

*На правах рукописи*



**СОЛОДОВА ЕВГЕНИЯ ЭДУАРДОВНА**

**РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ КОЛЕН И ИХ УЗЛОВ ДЛЯ  
СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ МЕТОДОМ ПРОФИЛИРОВАНИЯ,  
ИСКЛЮЧАЮЩИМ ПОЯВЛЕНИЕ ВИХРЕВЫХ ЗОН**

**Специальность 2.1.3 - Теплоснабжение, вентиляция,  
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение**

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук**

**Белгород 2022**

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

Научный руководитель:

**Зиганшин Арслан Маликович**  
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

**Боровков Дмитрий Павлович**,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Безопасность  
жизнедеятельности в строительстве и  
городском хозяйстве» ФГБОУ ВО  
«Волгоградский государственный  
технический университет»

**Семичева Наталья Евгеньевна**,  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой  
«Теплогазоводоснабжения» ФГБОУ  
ВО «Юго-Западный государственный  
университет»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Нижегородский  
государственный архитектурно-  
строительный университет»

Защита состоится «23» декабря 2022 года в 10 часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 242.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте: [https://gos\\_att.bstu.ru/dis/Solodova](https://gos_att.bstu.ru/dis/Solodova)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Д.Ю. Суслов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** При транспортировании воздуха по сети воздуховодов систем вентиляции имеют место потери давления на трение и потери в местных сопротивлениях - коленах, тройниках, крестовинах и т. п. Причиной возникновения местных потерь давления являются изменение направления течения и образование вихревых зон.

Колена и узлы, состоящие из последовательно расположенных колен, часто встречающиеся на практике элементы вентиляционных сетей. Обычно из-за ограниченности технических пространств для размещения вентиляционных сетей такие элементы выполняются без скругления внутреннего угла. Такие «острые» фасонные детали имеют достаточно высокое сопротивление, и именно в них теряется большая часть давления, развиваемого вентиляторами. При помощи профилирования (установки внутрь прямой фасонной детали профилирующей вставки – в случае реконструкции или создания профилированной детали на заводе-изготовителе – в случае нового строительства) возможно снизить энергопотребление систем вентиляции при эксплуатации здания, а также к уменьшить капитальные затраты при сооружении и закупке вентиляционного оборудования пониженной энергоемкости. Кроме этого, часто колена располагаются близко друг к другу, образуя Z- или П- образные колена, сопротивление которых существенно зависит от расстояния между входящими в них одиночными коленами (L-образными). Таким образом, численное и экспериментальное исследование течения в каналах с коленами их узлами, разработка их профилированных конструкций является актуальной задачей, направленной на повышение энергоэффективности систем вентиляции.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблемам аналитического, численного и экспериментального исследования течений в каналах и трубах с фасонными деталями посвящены труды Логачёва И. Н., Логачева К. И., Пузанок А. И., Панова Д.О., Щура Н.А, Ito H., Imai K., Kirchbach, Tunstall M.J., Harvey J.K., Heskestad G., Haase D., Lichtarowicz A., Markland E., Liu W., Long Z., Chen Q., Munisamy K., Yusoff M., Röhrig R., Jakirlić S., Tropea C., Yamashita H., Sleiti A., Saleh M., Idem S., Lakshmiraju M., Cui J., Modi P. P., Javanti S., Hufnagel L., Canton J., Örlü R., Marin O., Merzari E., Kalpakli Vester, A., Örlü, R. & Alfredsson, P. H., Wang Ya., Dong Q., Wang P. и многих других. В частности, повышением энергоэффективности фасонных деталей систем вентиляции посвящены работы Идельчика И. Е., Gao. R, Moujaes S. F., Brooks P.J., Modi P.P., Зиганшина А. М. Для снижения сопротивления возмущающего элемента (ВЭ) Идельчиком И. Е. был предложен метод скругления острых кромок. Однако, значительный эффект достигается лишь при радиусе скругления в 1,2-1,5 ширины канала, что существенно увеличивает габариты фасонной детали. При проектировании и монтаже таких колен требуется больше пространства, которое при строительстве

