решении практических задач.

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕСНЕННОЙ СТРУЕЙ

5.1 Постановка задачи

С целью оценки влияния продольного стеснения, высоты установки и типа воздухораспределительного устройства на скорость на характер течения стеснённой струи и формируемый ею обратный поток была проведена серия численных экспериментальных исследований (подразделы 4.2÷4.4). В результате было установлено влияние указанных выше факторов на скорость в обратном потоке. Учет этих факторов при расчете скорости позволит существенно повысить точность проектных расчетов воздухораспределения.

Для усовершенствования метода расчета воздухораспределения стесненными струями необходимым является выведение зависимостей, позволяющих рассчитывать скорость в обратном потоке стесненной струи для произвольных значений влияющих факторов. Искомые зависимости возможно получить в результате проведения серии численных экспериментальных исследований, обработанных с использованием методов математического планирования эксперимента.

Проведенные в подразделах 4.2÷4.4 исследования позволили однозначно определить количество факторов, которые необходимо учитывать при разработке методики расчета воздухораспределения стесненными струями. Определим минимально необходимое количество факторов из рассмотренных, которые необходимо использовать при получении зависимости для расчета максимальных скоростей в обратном потоке.

Так было определено (подраздел 4.2), что длина помещения должна быть достаточной для развития прямого потока (равной дальнобойности струи или более нее). В связи, с чем данный фактор необходимо включить в методику в качестве условия применимости воздухораспределения стесненными струями,

при этом включать длину помещения в качестве влияющего параметра при выведении зависимостей нецелесообразно.

Также было определено, что высота установки приточного отверстия влияет на скорость в обратном потоке (подраздел 4.3). Но при этом она не может быть реализована в качестве фактора, так как не соблюдается обязательное условие независимости одного фактора от другого: размера приточного отверстия и высоты установки. В связи с чем, для последующих экспериментов высота установки принимается фиксированной и равной $h_0=0,75h$. Для определения скорости для другой высоты необходимо использовать формулу (4.1).

Тогда, в качестве независимых переменных, однозначно определяющих значения исследуемого параметра, будут приняты три фактора:

- скорость в расчетном сечении V_0 , м/с;
- кинематический коэффициент m (или \tilde{m});
- отношение площади приточного устройства к поперечной площади помещения (параметр поперечного стеснения) $\sqrt{F_0/F_n}$.

Сложность комплексного изучения течения стесненной струи воздуха, многофакторность и широкий диапазон изменения влияющих параметров вызвали необходимость применения математических методов планирования и обработки эксперимента. Планирование эксперимента позволяет варьировать одновременно все факторы и получать количественные оценки основных эффектов и эффектов взаимодействия. А также оценить значимость того или иного фактора.

5.2 Выведение зависимостей для определения параметров обратного потока

Исходные данные для математического планирования

Уровни варьирования факторов выбирались таким образом [4, 5], чтобы наиболее полно моделировались реальные условия течения стесненной струи и

охватывались все возможные комбинации сочетания факторов (таблица 5.1 и таблица 5.2).

- скорость в расчетном сечении V_0 : от 1 м/с до 7 м/с – диапазон значений близкий к условиям практического использования;
- отношение площади приточного устройства к поперечной площади помещения (параметр поперечного стеснения) $\sqrt{F_0/F_n}$: от 0,0125 до 0,125 – для помещения с размерами поперечного сечения 8x8м соответствует установке приточного отверстия размера от 100x100мм до 1000x1000мм.
- кинематический коэффициент m : от 3,2 до 6,7 – для уравнения №1; от 6,7 до 9,5 – для уравнения №2.

Таблица 5.1 – Уровни варьирования факторов – уравнение №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 5.2 – Уровни варьирования факторов – уравнение №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

Геометрические характеристики исследуемых областей:

- помещение размерами: $a = 76$ м (что соответствует $a = 1$ при $m=9,5$), $b = 8$ м, $h = 8$ м;
- высота установки приточного устройства от пола до его центра $h_0 = 6$ м,
- приточное отверстие размерами 100x100 мм (при параметре стеснения $\sqrt{F_0/F_n} = 0,0125$) или 1000x1000мм (при параметре стеснения $\sqrt{F_0/F_n} = 0,125$);
- вытяжное отверстие размером равным приточному – на противоположной стене соосно с приточным.
- В виду симметричности задачи моделировать $1/2$ области.
- Граничные условия:
 - - вытяжное отверстие – граничное условие “Open”;
 - - стены в помещениях – “Wall”;
 - - на плоскости симметрии – “Symmetry”.

Основываясь на предположении о том, что искомые зависимости носят линейный характер, для построения матриц экспериментов был выбран ортогональный план первого порядка. Линейное уравнение регрессии, описывающее целевую функцию, запишется в следующем виде:

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j X_j + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k b_{ij} X_i X_j, \quad (5.1)$$

где $k = 3$ – число факторов; X_i, X_j ($i, j = 1, k$) – кодированные значения факторов; b_i, b_{ij} , – коэффициенты регрессии модели, рассчитываемые по результатам опытов.

Результаты расчетов. Максимальная скорость в обратном потоке

Полученные по результатам экспериментальных исследований значения выходного параметра приведены в таблицах 5.3 и 5.4.

Таблица 5.3 – Матрица планирования и результаты опытов – уравнение №1

№ опыта	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	Параллельные эксперименты			V _{обр-ср} ^{max} , м/с	S _i ²	Проверка по кр.Кохрена G _{кр} =0,5157
					V _{обр-1} ^{max} , м/с	V _{обр-2} ^{max} , м/с	V _{обр-3} ^{max} , м/с			
1.1	1	1	1	1	1,365	1,447	1,324	1,379	3,91E-03	0,459
1.2	1	1	1	-1	0,148	0,133	0,155	0,145	1,27E-04	0,015
1.3	1	1	-1	1	1,144	1,191	1,064	1,133	4,16E-03	0,488
1.4	1	1	-1	-1	0,117	0,131	0,108	0,118	1,25E-04	0,015
1.5	1	-1	1	1	0,189	0,171	0,178	0,179	9,10E-05	0,011
1.6	1	-1	1	-1	0,022	0,024	0,019	0,022	4,67E-06	0,001
1.7	1	-1	-1	1	0,160	0,152	0,173	0,162	1,08E-04	0,013
1.8	1	-1	-1	-1	0,017	0,019	0,016	0,017	3,00E-06	0,000
ΣS _i ²									8,53E-03	
S _e ²									1,07E-03	
S ² (b)									6,67E-05	

Таблица 5.4 – Матрица планирования и результаты опытов – уравнение №2

№ опыта	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	Параллельные эксперименты			V _{обр-ср} ^{max} , м/с	S _i ²	Проверка по кр.Кохрена G _{кр} =0,5157
					V _{обр-1} ^{max} , м/с	V _{обр-2} ^{max} , м/с	V _{обр-3} ^{max} , м/с			
2.1	1	1	1	1	2,171	2,084	2,212	2,156	4,28E-03	0,501
2.2	1	1	1	-1	0,221	0,199	0,228	0,216	2,27E-04	0,027
2.3	1	1	-1	1	1,365	1,447	1,324	1,379	3,91E-03	0,459
2.4	1	1	-1	-1	0,148	0,133	0,155	0,145	1,27E-04	0,015
2.5	1	-1	1	1	0,305	0,275	0,326	0,302	6,79E-04	0,080
2.6	1	-1	1	-1	0,032	0,028	0,034	0,031	9,13E-06	0,001
2.7	1	-1	-1	1	0,189	0,171	0,178	0,179	9,10E-05	0,011
2.8	1	-1	-1	-1	0,022	0,024	0,019	0,022	4,67E-06	0,001
ΣS _i ²									8,53E-03	
S _e ²									1,07E-03	
S ² (b)									6,67E-05	

Благодаря ортогональности матрицы планирования, обеспечивающей равенство нулю всех ковариаций между коэффициентами регрессии, все оценки параметров регрессии определяются независимо друг от друга. Расчеты коэффициентов уравнений регрессии осуществлялись в соответствии с известными методиками [4, 5]. Последующая статистическая обработка, направленная на выявление факторов, существенно влияющих на скорость в обратном потоке стесненной струи, и исключение из уравнений статистически незначимых членов, проводилась на основании оценки значимости коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента при доверительной вероятности $P=0,95$, обычно применяемой в инженерных расчетах. В связи со значительным объемом вычислений все расчеты по определению коэффициентов уравнений регрессии и статистической обработке полученных результатов проводились на ПК. Результаты этих расчетов сведены в таблицы 5.5 и 5.6. Все члены уравнений регрессии статистически значимы.

Таблица 5.5 – Коэффициенты уравнений регрессии и их значимость по критерию Стьюдента – уравнение №1

Коэффициенты	Значения коэффициентов уравнений регрессии	Значения t-отношений коэффициентов уравнений регрессии $t_{кр}=2,31$
b_0	0,394	48,30
b_1	0,299	36,67
b_2	0,037	4,51
b_3	0,319	39,04
b_{12}	0,031	3,84
b_{13}	0,243	29,79
b_{23}	0,029	3,56
b_{123}	0,026	3,15

Таблица 5.6 – Коэффициенты уравнений регрессии и их значимость по критерию Стьюдента – уравнение №2

Коэффициенты	Значения коэффициентов уравнений регрессии	Значения t-отношений коэффициентов уравнений регрессии $t_{кр}=2,31$
b_0	0,554	64,88
b_1	0,420	49,23
b_2	0,123	14,36
b_3	0,450	52,74
b_{12}	0,089	10,48
b_{13}	0,343	40,19
b_{23}	0,102	11,99
b_{123}	0,074	8,69

Полученные уравнения регрессии:

Уравнение №1

$$\hat{y} = 0,394 + 0,299x_1 + 0,037x_2 + 0,319x_3 + 0,031x_1x_2 + 0,243x_1x_3 + 0,029x_2x_3 + 0,026x_1x_2x_3, \quad (5.2)$$

$$\text{где: } x_1 = \frac{V_0-4}{3}; x_2 = \frac{m-4,95}{1,75}; x_3 = \frac{\sqrt{F_0/F_{\Pi}}-0,069}{0,057}$$

Уравнение №2

$$\hat{y} = 0,554 + 0,42x_1 + 0,123x_2 + 0,45x_3 + 0,089x_1x_2 + 0,343x_1x_3 + 0,102x_2x_3 + 0,074x_1x_2x_3, \quad (5.3)$$

$$\text{где: } x_1 = \frac{V_0-4}{3}; x_2 = \frac{m-8,1}{1,4}; x_3 = \frac{\sqrt{F_0/F_{\Pi}}-0,069}{0,057}$$

Проверка адекватности уравнений 5.2 и 5.3 производилась по критерию Фишера на основании оценки соотношений дисперсий адекватности и

воспроизводимости [4, 5]. Критическое значение F -критерия для пятипроцентного уровня значимости, числе степеней свободы $f_1=1, f_2=16$ равно $F_{кр}=4.49$. Вычисляем опытные F -критерия и сравниваем их с критическим:

- для уравнения №1:

$$F_{оп} = \frac{S_{le}^2}{S_e^2} = \frac{2,32E - 06}{1,07E - 03} = 0,002 < 4,49$$

- для уравнения №2:

$$F_{оп} = \frac{S_{le}^2}{S_e^2} = \frac{1,09E - 06}{1,17E - 03} = 0,001 < 4,49$$

Так как опытные значение меньше критического, полученные уравнение регрессии, адекватно описывают массив экспериментальных данных.

После подстановки значения факторов в уравнения (5.2 и 5.3) получаем формулы для определения скорости в обратном потоке для двух диапазонов по значению кинематического коэффициента m с погрешностью $\div 5\%$:

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

$$V_{обр-0.75h}^{max} = -0,0057 + 0,0021V_0 + 0,0014m + 0,19\sqrt{F_0/F_n} - 0,000090V_0m + 0,99V_0\sqrt{F_0/F_n} - 0,056m\sqrt{F_0/F_n} + 0,087V_0m\sqrt{F_0/F_n}, \quad (5.4)$$

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

$$V_{обр-0.75h}^{max} = 0,0012 + 0,0027V_0 + 0,0021m - 0,47\sqrt{F_0/F_n} - 0,00014V_0m - 0,5V_0\sqrt{F_0/F_n} + 0,042m\sqrt{F_0/F_n} + 0,31V_0m\sqrt{F_0/F_n}, \quad (5.5)$$

С целью упрощения и ускорения расчета скорости в обратном потоке в практике проектирования расчетные формулы (5.4 и 5.5) были упрощены:

- зависимость (5.2.4) преобразована в:

$$V_{обп-0,75h}^{\max} = 0,29mV_0\sqrt{F_0/F_n} \quad (5.6)$$

- зависимость (5.2.5) преобразована в:

$$V_{обп-0,75h}^{\max} = 0,25mV_0\sqrt{F_0/F_n} \quad (5.7)$$

Зависимость (5.6) имеет погрешность $\pm 20\%$, а (5.7) – $\pm 10\%$.

Также значения скорости можно определять по графику (рисунок 5.1).

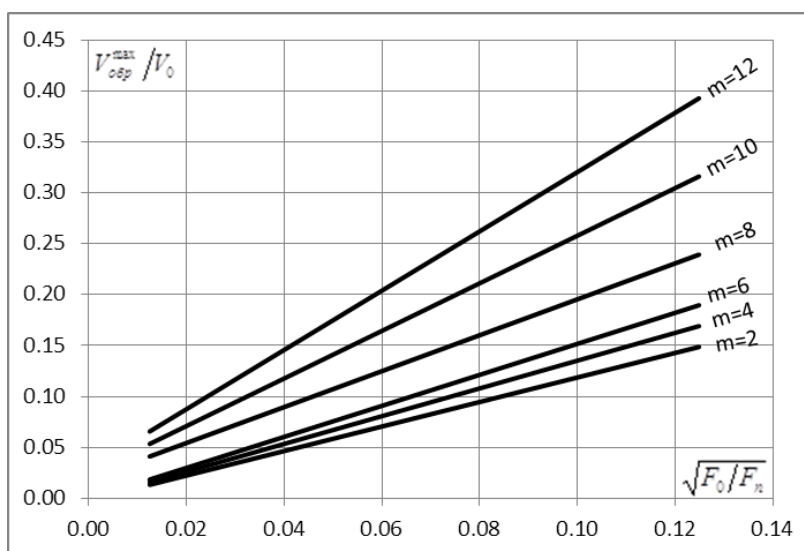


Рисунок 5.1 – Зависимость максимальной скорости в обратном потоке

Результаты расчетов. Средняя скорость в обратном потоке

В результате численных экспериментальных исследований с использованием методов математического планирования также были получены значения средней скорости в обратном потоке в сечении, в котором находится максимум скорости. Полученные по результатам экспериментальных исследований значения выходного параметра для диапазона $m=3,2 \div 6,7$ (уравнение №3) приведено в таблице 5.7, для диапазона $m=6,7 \div 9,5$ (уравнение №4) – в таблице 5.8.

Таблица 5.7 – Матрица планирования и результаты опытов – уравнение №3

№ опыта	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	Параллельные эксперименты			V _{обр-сп} ^{cp} , м/с	S _i ²	Проверка по кр.Кохрена G_{кр}=0,5157
					V _{обр-1} ^{cp} , м/с	V _{обр-2} ^{cp} , м/с	V _{обр-3} ^{cp} , м/с			
1.1	1	1	1	1	1,108	1,174	1,074	1,119	2,58E-03	0,471
1.2	1	1	1	-1	0,128	0,115	0,135	0,126	9,58E-05	0,018
1.3	1	1	-1	1	0,990	1,019	0,920	0,976	2,58E-03	0,471
1.4	1	1	-1	-1	0,105	0,118	0,098	0,107	1,03E-04	0,019
1.5	1	-1	1	1	0,156	0,140	0,146	0,147	6,13E-05	0,011
1.6	1	-1	1	-1	0,019	0,021	0,017	0,019	3,62E-06	0,001
1.7	1	-1	-1	1	0,140	0,152	0,151	0,148	4,83E-05	0,009
1.8	1	-1	-1	-1	0,016	0,017	0,014	0,016	2,47E-06	0,000
ΣS_i^2									5,47E-03	
S_e^2									6,84E-04	
$S^2(b)$									4,27E-05	

Таблица 5.8 – Матрица планирования и результаты опытов – уравнение №4

№ опыта	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	Параллельные эксперименты			V _{обр-сп} ^{max} , м/с	S _i ²	Проверка по кр.Кохрена G_{кр}=0,5157
					V _{обр-1} ^{max} , м/с	V _{обр-2} ^{max} , м/с	V _{обр-3} ^{max} , м/с			
2.1	1	1	1	1	1,755	1,685	1,788	1,743	2,79E-03	0,511
2.2	1	1	1	-1	0,200	0,180	0,206	0,196	1,86E-04	0,034
2.3	1	1	-1	1	1,108	1,174	1,074	1,119	2,58E-03	0,471
2.4	1	1	-1	-1	0,128	0,115	0,135	0,126	9,58E-05	0,018
2.5	1	-1	1	1	0,250	0,225	0,267	0,247	4,56E-04	0,083
2.6	1	-1	1	-1	0,028	0,025	0,030	0,028	7,15E-06	0,001
2.7	1	-1	-1	1	0,156	0,140	0,146	0,147	6,13E-05	0,011
2.8	1	-1	-1	-1	0,019	0,021	0,017	0,019	3,62E-06	0,001
ΣS_i^2									0,006180	
S_e^2									7,72E-04	
$S^2(b)$									4,83E-05	

Таблица 5.9 – Коэффициенты уравнений регрессии и их значимость по критерию Стьюдента – уравнение №3

Коэффициенты	Значения коэффициентов уравнений регрессии	Значения t-отношений коэффициентов уравнений регрессии $t_{кр}=2,31$
b_0	0,332	50,83
b_1	0,250	38,22
b_2	0,021	3,14
b_3	0,265	40,58
b_{12}	0,020	3,02
b_{13}	0,200	30,63
b_{23}	0,015	2,36
b_{123}	0,016	2,43

Таблица 5.10 – Коэффициенты уравнений регрессии и их значимость по критерию Стьюдента – уравнение №4

Коэффициенты	Значения коэффициентов уравнений регрессии	Значения t-отношений коэффициентов уравнений регрессии $t_{кр}=2,31$
b_0	0,453	65,21
b_1	0,343	49,32
b_2	0,100	14,44
b_3	0,361	51,95
b_{12}	0,073	10,53
b_{13}	0,274	39,43
b_{23}	0,081	11,62
b_{123}	0,058	8,33

Полученные уравнения регрессии:

Уравнение №3

$$\hat{y} = 0,332 + 0,250x_1 + 0,021x_2 + 0,265x_3 + 0,020x_1x_2 + \\ + 0,20x_1x_3 + 0,015x_2x_3 + 0,016x_1x_2x_3, \quad (5.8)$$

$$\text{где: } x_1 = \frac{V_0-4}{3}; x_2 = \frac{m-4,95}{1,75}; x_3 = \frac{\sqrt{F_0/F_{\text{п}}}-0,069}{0,057}$$

Уравнение №4

$$\hat{y} = 0,453 + 0,343x_1 + 0,10x_2 + 0,361x_3 + 0,073x_1x_2 + \\ + 0,274x_1x_3 + 0,081x_2x_3 + 0,058x_1x_2x_3, \quad (5.9)$$

$$\text{где: } x_1 = \frac{V_0-4}{3}; x_2 = \frac{m-8,1}{1,4}; x_3 = \frac{\sqrt{F_0/F_{\text{п}}}-0,069}{0,057}$$

Вычисляем опытные F -критерия и сравниваем их с критическим:

- Для уравнения №3:

$$F_{\text{оп}} = \frac{S_{le}^2}{S_e^2} = \frac{1,97E - 06}{6,84E - 04} = 0,003 < 4,49$$

- Для уравнения №4:

$$F_{\text{оп}} = \frac{S_{le}^2}{S_e^2} = \frac{1,05E - 06}{7,72E - 04} = 0,001 < 4,49$$

Так как опытные значение меньше критического, полученные уравнение регрессии, адекватно описывают массив экспериментальных данных.

После подстановки значения факторов в уравнения (5.8) и (5.9) получаем зависимости для определения скорости в обратном потоке для двух диапазонов по значению кинематического коэффициента m с погрешностью $\pm 5\%$:

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

$$V_{обр-0.75h}^{cp} = -0,0036 + 0,0020V_0 + 0,00085m + 0,28\sqrt{F_0/F_n} + 0,00012V_0m + 0,90V_0\sqrt{F_0/F_n} - 0,063m\sqrt{F_0/F_n} + 0,053V_0m\sqrt{F_0/F_n}, \quad (5.10)$$

- зависимость №4 для значений $m=6,7 \div 9,5$:

$$V_{обр-0.75h}^{cp} = 0,011 - 0,0016V_0 - 0,0013m - 0,45\sqrt{F_0/F_n} - 0,00066V_0m - 0,36V_0\sqrt{F_0/F_n} + 0,046m\sqrt{F_0/F_n} + 0,24V_0m\sqrt{F_0/F_n}, \quad (5.11)$$

Результаты расчетов. Другие параметры

Также в результате численных экспериментальных исследований с использованием методов математического планирования были получены координаты точки расположения значения максимальной скорости в обратном потоке (таблица 5.11). Начало координат в плоскости симметрии на полу под воздухораспределителем.

Анализируя данные, представленные в таблице 5.11, можно сделать вывод о том, что полученные координаты расположения максимальной скорости в обратном потоке для различных видов ВР имеют близкие значения. Следовательно, местоположение максимума не зависит от скорости на истечении из воздухораспределителя и его конструкции, а зависит только от высоты установки воздухораспределителя (подраздел 4.3) и поперечных размеров помещения. Полученные данные не согласуются с существующей теорией о критических сечениях струи, которая была разработана для воздухораспределителей, установленных на высоте $h_0=0,5h$ [9].