особенно гражданских зданий сильно ограничено. Кроме этого, известны методы установки дополнительных устройств, к примеру, направляющих лопаток в колене, которые предотвращают, отрыв течения от стенок и образование вихревой области. Или методы топологической оптимизации, когда форма колена оптимизируется по аэродинамическому сопротивлению. Эти способы хотя и приводят к снижению сопротивления, но усложняют технологию изготовления, а значит и стоимость фасонной детали и поэтому на практике практически не используются. Зиганшиным А. М. была разработана профилирующая вставка, позволяющая снизить коэффициент местного сопротивления (КМС) для равностороннего L-образного колена, с использованием очертания вихревой зоны. Однако, ясно, что ее профиль будет существенно отличаться при изменении размеров канала после поворота, а также для узлов, состоящих из сдвоенных колен. Таким образом, является актуальным разработка набора профилей для широкого диапазона разносторонних одиночных и сдвоенных колен, а также зависимости для определения взаимного влияния отдельных колен внутри узла.

**Цель работы:** разработка аэродинамически усовершенствованных конструкций колен и узлов из сдвоенных колен для систем вентиляции, путем профилирования по очертаниям вихревых зон и корректировка расчета сопротивления с учетом их взаимного влияния.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

- 1) аналитический обзор исследований внутренних течений в каналах с фасонными элементами в виде колен и их узлов и способов повышения их энергоэффективности систем вентиляции при транспортировке чистого воздуха, выбор данных для проведения валидации компьютерного моделирования и натурных экспериментов;
- 2) верификация и валидация схемы численного решения задач о течениях в канале с коленом на  $90^\circ$  и их комбинацией;
- 3) численные исследования течения в каналах с «острыми» одиночными и сдвоенными коленами с целью определения коэффициентов местного сопротивления (КМС), очертаний вихревых зон (ВЗ) и длин зон влияния;
- 4) разработка компьютерных моделей усовершенствованных профилированных колен, с определением КМС, эффективности снижения сопротивления и длин зон влияния;
- 5) экспериментальные исследования по подтверждению численных результатов очертаний вихревых зон в непрофилированных коленах и снижения КМС в коленах усовершенствованной конструкции;
- 6) определение коэффициентов взаимного влияния колен в узле, позволяющие рассматривать данный возмущающий элемент как узел либо как одиночные фасонные детали и корректно рассчитывать КМС;

7) разработка дополнительной программы к аэродинамическому расчету систем вентиляции по определению потерь давления в коленах унифицированной и профилированной формы.

**Объект исследования** - течения воздуха в каналах прямоугольного сечения с фасонными элементами в виде одиночного колена и узлов из сдвоенных колен в Z- и П-образной компоновке.

**Предмет исследования** – аэродинамическое сопротивление одиночного колена и узлов из сдвоенных колен в Z- и П-образной компоновке систем вентиляции.

**Основная идея работы** состоит в уменьшении сопротивления одиночных и сдвоенных колен, за счет их профилирования по очертаниям, образующихся в них вихревых зон, а также учет взаимного влияния последовательно расположенных одиночных колен, входящих в узлы Z- и П-образных колен.

**Научная новизна исследования** состоит в следующем.

1. В результате численного исследования «острых» колен и их узлов расширен диапазон размеров L-образных колен для  $b_1/b_0$  от 0,2 до 3, Z-образных колен для  $l'_k/b$  до 35, П-образных колен до  $l_k/b = 15$ , по которым отсутствуют данные о сопротивлениях в известных справочниках.