Таблица 5.11 – Координаты расположения максимальной скорости в обратном потоке

№ опыта	Кинематический коэффициент, m	x , м	\bar{x}	y , м	z , м
1.3	3,2	12,56	0,34	0,21	3,79
1.4	3,2	12,05	0,49	0,31	3,63
1.7	3,2	12,53	0,47	0,21	3,74
1.8	3,2	13,43	0,54	0,38	3,37
1.1	6,7	11,77	0,22	0,28	3,73
1.2	6,7	13,43	0,25	0,39	3,53
1.5	6,7	11,77	0,22	0,22	3,79
1.6	6,7	12,05	0,23	0,32	3,65
2.1	9,5	11,77	0,16	0,22	3,79
2.2	9,5	14,96	0,20	0,29	3,65
2.5	9,5	11,77	0,16	0,28	3,73
2.6	9,5	12,96	0,18	0,37	3,53

5.3 Методика расчета воздухораспределения стесненной струей

Область применимости схемы воздухораспределения обратным потоком

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

$$h_0 > h_{оз}. \quad (5.12)$$

Нарушение условия (5.12) противоречит схеме воздухораспределения горизонтальными струями выше рабочей зоны, в которой предполагается, что в обслуживаемую зону приточный воздух попадает лишь в обратном потоке.

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

$$h_0 \geq 0,5h. \quad (5.13)$$

При нарушении условия (5.13) приточный поток отклоняется вниз, при этом обратный поток формируется вблизи потолка. Кроме того, в этом случае есть вероятность попадания прямого потока в обслуживаемую зону.

3. Минимальная длина помещения a должна удовлетворять следующему условию:

$$a \geq 0,5 \cdot m \sqrt{F_n}, \quad (5.14)$$

где m – кинематический коэффициент воздухораспределителя,

F_n – площадь поперечного сечения помещения, перпендикулярного струе.

При нарушении условия (5.14) приточная струя достигает противоположной стены и, настилаясь на нее, попадает в обслуживаемую зону со скоростями, которые могут превысить скорость воздуха в обратном потоке. В этом случае помимо расчета скорости воздуха в обратном потоке необходимо рассчитывать скорость воздуха в точке внедрения приточной струи в обслуживаемую зону.

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

4. При высоте установки воздухораспределителя вблизи потолка $h_0 \geq 0,75h$ для расчета по формуле (5.14) следует использовать значение скоростного коэффициента для настилающейся струи $m_{наст} = 1,4m$.

При установке воздухораспределителя выше полувысоты помещения $h_0 > 0,5h$ приточный поток отклоняется вверх и на некотором расстоянии от истечения настиляется на потолок. При этом коэффициент m меняется от значения для свободной струи до значения для настилающейся на поверхность.

Расчет максимальной скорости в обратном потоке

5. Значение максимальной скорости в обратном потоке $V_{обр}^{max}$ при установке приточного устройства на высоте $h_0 = 0,75h$ определяется по следующим зависимостям:

– для воздухораспределителей с коэффициентом $m < 6.7$
с погрешностью $\pm 5\%$

$$V_{обп_{0.75h}}^{\max} = -0.0057 + 0.0021V_0 + 0.0014m + 0.19\sqrt{F_0/F_n} - 0.000090V_0m + \\ + 0.99V_0\sqrt{F_0/F_n} - 0.056m\sqrt{F_0/F_n} + 0.087V_0m\sqrt{F_0/F_n}; \quad (5.15)$$

с погрешностью $\pm 20\%$

$$V_{обп_{0.75h}}^{\max} = 0,29mV_0\sqrt{F_0/F_n}; \quad (5.16)$$

- для воздухораспределителей с коэффициентом $m \geq 6.7$
с погрешностью $\pm 5\%$

$$V_{обп_{0.75h}}^{\max} = 0.0012 + 0.0027V_0 + 0.0021m - 0.47\sqrt{F_0/F_n} - 0.00014V_0m - \\ - 0.5V_0\sqrt{F_0/F_n} + 0.042m\sqrt{F_0/F_n} + 0.31V_0m\sqrt{F_0/F_n}; \quad (5.17)$$

с погрешностью $\pm 10\%$:

$$V_{обп_{0.75h}}^{\max} = 0,25mV_0\sqrt{F_0/F_{bh}}; \quad (5.18)$$

Также значение максимальной скорости в обратном потоке можно определить по графику (рисунок 5.2).

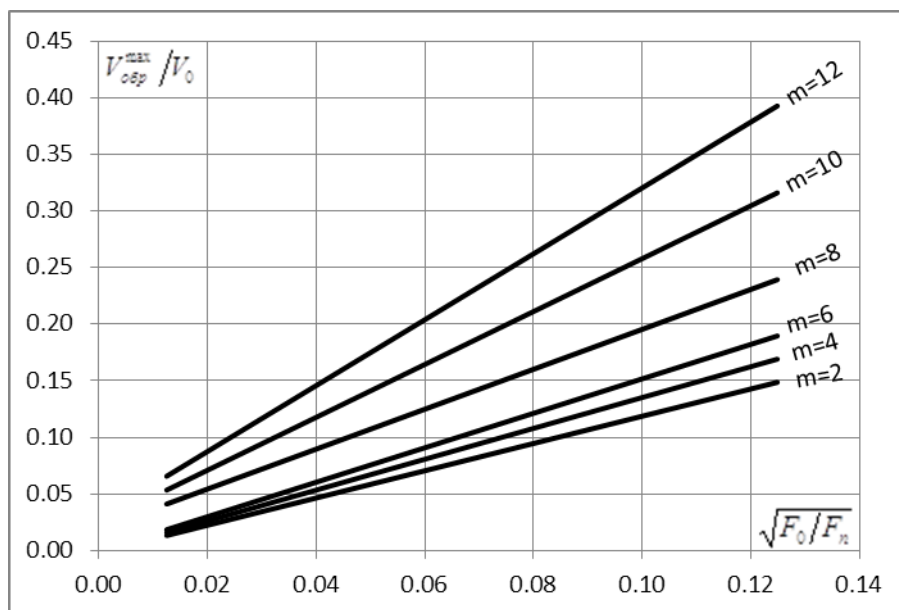


Рисунок 5.2 – Зависимость максимальной скорости в обратном потоке от параметра стеснения $\sqrt{F_0/F_n}$ и кинематического коэффициента m

6. При установке приточного устройства на высоте $h_0 \neq 0,75h$, рассчитанное по формулам (5.15 ÷ 5.18) значение скорости в обратном потоке необходимо откорректировать с помощью коэффициента k_v :

$$V_{обр}^{max} = V_{обр_{0,75h}}^{max} \cdot k_v \quad (5.19)$$

Коэффициент k_v определяется по зависимости

$$k_v = 0,2\bar{h} + 0,8 \quad (5.20)$$

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

При $h_0 = 0,75h$ коэффициент $k_v = 1$.

Определение параметров струи при подаче неизотермического воздуха

7. При подаче в помещение неизотермического приточного воздуха необходимо рассчитать траекторию развития струи по зависимости

$$y = \pm \frac{x^3}{3H^2}. \quad (5.21)$$

В (5.21) знак «плюс» соответствует подаче теплого воздуха, знак «минус» – подаче холодного воздуха.

Если воздействие сил гравитации не изменяет траекторию развития струи, и она успевает рассеяться, входя в обслуживаемую зону обратным потоком, то расчет максимальной скорости производится по зависимостям (5.15 ÷ 5.18).

8. Определение избыточной температуры производится по [27]

$$\Delta t_{обп}^{max} = 1,4 \cdot \Delta t_0 \sqrt{\frac{F_0}{F_n}}. \quad (5.22)$$

В случае если струя изменяет свою траекторию, и входит в обслуживаемую зону прямым потоком, то необходимо произвести расчет параметров прямого и обратного потоков струи и выбрать максимальное значение из двух.

9. Расчет максимальной скорости струи и избыточной температуры следует производить по формулам для прямого потока

$$V_x = \frac{m \cdot V_0 \cdot \sqrt{F_0}}{x} K_c \cdot K_n, \quad (5.23)$$

$$\Delta t_x = \frac{n \cdot \Delta t_0 \cdot \sqrt{b_0}}{\sqrt{x}} \frac{1}{K_c \cdot K_n}, \quad (5.24)$$

где K_c – коэффициент стеснения (таблица 5.12);

K_n – коэффициент неизотермичности.

Коэффициент неизотермичности K_n определяется по формуле [15]

$$K_n = \sqrt{1 \pm \left(\frac{x}{H}\right)^4}. \quad (5.25)$$

В (5.25) знак «плюс» соответствует подаче теплого воздуха, знак «минус» – подаче холодного воздуха.

Таблица 5.12 – Коэффициент стеснения K_c для компактной струи [79]

$\frac{F_0}{F_n}$	Относительное расстояние x										
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
до 0,0012	1	1	1	1	1	1	1	–	–	–	–
0,0092	1	1	0,78	0,62	0,35	0,25	0,21	–	–	–	–
0,034	1	1	1	1	0,89	0,67	0,23	0,17	–	–	–
0,13	1	1	1	1	1	1	0,76	0,54	0,31	0,24	0,20

Пример расчета

Дано: $F_{o.z.} = 36 \times 8 \text{ м}^2$, $L = 2500 \text{ м}^3/\text{ч}$, $h = 8 \text{ м}$, $h_{o.z.} = 2 \text{ м}$, $V_{норм} = 0,5 \text{ м/с}$.

Определить: $V_{обр}^{\max}$

Решение:

1. Для соблюдения условий по высоте установки, принимаем $h_0 = 0,75 \cdot h = 6 \text{ м}$

2. Определим по условию (5.14) приемлемые значения кинематического коэффициента ВР с учетом того, что при $h_0 \geq 0,75h$ в формуле (5.13) используется $m_{наст} = 1,4m$:

$$m \leq \frac{a_1}{0,5 \cdot \sqrt{F_n}} = \frac{36}{0,5 \cdot \sqrt{8 \cdot 8}} = 9$$

Таким образом, для полного развития прямого потока в данном помещении необходимо подобрать ВР со значением коэффициента $m \leq 9 / 1,4 \leq 6,4$.

По таблице из [16] подбираем подходящий для данной схемы подачи воздуха воздухораспределитель – 4ПСМ250 ($F_0=0,196\text{м}^2$, $m=6$).

3. Определим скорость в обратном потоке по (5.15)

$$V_{обр}^{max} = -0,0057 + 0,0021 \cdot 3,5 + 0,0014 \cdot 6 + 0,19 \cdot \sqrt{0,196/64} - 0,00009 \cdot 3,5 \cdot 6 + \\ + 0,99 \cdot 3,5 \cdot \sqrt{0,196/64} - 0,056 \cdot 6 \cdot \sqrt{0,196/64} + 0,087 \cdot 3,5 \cdot 6 \cdot \sqrt{0,196/64} = 0,30\text{м/с}$$

4. Полученное значение меньше нормируемого – расчет окончен.

Проверка с помощью численное моделирование адекватности расчета по предложенной методике

С целью апробации полученных зависимостей (5.15), (5.17) и подтверждения адекватности примененного подхода по замене реальных воздухораспределителей на вектора скорости (подраздел 4.4), было произведено численное моделирование воздухораспределения (рисунок 5.3) по исходным данным примера.

Изначально для определения кинематического коэффициента было произведено численное моделирование струи, истекающей из воздухораспределителя 4ПСМ 250 в свободных условиях. По результатам расчета получено значение коэффициента $m=6,1$, что находится в пределах погрешности натуральных измерения и является удовлетворительным результатом, позволяющим производить дальнейшие расчеты.

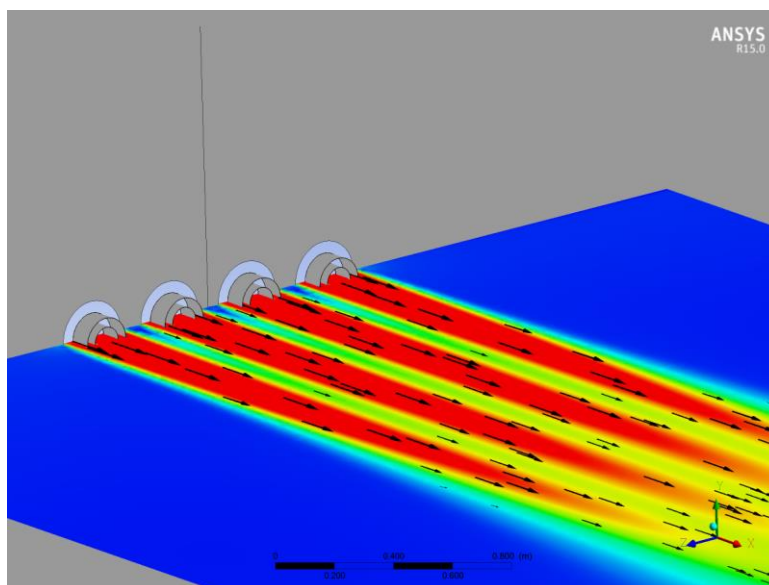


Рисунок 5.3 – Поле скоростей в продольном сечении помещения, проходящее через середину воздухораспределителя 4ПСМ 250

В таблице 5.13 приведены значения максимальной скорости в обратном потоке, полученные в результате численного моделирования примера, расчета по формуле (5.15) и упрощенной формуле (5.16), а также в результате расчета по формулам из существующих методик: М.И. Гримитлина (1.35), И.А. Шепелева (1.15) и Ю.Р. Кареевой (рисунок 1.4) .

Таблица 5.13 – Максимальное значение скорости в обратном потоке по результатам расчета и численного моделирования

Метод расчета	$V_{обр}^{max}$, м/с	Δ , %
по формуле (5.15)	0,298	-2,3
по упрощенной формуле (5.16)	0,347	14
численное моделирование	0,305	0
по формуле И.А. Шепелева (1.15)	0,145	-52
по формуле М.И. Гримитлина (1.35)	0,153	-50
по рисунку 1.4 Ю.Р. Кареевой	0,439	44

Как следует из таблицы 5.13 полученное в результате численного моделирования значение максимальной скорости в обратном потоке на $\approx 2\%$ больше, чем значение по формуле (5.15), и на 14% меньше – по упрощенной формуле (5.16), что свидетельствует о достоверности расчета по полученным в результате исследования зависимостям и адекватности примененного метода замены воздухораспределителей векторами скорости.

Результаты, полученные по формулам (1.15), (1.35), существенно меньше, а по рисунку 1.4 – существенно больше, чем значение из численного моделирования, что свидетельствует о больших погрешностях в расчете максимальной скорости в обратном потоке при использовании данных формул в практике инженерного проектирования.

5.4 Выводы по главе 5

В результате экспериментальных исследований изотермической стесненной струи, подаваемой выше рабочей зоны:

1. Получены зависимости для определения максимальной скорости в обратном потоке, учитывающие тип воздухораспределительного устройства, параметр поперечного стеснения и скорость истечения.

2. Усовершенствована методика расчета воздухораспределения стесненными струями, подаваемыми выше рабочей зоны, и формируемого ею обратного потока:

- введены области применимости методики;
- предложены упрощенные зависимости и график для определения скорости в обратном потоке от ряда факторов, в том числе от типа воздухораспределителя и высоты его установки;
- систематизирован расчет для приточной изотермической и неизотермической стесненной струи.

3. Корректность и точность расчета по выведенным значимостям подтверждена на примере численного моделирования помещения с установленным в нем воздухораспределителем 4ПСМ 250.

ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработана и верифицирована численная модель для исследований вентиляционных струйных течений. Верификации проведена на основе сравнения результатов численного расчета с данными натуральных экспериментов, проведенных в настоящей работе, и с опубликованными натурными данными других авторов.

2. Выявлено и объяснено явление переменного значения кинематического коэффициента на основном участке струи для современных воздухораспределительных устройств.

3. Введено понятие модифицированного кинематического коэффициента, позволяющего уйти от ошибки при расчете воздухораспределения приточными струями, истекающими из современных геометрически сложных воздухораспределительных устройств;

4. Для производителей вентиляционного оборудования разработана методика определения модифицированного кинематического коэффициента при аэродинамических испытаниях современных воздухораспределительных устройств.

5. Разработан способ математического описания реальных конструкций воздухораспределителей. Данный способ позволит существенно сократить сроки подготовки и расчета модели и, тем самым, распространить применение методов численного моделирования для решения практических задач.

6. Уточнена схема развития обратного потока в реальных помещениях: установлено, что максимальные значения скорости в обратном потоке располагаются в углах помещения при установке одного воздухораспределителя или в углах и посередине между воздухораспределителями при установке двух и более воздухораспределителей.

7. Получена обобщенная зависимость для определения параметров обратного потока. Данная зависимость, учитывающая начальную скорость истечения, величину поперечного стеснения, типа воздухораспределителя, высоту его установки, позволяет повысить точность расчета скорости в обратном потоке в инженерной практике проектирования.

8. Усовершенствован метод расчета воздухораспределения стесненной струей. Разработанная на его основе методика расчета включена в редакцию № 1 СП 60.13330.2016 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» (Приложение Л).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- a – длина модуля помещения, обслуживаемого одним
воздухораспределителем, м;
- a_0 – длина воздухораспределителя, мм;
- Ar_0 – критерий Архимеда в начальном сечении струи, безразмерный;
- Ar_x – текущий критерий Архимеда, безразмерный;
- b – ширина модуля помещения, обслуживаемого одним
воздухораспределителем, м;
- b_0 – ширина воздухораспределителя, мм;
- d_0 – диаметр приточного отверстия, мм;
- F_0 – площадь расчетного сечения воздухораспределителя, м²;
- F_n – площадь поперечного сечения модуля помещения, обслуживаемого одним
воздухораспределителем, м²;
- h – высота модуля помещения, обслуживаемого одним
воздухораспределителем, м;
- h_0 – высота установки воздухораспределителя от пола до его центра, м;
- h_{pz} – высота рабочей (или обслуживаемой) зоны, м;
- H – геометрическая характеристика струи, м;
- g – ускорение свободного падения, м/с²;
- L_0 – объемный расход воздуха, м³/с;
- m – кинематический (или скоростной) коэффициент струи, безразмерный;
- T_∞ – температура окружающей среды, К;
- t_0 – температура на истечении из воздухораспределителя, °С;
- t_{pz} – температура воздуха в рабочей (обслуживаемой) зоне, °С;
- t_x – температура в струе на расстоянии x от места истечения, °С;
- $t_{обр}$ – максимальная температура в обратном потоке, °С;

Δt_0 – избыточная температура на истечении из воздухораспределителя

$$\Delta t_0 = |t_0 - t_{pз}|, \text{ } ^\circ\text{C};$$

Δt_x – максимальная избыточная температура в струе на расстоянии x от места

$$\text{истечения } \Delta t_x = |t_x - t_{pз}|, \text{ } ^\circ\text{C};$$

$\Delta t_{обр}$ – максимальная избыточная температура в обратном потоке

$$\Delta t_{обр} = |t_{обр} - t_{pз}|, \text{ } ^\circ\text{C};$$

V_0 – скорость приточного воздуха в расчетном сечении, м/с;

$V_{обр}^{cp}$ – средняя скорость в обратном потоке, м/с;

$V_{обр}^{max}$ – максимальная скорость в обратном потоке, м/с;

V_x – скорость на аэродинамической оси свободной струи, м/с;

V_x^{cm} – скорость на аэродинамической оси стесненной струи, м/с;

x – абсцисса, отсчитываемая от начального сечения струи, м;

y – ордината, отсчитываемая от центра воздухораспределителя, м;

$\alpha_{0.5v}$ – угол между осью струи и линией, проходящей через точки, в которых скорости равны половине осевой скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абрамович, Г. Н.** Турбулентные свободные струи жидкостей и газов [Текст] / Г.Н. Абрамович – М.: Центр. аэро- гидродинамич. ин-т им. проф. Н. Е. Жуковско, 1940. – 148 с.
2. **Абрамович, Г.Н.** Теория турбулентных струй [Текст] / Г.Н. Абрамович / Репринтное издание 1960 г. – М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 720 с.
3. **Акинчев, Н.В.** Расчет подачи охлажденного воздуха [Текст] / Н.В. Акинчев // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. – 1973. – Вып.91. – С.17-23.
4. **Ахназарова, С.Л.** Методы оптимизации эксперимента в химической технологии [Текст]: учебное пособие для студентов / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1985. – 328 с.
5. Аэродинамика вентиляции [Текст]: учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. образования / В.И.Полушкин, С.М.Анисимов, В.Ф.Васильев и др. – М.: Издательский центр "Академия", 2013. – 208 с.
6. Батурин, В.В. Основы промышленной вентиляции [Текст] / В.В. Батурин – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Профиздат, 1990. – 448 с.
7. Батурин, В.В. Циркуляция воздуха в помещении в зависимости от расположение приточных и вытяжных отверстий [Текст] / В.В.Батурин, В.В.Ханжонков // Отопление и вентиляция. – 1939. – №4-5.
8. Баркалов, Б.В. Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и жилых зданиях / Б.В. Баркалов, Е.Е. Карпис – М.: Стройиздат, 1982. – С. 312.
9. Бахарев, В.А. Основы проектирования и расчета отопления и вентиляции с сосредоточенным выпуском воздуха [Текст] / В.А. Бахарев, В.Н. Трояновский – М.: Профиздат, 1958. – 215 с.

10. **Бридько, В.К.** К расчету некоторых характеристик осесимметричных стесненных струй [Текст] / В.К. Бридько // Известия вузов. Энергетика. –1978. – №9. – С.137-140.

11. **Бридько, В.К.** К расчету некоторых характеристик осесимметричных стесненных струй [Текст] / В.К. Бридько // Известия вузов. Энергетика. –1977. – №11. – С. 96-98.

12. **Бридько, В.К.** К расчету некоторых характеристик осесимметричных стесненных струй. / В.К. Бридько // Известия вузов. Энергетика. –1978. – №4. – С.140-143.

13. **Васильев, В.Ф.** О применении моделей турбулентности при численном моделировании процессов тепло-, воздухо- и массообмена [Текст] / В.Ф. Васильев, В.М. Уляшева, М.А. Канев, Г.А. Рябев // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2016. – № 12 (180). – С. 66-69.

14. Внутренние санитарно-технические устройства: в 2 ч. Часть II. Вентиляция и кондиционирование воздуха [Текст] / Под ред. И.Г. Староверова – 2-е изд., перераб. и доп. / Справочник проектировщика – М.: Стройиздат, 1977. – 504 с.