2. Численным путем получены очертания вихревых зон во внутреннем и внешнем углах одиночных и сдвоенных в Z- и П-конфигурации колен. Определены зависимости очертаний вихревых зон от ширины канала после поворота  $0,2 < b_1/b_0 < 3$ , глубины канала  $0,25 < a_0/b_0 < 4$  для одиночного колена и расстояния между коленами  $0,4 < l_k/b < 35$  для Z-образной конфигурации и  $0,5 < l_k/b < 15$  для П-образного соединения. Показано, что на расстояниях более 15 калибров - очертание второй вихревой зоны по направлению течения совпадает с очертанием первой ВЗ в сдвоенных узлах, то есть колена в узле ведут себя обособленно. Экспериментально подтверждены очертания вихревой зоны, найденные численно для L-образного колена.

3. Численно определены длины зон влияния до и после поворота для L-, Z- и П-образных колен различных геометрий. Выявлено снижение длины зоны влияния после профилирования фасонной детали от 5% до 20% для одиночного колена, от 23,5% до 66,6% для Z-колена и от 18,8% до 35,5% для П-конфигурации.

4. Построены зависимости КМС профилированных L-, Z- и П-образных колен от их геометрических размеров, показывающие снижение КМС, по сравнению с непрофилированной конструкцией на величину от 31,7% до 80%.

5. Определены зависимости для коэффициентов взаимного влияния близко расположенных друг за другом колен, показывающие зависимость КМС узла от расстояния между входящими в него коленами, и подтверждающие ранее найденное расстояние в 15 калибров, при котором взаимным влиянием можно пренебречь.

**Методология исследования** основана на анализе литературных источников, с определением основных источников для валидации компьютерных моделей; при исследованиях использовались численные методы решения уравнений движения турбулентной жидкости, реализованные в программном комплексе Ansys Fluent, а для подтверждения основных численных результатов – лабораторный эксперимент и методы математической статистики его обработки.

**Область исследования** соответствует паспорту научной специальности ВАК: 2.1.3 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение», а именно п.3 «Разработка и совершенствование систем теплогасоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха, разработка методов энергосбережения систем и элементов теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума зданий и сооружений, аспирации и пневмотранспорта, включая использование альтернативных, вторичных и возобновляемых источников энергии; развитие методов моделирования многофазных потоков и динамических процессов в аэродисперсных системах» и п.4 «Разработка математических моделей, методов, алгоритмов и компьютерных программ, использование численных методов, с проверкой их адекватности, для расчета, конструирования и проектирования систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума зданий и сооружений, повышения их надежности и эффективности».

**Теоретическая значимость** диссертационного исследования состоит в:

- разработке «численной схемы» для решения задач о течении воздуха в каналах с коленами и их узлами, в том числе профилированных;
- определении очертаний вихревых зон во внешних и внутренних углах «острых» колен в L-, Z-, П-образной конфигурации и нахождении их зависимости от геометрических параметров канала;
- определении зависимостей для длин зон влияния на поток до и после одиночных и сдвоенных колен от геометрии;
- определении зависимостей коэффициентов взаимного влияния колен, входящих в узлы: Z- и П-образных колен от их геометрии;
- нахождении зависимости коэффициента местного сопротивления от геометрических параметров канала для усовершенствованных конструкций профилированных одиночных и сдвоенных колен.

**Практическая значимость** диссертационного исследования состоит в:

- разработке конструкций энергоэффективных одиночных и сдвоенных колен вентиляционных систем при помощи профилирования «острых» кромок унифицированных колен;