15. Внутренние санитарно-технические устройства: в 3-х ч. Часть 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Книга 1 [Текст] / Под ред. Н.Н.Павлова, Ю.И.Шиллера – 4-е изд., перераб. и доп. / Справочник проектировщика – М.: Стройиздат, 1992. – 319 с.

16. Воздухораспределители завода «Арктос» [Текст] / Каталог продукции, 2017. – 512 с.

17. **Волков, А.П.** Методика расчета вентиляционной системы парковки закрытого типа / А.П. Волков, А.М. Гримитлин, С.В. Рыков // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование, 2014. – № 2. – С. 45-57.

18. **Гиневский, А.С.** Теория турбулентных струй и следов [Текст] / А.С. Гиневский – М.: Машиностроение, 1969. – 400 с.

19. **Глебов, Г.А.** Исследование развития осесимметричной турбулентной неизотермической струи в цилиндрическом канале [Текст] / Г.А. Глебов, А.Н. Щелков // Теплообмен и трение в двигателях и энергетических установках летательных аппаратов. – Казань: КАИ, 1985. – С.21-27.

20. **Глебов, Г.А.** Осесимметричная турбулентная струя в цилиндрическом тупиковом канале [Текст] / Г.А. Глебов, А.Н. Щелков // Тепловые процессы в двигателях и энергоустановках летательных аппаратов. – Казань: КАИ, 1984. – С.8-12.

21. **Глебов, Г.А.** Распространение осесимметричной турбулентной струи в цилиндрическом канале [Текст] / Г.А. Глебов, А.Н. Щелков // Газодинамика двигателей летательных аппаратов. – Казань: КАИ, 1981. – С.94-98.

22. **Глебов, Г.А.** Исследование турбулентной струи в цилиндрическом канале при наличии спутного потока [Текст] / Г.А. Глебов, В.Н. Петров // Тепловые процессы в двигателях и энергоустановках летательных аппаратов. – Казань: КАИ, 1984. – С. 12-18.

23. **Глебов, Г.А.** Турбулентная неизотермическая струя в цилиндрическом канале при наличии спутного потока / Г.А. Глебов, В.Н. Петров // Газодинамика двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. – Казань: КАИ, 1985. – С.7-14.

24. **Гобза, Р.Н.** Воздушное отопление с сосредоточенной подачей [Текст] / Р.Н.Гобза – М.: Стройиздат, 1947. – 46 с.

25. **Гримитлин, М.И.** Вентиляция и отопление цехов судостроительных заводов [Текст] / М.И. Гримитлин, О.Н. Тимофеева, Е.М. Эльтерман, Л.С. Эльянов. – Ленинград: Судостроение, 1978. – 240 с.

26. **Гримитлин, М.И.** Определение параметров струй, развивающихся в ограниченном пространстве по тупиковой и проточной схемам [Текст] / М.И. Гримитлин, Г.М. Позин // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. – 1973. – Вып.91. – С.12-17.

27. **Гримитлин, М.И.** Распределение воздуха в помещениях [Текст] / М.И. Гримитлин – СПб.: Изд-во «АВОК Северо-Запад», 2004. – 320 с.
28. **Гримитлин, А.М.** Исследование способов воздухораспределения и их влияния на технологические показатели систем вентиляции и воздушного отопления [Текст]: дис. ... канд. техн. наук 05.23.03. / А.М.Гримитлин – Ленинград, 1980. – 224 с.
29. **Гримитлин, А.М.** Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционирования [Текст] / А.М. Гримитлин, Т.А. Дацюк, Д.М. Денисихина — М.: Изд-во «АВОК Северо-Запад», 2013 – 192 с.
30. **Гримитлин, А.М.** Воздухообмен в цехах судостроительных заводов / А.М. Гримитлин, Г.М. Позин // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2014. – № 1 (145). – С. 106-108.
31. ГОСТ 12.3.018-79 ССБТ. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний [Текст] / М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 11 с.
32. ГОСТ Р ЕН 12238-2012. Вентиляция зданий. Воздухораспределительные устройства. Аэродинамические испытания и оценка применения для перемешивающей вентиляции [Текст] / М.: Стандартиформ, 2014. – 27 с.
33. ГОСТ 32548-2013 Вентиляция зданий. Воздухораспределительные устройства. Общетехнические условия [Текст] / М.: Стандартиформ, 2014. – 15 с.
34. **Гусак, А.И.** Распространение турбулентной струи капельной жидкости в ограниченном пространстве [Текст] / А.И. Гусак // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1969. – №3. – С. 67-71.
35. **Дацюк, Т.А.** Моделирование процессов вентиляции [Текст] / Т.А. Дацюк, А.В. Сауц, Б.Н. Юрманов, В.Р. Таурит // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – С. 78.

36. **Денисихина, Д.М.** Численное моделирование автоколебательных вентиляционных течений [Текст]: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.05 / Д.М. Денисихина – СПб., 2005. – 135 с.

37. **Денисихина, Д.М.** Математическое моделирование вентиляции завода [Электронный ресурс] / Д.М. Денисихина, М.В. Самолетов, М.А. Луканина // Электронный журнал «Здания высоких технологий» – 2013. – Т. 2. – № 2. – С. 60-63. Режим доступа: http://zvt.abok.ru/articles/63/Matematicheskoe_modelirovanie_ventilyatsii_zavoda.

38. **Денисихина, Д.М.** Особенности численного моделирования поведения воздушных потоков в объемах концертных и театральных залов [Текст] / Д.М. Денисихина, // Интернет-журнал Науковедение. – 2014. – № 3 (22). – С. 98.

39. **Денисихина, Д.М.** Исследование различных схем воздухораспределения ледовых арен [Текст] / Д.М. Денисихина, // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2015. – № 5 (677). – С. 38-48.

40. **Денисихина, Д.М.** Решение задач распределения воздуха в спортивном зале борьбы [Текст] / Д.М. Денисихина, Р.Ж. Шапашева, А.Н. Колубков // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2015. – № 4. – С. 62-73.

41. **Денисихина, Д.М.** Новое здание аэровокзала в Симферополе. Практика современного проектирования [Электронный ресурс] / Д.М. Денисихина, М.В. Самолетов, А.В. Храмов // Электронный журнал «Здания высоких технологий» – 2017. – Т. 2. – № 2. – С. 26-33. Режим доступа: http://zvt.abok.ru/articles/404/Novoe_zdanie_aerovokzala_v_Simferopole

42. **Замалеев, З.Х.** Основы гидравлики и теплотехники [Текст] / З.Х. Замалеев, В.Н. Посохин, В.М. Чефанов – М.: АСВ, 2014. – 424 с.

43. **Замалеев, З.Х.** Основы гидравлики и теплотехники [Текст] / З.Х. Замалеев, В.Н. Посохин, В.М. Чефанов – Санкт-Петербург: Лань, 2014. – 352 с.

44. **Кареева, Ю.Р.** Струйные течение в ограниченных пространствах [Текст]: дис. ... канд. техн. наук 01.02.05 / Ю.Р.Кареева – Казань, 2015. – 165 с.

45. **Колешко, С.Б.** Физические и математические основы численного моделирования гидроаэродинамики и теплообмена [Текст] / С.Б. Колешко, Ю.В. Лапин, Д.А. Никулин, М.Х. Стрелец, Ю.С. Чумаков – С-Пб, 2005. – 262 с.

46. **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 учёных и докторантов, Ч. II / М-во образования и науки РФ, С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2016. – С. 138 – 141.

47. **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 учёных и докторантов, Ч. III / М-во образования и науки РФ, С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2017. – С. 166 – 170.

48. **Кочарьянц, К.В.** Исследование зависимости скорости потока в обратном течении от типа приточного устройства [Электронный ресурс] / 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> (ВАК)

49. **Кочарьянц, К.В.** Непостоянство кинематического коэффициента при истечении из современных воздухораспределительных устройств [Текст] / К.В. Кочарьянц, Д.М. Денисихина // Научное обозрение. – 2017. – №10. – С. 40-47. (ВАК)

50. **Кочарьянц, К.В.** Численное моделирование воздухораспределения веерными настилающимися струями. Выбор модели турбулентности [Текст] /

К.В. Кочарьянц // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 4(57). – С. 128-133. (ВАК)

51. **Кталхерман, М.Г.** Исследование распространения струи в канале [Текст] / М.Г. Кталхерман, Я.И. Харитоновна // Известия сибирского отделения академии наук СССР. –1969. – №8. – вып. 2. – С. 36-44.

52. **Кузнецов, С.Н.** Организация эффективного воздухообмена в производственных помещениях [Текст] / С.Н. Кузнецов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2016. – № 4 (44). – С. 30-37.

53. **Кузнецов, С.Н.** Математическое моделирование вентиляции в помещении с гальваническими ваннами [Текст] / С.Н. Кузнецов, А.И. Колосов, Г.А. Кузнецова // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология. – 2017. – № 1. – С. 111-117.

54. **Лайгна, К.Ю.** Экспериментальные исследования ограниченных турбулентных струй. / К.Ю. Лайгна // Труды Таллиннского пед. института (ФТПРПИ). – 1972. – №3. – С. 140.146.

55. **Лайгна, К.Ю.** Определение зоны максимальной работоспособности вентиляционной струи, втекающей в тупик. / К.Ю. Лайгна // Труды Таллиннского пед. института (ФТПРПИ). – 1972. – №5.

56. **Лайгна, К.Ю.** Экспериментальные исследования турбулентной струи, втекающей в тупик. / К.Ю. Лайгна // Труды Таллиннского пед. института (ФТПРПИ). – 1973. – №5.

57. **Наумейко, А.В.** Энергоэффективные системы отопления [Текст] / А.В. Наумейко, Р.Н. Шумилов, Ю.И. Толстова и др. – Екатеринбург, 2003. – 332 с.

58. **Павлов, Б.М.** К расчету осесимметричной струи, распространяющейся в ограниченном пространстве [Текст] / Б.М. Павлов // В кн.: Техника безопасности и производственная санитария. – М.: Профиздат, 1979. – С. 49-53.

59. **Павлов, Б.М.** Распространение плоской струи, истекающей в тупик / Б.М.Павлов // В кн.: Техника безопасности и производственная санитария. – М.:Профиздат, 1979. – С. 54-56.

60. **Позин, Г.М.** Основы расчета тепловоздушного режима производственных помещений с механической вентиляцией [Текст]: дис. ... канд. техн. наук 05.23.03 / Г.М.Позин – Ленинград, 1990. – 412с.

61. **Позин, Г.М.** К вопросу применения моделей турбулентности при численном моделировании вентиляционных процессов [Текст] / Г.М. Позин, В.М. Уляшева, И.Д. Киборт // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 10 (658). – С. 48-56.

62. **Посохин, В.Н.** Аэродинамика вентиляции [Текст] / В.Н. Посохин – М.: «АВОК-ПРЕСС», 2008. – 208с.

63. **Посохин, В.Н.** Вентиляци [Текст] / В.Н. Посохин, Р.Г.Сафиулин, В.А.Бройда – М.: АСВ, 2015. – 624 с.