- построении инженерных графических и аппроксимационных зависимостей для определения КМС профилированного одиночного и сдвоенных колен для проведения аэродинамического расчета;
- разработке компьютерной программы «Онлайн-расчеты КМС: энергоэффективные отводы» и «Онлайн-расчеты КМС: энергоэффективный Z-отвод» для расчета сопротивления «острых» и профилированных колен.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. очертания вихревых зон, полученные при двумерном моделировании, и их использование для создания усовершенствованных конструкций-одиночных и сдвоенных Z- и П-образных колен со сниженным аэродинамическим сопротивлением;
2. зависимости очертаний вихревых зон, полученные при двумерном и трехмерном моделировании, в «острых» одиночных и сдвоенных коленах от конструктивных параметров;
3. зависимости длин зон влияния, найденных по результатам численного моделирования «острых» конструкций колен от конструктивных параметров;
4. результаты экспериментального определения сопротивления одиночного колена, а также очертания вихревой зоны, образующейся при срыве с «острой» кромки во внутреннем углу L-образного фасонного элемента;
5. снижение коэффициента местного сопротивления после профилирования, зависимость эффективности профилирования от геометрических параметров L-, Z-, П-образных колен;
6. зависимости для КМС и коэффициентов взаимного влияния (КВЗ) профилированных одиночных, Z- и П-образных колен от геометрических параметров;
7. результаты экспериментального определения коэффициента местного сопротивления для профилированной конструкции одиночного колена;
8. зависимости длин зон влияния, найденные по результатам численного моделирования для профилированных L-, Z-, П-образных колен от конструктивных параметров.

**Степень достоверности выводов, результатов и найденных закономерностей** подтверждается использованием известных фундаментальных положений аэродинамики, верифицированных программных комплексов и поверенных измерительных средств, удовлетворительной сходимостью результатов численного эксперимента по программе *Fluent*, соответствием численных расчетов результатам других авторов и собственным лабораторным экспериментам.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационного исследования применены при проектировании и модернизации систем

вентиляции объекта «Офисный центр URBAN по ул. Островского г. Казани». Был проведен дополнительный аэродинамический расчет вентиляционных систем, при котором для определения сопротивления профилированных отводов использовались закономерности, реализованные в виде модуля программы «Онлайн-расчеты КМС: энергоэффективные отводы». Для раскройки усовершенствованных профилированных отводов на 90° использованы очертания вихревых зон, найденные по результатам исследования, согласно актам внедрений организаций ООО «СК «Регион Климата»», ООО «Компания Инженерные Технологии».

Полученные зависимости коэффициентов местного сопротивления для энергоэффективных колен реализованы в виде программного комплекса «Онлайн-расчеты КМС: энергоэффективные отводы» для экономии времени при выполнении аэродинамических расчетов систем вентиляции. Программа используется в учебном процессе бакалавров, магистров направления «Строительство» в Казанском государственном архитектурно-строительном университете, а также в реальном проектировании объектов жилищно-коммунального хозяйства в рамках деятельности ООО «Современное проектирование» ГК «Fortex», ООО «Архитектурное бюро АБ1».

#### **Апробация работы.**

Основные положения и результаты работы докладывались и получили одобрение на Международных и Всероссийских научно-практических конференциях, проходивших в Казанском государственном архитектурно-строительном университете в период с 2016 по 2021гг., на Всероссийских и республиканских конкурсах научных работ, форумах и выставках: на соискание премии им. Н. И. Лобачевского, Казань, 2017г. (диплом 1 степени), «Мы выбираем энергоэффективность», Казань, 2017г. (диплом 1 степени), «Наука будущего - наука молодых», Нижний Новгород, 2017г. (диплом финалиста), на соискание стипендий Правительства Российской Федерации для студентов и аспирантов, 2017-2018гг., «50 лучших инновационных идей для Республики Татарстан» (диплом победителя), на выставке «Актив», Казань, 2018г., на Российском венчурном форуме, г. Казань, 2019г., 2021г., на Всероссийском конкурсе выпускных квалификационных работ АСВ, 2019 (диплом 1 степени), на Всероссийском конкурсе выпускных квалификационных работ на медаль РААСН (диплом 1 степени и золотая медаль РААСН), на соискание именных стипендий Мэра Казани по итогам 2021 года среди студентов и аспирантов (диплом стипендиата), на соискание специальных государственных стипендий Республики Татарстан для аспирантов, адъюнктов, студентов и курсантов 2021-2022гг (свидетельство стипендиата).

Работа выполнена при грантовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (номер договора 13713ГУ/2018 от 01.04.2019г.), Инвестиционно-венчурного фонда



Республики Татарстан (договор целевого финансирования №13/109/2019 от 28.06.2019г.), Правительства Республики Татарстан (реш. Республиканской комиссии по присуждению гранта от 07.06.2019г.).

**Публикации.** Основные теоретические и практические результаты диссертационного исследования изложены в 18 научных публикациях, из которых 3 опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 2 – в журналах, индексируемых в базе цитирования Scopus. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ на ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Сформулированы основные задачи исследования, проведены все необходимые этапы расчетных и экспериментальных работ – постановка, исследования, обработка и обобщение результатов. Сформулированы выводы, проведены апробация и внедрение результатов работы.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 109 источников, и 8 приложений. Работа изложена на 216 страницах машинописного текста, на 11 страницах приложений и включает 126 рисунков и 10 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проблемы исследования, приведены степень разработанности темы, цели и задачи, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость, содержатся сведения о реализации и апробации результатов работы.

**В первой главе** проанализированы работы по течениям в каналах с одиночными и сдвоенными коленами в Z- и П-образной конфигурации, а также рассмотрены способы повышения их энергоэффективности.

Для L-образных колен имеется достаточно полная информация по коэффициентам местного сопротивления, очертаниям вихревых зон (ВЗ) и некоторые сведения по длинам зон влияния (ЗВ). Зависимости КМС от геометрических параметров, полученные экспериментально И. Е. Идельчиком, Н. Nippert и численно V. Zmrhal, S.F. Moujaes, совпадают друг с другом за исключением экспериментальных данных Н. Recknagel. Свободная линия тока в канале с «острым» коленом, найденная экспериментально G. Heskestad, Н. Nippert, аналитически D. Haase и численно А. Lichtarowicz позволяет провести валидацию компьютерной модели. Сведения о длинах ЗВ отрывочны.

Для Z- и П-образных колен информации по КМС значительно меньше, а по очертаниям ВЗ, длинам ЗВ – отсутствуют. Наиболее полными данными являются зависимости КМС от геометрических параметров канала, полученные И. Е. Идельчиком и V. Zmrhal.

Способов уменьшения сопротивления колен немного. Одним из самых распространенных является скругление по радиусу окружности (И. Е. Идельчик, P.J. Brooks). При скруглении внутренней стенки минимальное значение сопротивления L-образного колена на  $90^\circ$  достигается при  $r_0/b_0=1,2\div 1,5$ , что для, обычно больших размеров воздуховодов, приводит к существенному увеличению габаритов участка системы и поэтому на практике не используется из-за отсутствия достаточного пространства. Также КМС колена может быть снижено путем установки специальных вставок (И. Маланичев, A. Li, X. Chen), экранов (R. Gao, K. Liu), направляющих лопаток (И. Е. Идельчик, S. F. Moujaes, P.J. Brooks). Для сложных конструкций сдвоенных колен с целью повышения их эффективности применяют топологическую оптимизацию (Ф.Г. Ахмадиев, Е. Смирнов, Д. Панов). Такие способы усовершенствования колен, хотя и приводят к снижению сопротивления на величину от 50% до 90%, но существенно усложняют технологию их изготовления и удорожают производство, поэтому практически не используются.

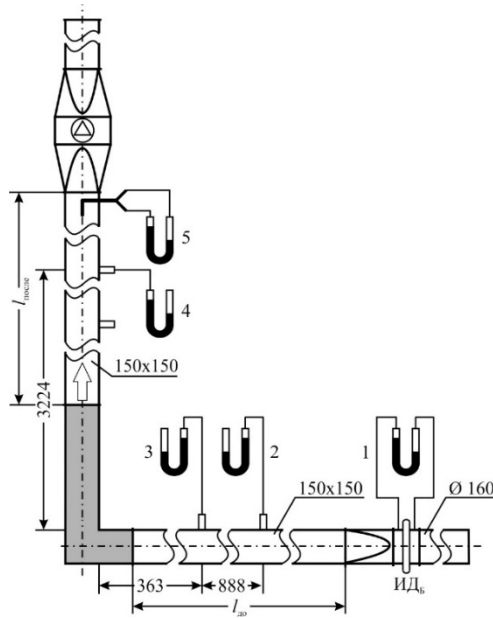
**Во второй главе** описываются используемые методы численного и экспериментального исследования.