64. Рекомендациях по выбору и расчету систем воздухораспределения АЗ-669 / М.: Изд-во «ГПИ Сантехпроект», 1979. – 68 с.

65. **Розенберг, В.Н.** Аэродинамика струи, бьющей в тупик [Текст] / В.Н. Розенберг. – Л.: ЦКТИ им. Ползунова, 1951. – С. 65-87.

66. **Садовская, Н.Н.** Циркуляция воздушных потоков при сосредоточенной подаче воздуха [Текст] / Н.Н. Садовская // Труды науч. сессии. – Л.: ЛИОТ ВЦСПС, 1955.

67. СП (Свод правил) 60.13330.2016 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003 – М., Минстрой – 2017.

68. **Талиев, В.Н.** Экспериментальная проверка различных формул осевой скорости свободной изотермической струи круглого сечения [Текст] // В сб. «Теория и расчет вентиляционных струй» / Л.: ЛИОТ, 1965. С.56-69.

69. **Талиев, В. Н.** Аэродинамика вентиляции [Текст] / В. Н. Талиев – М.: Стройиздат, 1979. – 295 с.

70. **Тарнопольский, М.Д.** Общее движение воздуха в вентилируемом помещении при струйной подаче (плоская задача) [Текст] / М.Д.Тарнопольский // В сб. трудов НИИ Сантехники «Кондиционирование воздуха». – М.: Стройиздат, 1966. – №18 – С. 179-185.

71. **Таурит, В.Р.** Исследование турбулентных воздушных течений в вентилируемом помещении методом численного моделирования / В.Р. Таурит, Н.А. Кораблева // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – № 2 (37). – С. 157-161.

72. **Уляшева, В.М.** О корректности численного моделирования вентиляционных процессов [Текст] / В.М. Уляшева // Известия высших учебных заведений. Строительство. –2012. – № 11-12 (647-648). – С. 79-83.

73. **Уляшева, В.М.** Исследование пространственного распределения параметров микроклимата в помещениях с источниками тепловыделений [Текст] / В.М. Уляшева // Приволжский научный журнал. – 2013. – № 2 (26). – С. 26-30.

74. **Черепнин, Н.Д.** Исследование распространения осесимметричной турбулентной струи в канале [Текст] / Н.Д. Черепнин, С.В. Поляков // Тр. сем по краев. задачам, 19, Изд-во Казанского гос. университета, 1983. – С. 167-174.

75. **Черных, В.А.** Истечение струи в тупик [Текст] / В.А. Черных // Изв. АН СССР, Механика жидкости и газа, 1966. – №2. – С.139-140

76. **Шепелев, И.А.** Распространение турбулентной струи в ограниченном пространстве (Осесимметричное течение) [Текст] / И.А. Шепелев, М.Д.Тарнопольский // Тез. науч. семинара «Теплогазоснабжение и вентиляция». – Киев: Будивельник, 1965. – С. 75-81.

77. **Шепелев, И.А.** Распространение турбулентной струи в ограниченном пространстве (Осесимметричное течение) [Текст] / И.А. Шепелев, М.Д.Тарнопольский // В сб. «Исследование тепло- и массообмена в технологических процессах и аппаратах». – Минск: Наука и техника, 1966. – С. 291-297.

78. **Шепелев, И.А.** Аэродинамика воздушных потоков в помещении [Текст] / И.А. Шепелев. – М.: Стройиздат, 1978. – 144 с.
79. **Шумилов, Р.Н.** Проектирование систем вентиляции и отопления [Текст] / Р.Н. Шумилов, Ю.И. Толстова, А.Н. Бояршинова. – С-Пб: Лань, 2014. – 107 с.
80. **Шумилов, Р.Н.** Теоретические основы вентиляции. Аэродинамика. / Р.Н. Шумилов. – Екатеринбург: УГТУ, 2000.
81. ANSYS CFX-Pre User's Guide. Release 15.0. November, 2013.
82. **Karimipannah, T.** Turbulent jets in confined spaces. Theses / T. Karimipannah // Centre for Built Environment Royal Institute of Technology, 1996. – P. 183.
83. **Karimipannah, T.** Interference between supply jet and room surfaces in ventilated room – a model study / T. Karimipannah // Master's thesis in energy systems, 2009.
84. **Kochariantc K.V.** 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. – No. 31 October. – P. 173-179 (SCOPUS).
85. **Li, Y.** CFD and Ventilation Research / Y.Li, P.V., Nielsen // Indoor Air, 2011. – Vol. 21(6). – P. 442-453.
86. **Linke, W.** Stroungsvorgange in zwngsbelufteten Raumen. / W. Linke // VDI-Berichte Bd 21, 1957.
87. **Mataoui, A.** Unsteady phenomena of an oscillating turbulent jet flow inside a cavity: Effect of aspect ratio / A. Mataoui, R. Schiestel // Journal of Fluids and Structures, 25 (2009). – P.60–79.
88. **Mataoui, A.** Numerical Investigations on Heat Transfer of Self-Sustained Oscillation of a Turbulent Jet Flow Inside a Cavity / A. Mataoui, F.Iachachene, Y. Halouane // Journal of Heat Transfer. – Vol. 137 – OCTOBER 2015.

89. **Melikow, A.K.** Airflow Characteristics in the Occupied Zone of Heated Spaces without Mechanical Ventilation / A.K. Melikow, H.Hanzawa, P.O. Fanger – ASHRAE Transactions, 1988.– Vol. 94 – No.1 – P. 52-70.
90. **Melikow, A.K.** Airflow Characteristics in the Occupied Zone of Rooms with Displacement Ventilation / A.K. Melikow, G.Langkilde, B. Derbiszewski – ASHRAE Transactions,1990.– Vol. 96. – No.1. – P. 555-563.
91. **Melikow, A.K.** Air Flow Characteristics in the Occupied Zone of Ventilated Spaces / A.K. Melikow, H.Hanzawa, P.O. Fanger – ASHRAE Transactions, 1987. –Vol. 93. – No. 1. – P. 524-539.
92. **Mullejans, H.** Uber Ahnlichkeit der nicht-isothermen Stromung und den Wärmeübergang in Raumen mit Strahlftung. / H. Mullejans // Diss. T.H. Aachen, 1963.
93. **Nielsen, P.V.** Computational fluid dynamics in ventilation design. / P.V. Nielsen, P.V. Allard, F., Awbi, H.B., Davidson, L. and Schälin, A. // REHVA Guide Book 10. – RHEVA. – 2007.
94. **Nielsen, P.V.** Numerical Prediction of Air Distribution in Rooms – Status and Potentials / P.V. Nielsen – ASHRAE Transactions, 1989. – P. 31-38.
95. **Nielsen, P.V.** Air Distribution in Rooms - Research and Design Methods. Proceedings of the Fourth International Conference of Air Distribution in Rooms / P.V. Nielsen – ROOMVENT'94, Krakow, Poland, 1994. – June 15-17.
96. **Urbach, D.** Modelluntersuchungen zur Strahlftung / D. Urbach // Diss. T.H.Aachen, 1971.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Результаты численных исследований в программе ANSYS CFX приточных струй, формируемых воздухораспределителями ДКУ, ДПУ-К и РВР

Значения скорости воздуха V_y , м/с, в поперечных сечениях струи (профиль струи), формируемой диффузором ДКУ 315, на расстояниях $y = 0.5 \div 2$ м от геометрической оси диффузора, полученные в результате численного моделирования в программе ANSYS CFX с использованием трех различных моделей турбулентности, представлены в таблицах А.1÷12. Для построения профиля струи использовались значения относительной скорости V_y/V_y^{max} , где V_y^{max} – максимальное значение скорости в рассматриваемом сечении.

Таблица А.1 – Значения скорости воздуха в поперечном сечении струи на расстоянии $y=0.5$ м от геометрической оси диффузора ДКУ315 при численном моделировании с использованием «стандартной» модели турбулентности $k-\varepsilon$

Расстояние от поверхности настиления x , м	Скорость воздуха V_y , м/с	V_y/V_y^{max}
0.000	4.05	0.93
0.005	4.33	0.99
0.010	4.36	1.00
0.020	3.83	0.88
0.030	2.90	0.67
0.040	1.96	0.45
0.050	1.17	0.27
0.060	0.61	0.14
0.070	0.29	0.07
0.080	0.24	0.06

Таблица А.2 – Значения скорости воздуха на расстоянии $y=1$ м от геометрической оси диффузора ДКУ315 при численном моделировании с использование «стандартной» модели турбулентности $k-\varepsilon$

Расстояние от поверхности настиления x , м	Скорость воздуха V_y , м/с,	V_y/V_y^{max}
0.000	2.50	1.00
0.005	2.48	0.99
0.010	2.41	0.96
0.020	2.21	0.88
0.030	1.96	0.78
0.040	1.70	0.68
0.050	1.44	0.57
0.060	1.18	0.47
0.070	0.96	0.38
0.080	0.73	0.29
0.090	0.56	0.22
0.100	0.39	0.16

Таблица А.3 – Значения скорости воздуха на расстоянии $y=1.5$ м от геометрической оси диффузора ДКУ315 при численном моделировании с использование «стандартной» модели турбулентности $k-\varepsilon$

Расстояние от поверхности настиления x , м	Скорость воздуха V_y , м/с,	V_y/V_y^{max}
0.000	1.59	0.99
0.005	1.61	1.00
0.010	1.59	0.99
0.020	1.53	0.95
0.030	1.44	0.89
0.040	1.34	0.83
0.050	1.23	0.76
0.060	1.11	0.69
0.070	1.00	0.62
0.080	0.89	0.55
0.090	0.78	0.49
0.100	0.68	0.42

Таблица А.4 – Значения скорости воздуха на расстоянии $y=2$ м от геометрической оси диффузора ДКУ315 при численном моделировании с использованием «стандартной» модели турбулентности $k-\varepsilon$

Расстояние от поверхности настиления x , м	Скорость воздуха V_y , м/с,	V_y/V_y^{max}
0.000	1.14	0.98
0.005	1.17	1.00
0.010	1.17	1.00
0.020	1.14	0.98
0.030	1.10	0.95
0.040	1.05	0.90
0.050	1.00	0.86
0.060	0.94	0.81
0.070	0.88	0.75
0.080	0.82	0.70
0.090	0.76	0.65
0.100	0.70	0.60

Таблица А.5 – Значения скорости воздуха на расстоянии $y=0.5$ м от геометрической оси диффузора ДКУ315 при численном моделировании с использованием модели турбулентности SST

Расстояние от поверхности настиления x , м	Скорость воздуха V_y , м/с,	V_y/V_y^{max}
0.000	0.98	0.92
0.005	1.07	1.00
0.010	1.04	0.97
0.020	0.81	0.76
0.030	0.51	0.48
0.040	0.30	0.28
0.050	0.17	0.16
0.060	0.09	0.09
0.070	0.05	0.05
0.080	0.05	0.04

Таблица А.6 – Значения скорости воздуха на расстоянии $y=1$ м от геометрической оси диффузора ДКУ315 при численном моделировании с использованием модели турбулентности SST

Расстояние от поверхности настиления x , м	Скорость воздуха V_y , м/с,	V_y/V_y^{max}
0.000	0.53	0.93
0.005	0.57	1.00
0.010	0.56	0.97
0.020	0.50	0.87
0.030	0.43	0.75
0.040	0.35	0.62
0.050	0.28	0.50
0.060	0.22	0.39
0.070	0.17	0.30
0.080	0.13	0.22
0.090	0.09	0.16
0.100	0.06	0.11

Таблица А.7 – Значения скорости воздуха на расстоянии $y=1.5$ м от геометрической оси диффузора ДКУ315 при численном моделировании с использованием модели турбулентности SST

Расстояние от поверхности настиления x , м	Скорость воздуха V_y , м/с,	V_y/V_y^{max}
0.000	0.28	0.81
0.005	0.34	0.98
0.010	0.35	1.00
0.020	0.33	0.97
0.030	0.31	0.90
0.040	0.29	0.83
0.050	0.26	0.75
0.060	0.23	0.67
0.070	0.21	0.60
0.080	0.18	0.53
0.090	0.16	0.46
0.100	0.14	0.39

Таблица А.8 – Значения скорости воздуха на расстоянии $y=2$ м от геометрической оси диффузора ДКУ315 при численном моделировании с использованием модели турбулентности *SST*

Расстояние от поверхности настиления x , м	Скорость воздуха V_y , м/с,	V_y/V_y^{max}
0.000	0.16	0.68
0.005	0.22	0.93
0.010	0.24	0.99
0.020	0.24	1.00
0.030	0.23	0.97
0.040	0.22	0.92
0.050	0.21	0.87
0.060	0.20	0.82
0.070	0.18	0.76
0.080	0.17	0.71
0.090	0.16	0.66
0.100	0.14	0.60

Таблица А.9 – Значения скорости воздуха на расстоянии $y=0.5$ м от геометрической оси диффузора ДКУ315 при численном моделировании с использованием «стандартной» модели турбулентности $k-\omega$

Расстояние от поверхности настиления x , м	Скорость воздуха V_y , м/с,	V_y/V_y^{max}
0.000	0.90	0.91
0.005	0.98	1.00
0.010	0.97	0.99
0.020	0.79	0.81
0.030	0.56	0.57
0.040	0.37	0.38
0.050	0.24	0.25
0.060	0.16	0.17
0.070	0.11	0.11
0.080	0.09	0.09

Таблица А.10 – Значения скорости воздуха на расстоянии $y=1$ м от геометрической оси диффузора ДКУ315 при численном моделировании с использованием «стандартной» модели турбулентности $k-\omega$

Расстояние от поверхности настиления x , м	Скорость воздуха V_y , м/с,	V_y/V_y^{max}
0.000	0.46	0.93
0.005	0.49	1.00
0.010	0.48	0.98
0.020	0.44	0.89
0.030	0.39	0.80
0.040	0.35	0.71
0.050	0.31	0.62
0.060	0.27	0.54
0.070	0.23	0.47
0.080	0.20	0.41
0.090	0.17	0.35
0.100	0.15	0.30

Таблица А.11 – Значения скорости воздуха на расстоянии $y=1.5$ м от геометрической оси диффузора ДКУ315 при численном моделировании с использованием «стандартной» модели турбулентности $k-\omega$

Расстояние от поверхности настиления x , м	Скорость воздуха V_y , м/с,	V_y/V_y^{max}
0.00	0.22	0.81
0.01	0.28	1.00
0.01	0.28	1.02
0.02	0.28	1.00
0.03	0.26	0.95
0.04	0.25	0.90
0.05	0.24	0.85
0.06	0.22	0.79
0.07	0.21	0.74
0.08	0.19	0.69
0.09	0.18	0.64
0.10	0.16	0.59

Таблица А.12 – Значения скорости воздуха на расстоянии $y=2$ м от геометрической оси диффузора ДКУ315 при численном моделировании с использованием «стандартной» модели турбулентности $k-\omega$

Расстояние от поверхности настиления x , м	Скорость воздуха V_y , м/с,	V_y/V_y^{max}
0.000	0.12	0.64
0.005	0.18	0.92
0.010	0.19	0.98
0.020	0.19	1.00
0.030	0.19	0.98
0.040	0.18	0.95
0.050	0.18	0.92
0.060	0.17	0.88
0.070	0.16	0.84
0.080	0.16	0.81
0.090	0.15	0.77
0.100	0.14	0.74

Максимальные значения скорости воздуха V_y^{max} по длине струи на расстояниях y , м, от геометрической оси диффузора ДКУ315, полученные в результате численного моделирования в программе ANSYS CFX с использованием трех различных моделей турбулентности, представлены в таблицах А.13 ÷ 15.

Таблица А.13 – Значения максимальной скорости воздуха приточной струи диффузора ДКУ315 при численном моделировании с использованием «стандартной» модели турбулентности $k-\varepsilon$

(скорость воздуха в расчетном сечении $V_0 = 5$ м/с)

Расстояние от геометрической оси диффузора y , м	Максимальная скорость воздуха V_y^{\max} , м/с	V_y^{\max} / V_0	Коэф. m
0.50	4.62	0.92	1.68
1.00	2.62	0.52	1.91
1.50	1.68	0.34	1.84
2.00	1.22	0.24	1.78
2.50	0.95	0.19	1.72
3.00	0.77	0.15	1.68
3.50	0.65	0.13	1.65
4.00	0.56	0.11	1.61
4.50	0.49	0.10	1.59
5.00	0.43	0.09	1.57
5.50	0.39	0.08	1.54
6.00	0.35	0.07	1.52
6.50	0.32	0.06	1.51
7.00	0.29	0.06	1.49
7.50	0.27	0.05	1.48
8.00	0.25	0.05	1.47
8.50	0.24	0.05	1.46
9.00	0.22	0.04	1.45
9.50	0.21	0.04	1.44
10.0	0.20	0.04	1.44

Таблица А.14 – Значения максимальной скорости воздуха приточной струи диффузора ДКУ315 при численном моделировании с использованием модели турбулентности SST (скорость воздуха в расчетном сечении $V_0 = 1$ м/с)

Расстояние от геометрической оси диффузора y , м	Максимальная скорость воздуха V_y^{\max} , м/с	V_y^{\max} / V_0
0.50	1.08	1.08
1.00	0.57	0.57
1.50	0.35	0.35
2.00	0.24	0.24
2.50	0.18	0.18
3.00	0.15	0.15
3.50	0.12	0.12
4.00	0.10	0.10
4.50	0.09	0.09
5.00	0.08	0.08
5.50	0.07	0.07
6.00	0.06	0.06
6.50	0.06	0.06
7.00	0.05	0.05
7.50	0.05	0.05
8.00	0.04	0.04
8.50	0.04	0.04
9.00	0.04	0.04
9.50	0.04	0.04
10.0	0.03	0.03

Таблица А.15 – Значения максимальной скорости воздуха приточной струи диффузора ДКУ315 при численном моделировании с использованием «стандартной» модели турбулентности $k-\omega$

(скорость воздуха в расчетном сечении $V_0 = 1$ м/с)

Расстояние от геометрической оси диффузора y , м	Максимальная скорость воздуха V_y^{\max} , м/с	V_y^{\max} / V_0
0.50	0.99	0.99
1.00	0.49	0.49
1.50	0.29	0.29
2.00	0.19	0.19
2.50	0.14	0.14
3.00	0.11	0.11
3.50	0.09	0.09
4.00	0.08	0.08
4.50	0.07	0.07
5.00	0.06	0.06
5.50	0.05	0.05
6.00	0.05	0.05
6.50	0.04	0.04
7.00	0.04	0.04
7.50	0.04	0.04
8.00	0.03	0.03
8.50	0.03	0.03
9.00	0.03	0.03
9.50	0.03	0.03
10.0	0.03	0.03

Максимальные значения скорости воздуха V_y^{\max} по длине струи на расстояниях x , м, от лицевой поверхности диффузора ДПУ-К125, полученные в результате численного моделирования в программе ANSYS CFX с использованием трех различных моделей турбулентности, представлены в таблицах А.16 ÷ 18.

Таблица А.16 – Значения максимальной скорости воздуха приточной струи диффузора ДПУ-К125 в поперечных сечениях струи на расстояниях x , м, от лицевой поверхности диффузора при численном моделировании с использованием «стандартной» модели турбулентности $k-\varepsilon$

(скорость воздуха в расчетном сечении $V_0 = 11,0$ м/с)

Расстояние от геометрической оси диффузора x , м	Максимальная скорость воздуха V_x^{\max} , м/с	V_x^{\max} / V_0
2.0	2.76	0.25
2.5	2.64	0.23
3.0	2.44	0.20
3.5	2.17	0.18
4.0	1.89	0.16
5.0	1.45	0.12
6.0	1.18	0.10
7.0	0.98	0.08
8.0	0.82	0.07
9.0	0.71	0.06
10.0	0.64	0.05

Таблица А.17 – Значения максимальной скорости воздуха приточной струи диффузора ДПУ-К125 в поперечных сечениях струи на расстояниях x , м, от лицевой поверхности диффузора при численном моделировании с использованием модели турбулентности SST

(скорость воздуха в расчетном сечении $V_0 = 11,0$ м/с)

Расстояние от геометрической оси диффузора x , м	Максимальная скорость воздуха V_x^{\max} , м/с	V_x^{\max} / V_0
2.0	3.67	0.30
2.5	3.01	0.26
3.0	2.50	0.23
3.5	2.13	0.19
4.0	1.84	0.17
5.0	1.46	0.13
6.0	1.20	0.11
7.0	1.01	0.09
8.0	0.88	0.08
9.0	0.78	0.07
10.0	0.71	0.06

Таблица А.18 – Значения максимальной скорости воздуха приточной струи диффузора ДПУ-К125 в поперечных сечениях струи на расстояниях x , м, от лицевой поверхности диффузора при численном моделировании с использованием «стандартной» модели турбулентности $k-\omega$

(скорость воздуха в расчетном сечении $V_0 = 11,0$ м/с)

Расстояние от геометрической оси диффузора x , м	Максимальная скорость воздуха V_x^{\max} , м/с	V_x^{\max} / V_0
2.0	4.37	0.36
2.5	4.06	0.33
3.0	3.61	0.30
3.5	3.06	0.25
4.0	2.53	0.21
5.0	1.74	0.14
6.0	1.27	0.10
7.0	0.97	0.08
8.0	0.78	0.06
9.0	0.65	0.05
10.0	0.56	0.05

Максимальные значения скорости воздуха V_y^{\max} по длине струи на расстояниях y , м, от геометрической оси воздухораспределителя РВР, полученные в результате численного моделирования в программе ANSYS CFX с использованием «стандартной» модели турбулентности $k-\varepsilon$, представлены в таблице А.19.

Таблица А.19 – Значения максимальной скорости воздуха приточной струи воздухораспределителя РВР при численном моделировании с использованием «стандартной» модели турбулентности $k-\varepsilon$

(скорость воздуха в расчетном сечении $V_0 = 0,55$ м/с)

Расстояние от геометрической оси воздухораспределителя y , м	Максимальная скорость воздуха V_y^{\max} , м/с	V_y^{\max} / V_0
1	1.11	2.02
2	0.62	1.12
3	0.43	0.79
4	0.33	0.59
5	0.26	0.47
6	0.21	0.39
7	0.18	0.32
8	0.15	0.28
9	0.14	0.25
10	0.12	0.22

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты натурных испытаний воздухораспределителей ДКУ, ДПУ-К и РВР

Значения скорости воздуха V_y , м/с, в поперечных сечениях струи (профиль струи), формируемой диффузором ДКУ 315, на расстояниях $y = 0.5 \div 2$ м от геометрической оси диффузора, полученные в результате натурных испытаний, представлены в таблицах Б.1÷4. Для построения профиля струи использовались значения относительной скорости V_y/V_y^{max} , где V_y^{max} – максимальное значение скорости в рассматриваемом сечении.

Таблица Б.1 – Значения скорости воздуха на расстоянии $y=0.5$ м
от геометрической оси диффузора ДКУ315

Расстояние от поверхности настиления x , м	Средняя скорость воздуха V_y , м/с, по результатам 4-х измерений	V_y/V_y^{max}
0.000	7.81	0.98
0.004	7.98	1.00
0.010	7.56	0.95
0.014	7.87	0.99
0.020	6.51	0.82
0.024	5.72	0.72
0.030	5.53	0.69
0.034	4.49	0.56
0.040	3.83	0.48
0.044	3.05	0.38
0.050	2.79	0.35
0.054	2.09	0.26
0.060	1.84	0.23
0.064	1.39	0.17
0.070	1.28	0.16
0.074	1.03	0.13
0.080	0.93	0.12
0.084	0.81	0.10

Таблица Б.2 – Значения скорости воздуха на расстоянии $y=1$ м
от геометрической оси диффузора ДКУ315

Расстояние от поверхности настиления x , м	Средняя скорость воздуха V_y , м/с, по результатам 4-х измерений	V_y/V_y^{max}
0.00	4.71	1.00
0.01	4.54	0.96
0.02	4.07	0.86
0.03	3.70	0.79
0.04	3.32	0.70
0.05	2.86	0.61
0.06	2.42	0.51
0.07	1.88	0.40
0.08	1.47	0.31
0.09	1.16	0.25
0.10	0.88	0.19

Таблица Б.3 – Значения скорости воздуха на расстоянии $y=1.5$ м
от геометрической оси диффузора ДКУ315

Расстояние от поверхности настиления x , м	Средняя скорость воздуха V_y , м/с, по результатам 4-х измерений	V_y/V_y^{max}
0.00	3.11	1.00
0.01	3.12	1.00
0.02	3.04	0.97
0.03	2.84	0.91
0.04	2.65	0.85
0.05	2.50	0.80
0.06	2.27	0.73
0.07	2.08	0.67
0.08	1.89	0.61
0.09	1.69	0.54
0.10	1.50	0.48

Таблица Б.4 – Значения скорости воздуха на расстоянии $y=2$ м
от геометрической оси диффузора ДКУ315

Расстояние от поверхности настиления x , м	Средняя скорость воздуха V_y , м/с, по результатам 4-х измерений	V_y/V_y^{max}
0.000	2.21	0.97
0.010	2.20	0.97
0.014	2.27	1.00
0.020	2.25	0.99
0.030	2.13	0.94
0.040	2.10	0.93
0.050	1.99	0.88
0.060	1.90	0.84
0.070	1.78	0.78
0.080	1.73	0.76
0.090	1.58	0.70
0.100	1.44	0.63

Максимальные значения скорости воздуха V_y^{max} по длине струи на расстояниях y , м, от геометрической оси диффузора ДКУ315, полученные в результате натурных испытаний, представлены в таблице Б.5.

Таблица Б.5 – Значения максимальной скорости воздуха приточной струи диффузора
ДКУ315

Расстояние от геометрической оси диффузора y , м	Максимальная скорость воздуха V_y^{max} , м/с				Среднее значение V_y^{max} / V_0	Коэф. m
	измерение 1 $V_0= 6,4$ м/с	измерение 2 $V_0= 7,7$ м/с	измерение 3 $V_0= 8,3$ м/с	измерение 4 $V_0= 8,4$ м/с		
0.5	-	-	7.98	-	0.96	1.72
1.0	-	-	4.78	4.71	0.57	2.03
1.5	2.42	2.78	3.12	-	0.37	2.00
2.0	1.73	2.01	2.19	2.21	0.27	1.90
2.5	1.31	1.56	-	-	0.20	1.83
3.0	1.06	1.20	-	1.38	0.16	1.74
3.5	0.88	1.03	-	-	0.14	1.71
4.0	0.73	0.86	-	1.02	0.12	1.66
4.5	0.65	0.79	-	-	0.10	1.65
5.0	-	-	-	0.77	0.09	1.64
6.0	-	-	-	0.60	0.07	1.53

Максимальные значения скорости воздуха V_y^{\max} по длине струи на расстояниях x , м, от лицевой поверхности диффузора ДПУ-К125, полученные в результате натуральных испытаний, представлены в таблице Б.6.

Таблица Б.6 – Значения максимальной скорости воздуха приточной струи диффузора ДПУ-К125 (скорость воздуха в расчетном сечении $V_0 = 11,2$ м/с)

Расстояние от геометрической оси диффузора x , м	Средняя максимальная скорость воздуха V_x^{\max} , м/с, по результатам 4-х измерений	V_x^{\max} / V_0
2.0	2.81	0.25
3.0	2.02	0.18
3.5	1.79	0.16
4.0	1.58	0.14
5.0	1.30	0.12
6.0	1.05	0.09
7.0	0.86	0.08
8.0	0.74	0.07
9.0	0.63	0.06

Максимальные значения скорости воздуха V_y^{\max} по длине струи на расстояниях y , м, от геометрической оси воздухораспределителя РВР, полученные в результате натуральных испытаний, представлены в таблице Б.7.

Таблица Б.7 – Значения максимальной скорости воздуха приточной струи воздухораспределителя РВР (скорость воздуха в расчетном сечении $V_0 = 1,49$ м/с)

Расстояние от геометрической оси воздухораспределителя y , м	Средняя максимальная скорость воздуха V_y^{\max} , м/с, по результатам 2-х измерений	V_y^{\max} / V_0
1	2.90	1.94
2	1.80	1.21
3	1.16	0.78
4	0.86	0.57
5	0.69	0.46
6	0.57	0.38

ПРИЛОЖЕНИЕ В



• ЦНИИПРОМЗДАНИЙ •

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий» (АО «ЦНИИПромзданий»)

РФ, 127238, г. Москва, Дмитровское шоссе, дом 46, корп. 2
Телефон: +7 (495) 482 45 06; факс +7 (495) 482 43 06
e-mail: cniipz@cniipz.ru; http://www.cniipz.ru
ОГРН 1027739344544, ИНН 7713006939, КПП 771301001



Генеральный директор АО «ЦНИИПромзданий»

д.т.н. В.В. Гранев
«26» июня 2018 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

научно-технических разработок кандидатской диссертации

Кочарьянц Кристины Владимировны

акционерным обществом «ЦНИИПромзданий»

Мы, нижеподписавшиеся, начальник отдела инженерных систем, к.т.н. Л.В. Иванихина, руководитель группы отдела инженерных систем, к.т.н. А.С. Стронгин, главный специалист отдела инженерных систем Д.В. Капко составили настоящий акт в том, что результаты кандидатской диссертации Кочарьянц К.В. «Методика расчета воздухораспределения в помещениях стесненными струями» включены в изменение №1 к СП 60.13330.2016 «СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха», Приложение Л.

Разработанная методика позволит повысить точность инженерных расчетов при проектировании систем вентиляции и кондиционировании воздуха.

Начальник отдела инженерных систем, к.т.н.

Л.В. Иванихина

Руководитель группы отдела инженерных систем, к.т.н.

А.С. Стронгин

Главный специалист отдела инженерных систем

Д.В. Капко



ПРОИЗВОДСТВО ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ,
ОТОПЛЕНИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ

ООО «АРКТОС»
ИНН 7810190521 ОГРН 1037821000469
Россия, 196240, С-Петербург, 6-й Предпортовый проезд, д.4
тел./факс: (812) 324-70-08, (812) 329-53-68
e-mail: arktos@arktos.ru
Сайт: arktoscomfort.ru



Утверждаю

Генеральный директор ООО «Арктос»

к.т.н. Шкарпет В.Э.

«18» мая 2018 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

научно-технических разработок кандидатской диссертации Кочарьянц Кристины Владимировны обществом с ограниченной ответственностью «Арктос»

Мы, нижеподписавшиеся, начальник отдела технического сопровождения новой продукции А.С. Вавилов, начальник отдела компьютерного моделирования И.Н. Тисленко, начальник аэродинамического стенда А.М. Курсман составили настоящий акт в том, что результаты кандидатской диссертации Кочарьянц К.В.:

1. «Методика расчета воздухораспределения в помещениях стесненными струями» включена в практические рекомендации по расчету воздухораспределения «Указания по расчету и применению воздухораспределения», выпускаемые заводом «Арктос».
2. «Методика расчета воздухораспределения в помещениях стесненными струями» заложена в основу компьютерную программы по расчету воздухораспределения в помещениях ComfortAir.
3. «Методика определения модифицированного скоростного (кинематического) коэффициента» внедрена в практику проведения аэродинамических испытаний воздухораспределителей.

Начальник ОТСНП

А.С. Вавилов

Руководитель группы
компьютерного моделирования

И.Н. Тисленко

Начальник аэродинамического
стенда

А.М. Курсман



Санкт-Петербург

20.06.2018г.

Справка

об использовании результатов кандидатской диссертации Кочарьянц К.В. на тему
«Совершенствование методов расчета воздухораспределения
в помещениях стесненными струями»

Методика расчета воздухораспределения в помещениях стесненными струями» и программа расчета ComfortAir, разработанные на основании исследований, проведенных К.В.Кочарьянц в диссертационной работе, внедрены и используются в практике инженерных расчетов воздухораспределения в помещениях при проектировании систем вентиляции и кондиционирования специалистами и проектировщиками компании «Арктика».

Генеральный директор

ЗАО «Арктика»



Терехов С.К.

Инженерные системы: вентиляция, отопление, кондиционирование, автоматизация, диспетчеризация

ЗАО «АРКТИКА»
ИНН 7825400027

Россия, 191002, Санкт-Петербург,
Ул. Рязанская, 12, офис 43

Тел.: +7 (812) 441 35 30
Факс: +7 (812) 441 35 35

[http:// www.arktika.ru](http://www.arktika.ru)
e-mail: arktika@spb-arktika.ru

ООО «ММ-Технологии»
 190020, Россия, Санкт-Петербург,
 Рижский пр., д.23/А, пом.9-Н
 8 (812) 961-06-92; info@mm-technologies.ru
 www.mm-technologies.ru



14.06.2018 г.

Справка

Об использовании результатов кандидатской диссертации Кочарьянц К.В.

Определенные в процессе диссертационного исследования Кочарьянц К.В. оптимальные параметры для численного моделирования вентиляционных струйных течений и разработанная ею «Методика расчета воздухораспределения в помещениях стесненными струями» используются специалистами нашей компании в повседневной работе при инженерных расчетах и численном моделировании воздухораспределения в помещениях различного назначения.

Генеральный директор
 ООО «ММ-Технологии»



А.Н. Колосницын