*Численное моделирование.* В работе принят способ построения крупной ( $y^+ \approx 1400$ ) структурированной сетки с последующим ее измельчением до  $y^+ \approx 1$  в процессе решения. Такая сетка имеет высокое качество, а способ позволяет проводить исследования на «сеточную сходимость», путем поэтапного измельчения расчетной сетки. Перед началом исследований проводилась настройка «численных схем»: постановка задачи (в том числе стационарность), моделей турбулентности и их настроек, пристеночных функций, граничных и начальных условий.

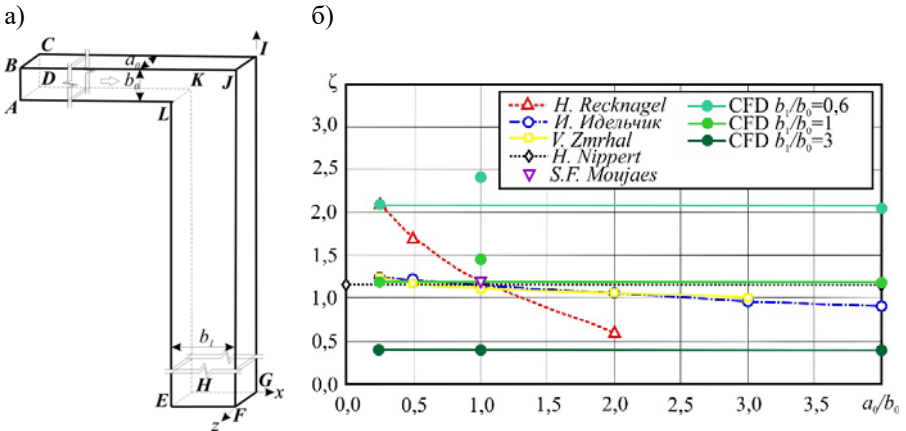
*Экспериментальные исследования.* Для подтверждения численных результатов используется установка - система воздуховодов с L-образным коленом (рисунок 1).

**В третьей главе** приведены результаты численных и экспериментальных исследований одиночного колена с различным соотношением ширины канала после поворота  $0,02\text{м} < b_1 < 0,4\text{м}$  и его глубины  $a_0$  (от 0,1 до  $\infty$  (двумерная задача) при  $b_0 = 0,1\text{м}$  и  $0,2\text{м}$  (рисунок 2а). По результатам сравнения и настройки модели выбрана «стандартная»  $k-\epsilon$  модель турбулентности со «стандартными» пристеночными функциями, при которой изменение сопротивления колена удовлетворительно согласуется с данными других авторов (различие от 2% до 23% рисунок 2б).

Далее определены очертания ВЗ в двумерных коленах (рисунок 3).

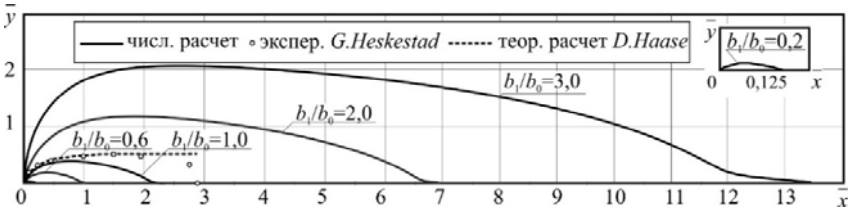


**Рисунок 1** - Экспериментальная установка с коленом. ИДб – измерительная диафрагма; 1-5 – точки измерения давлений



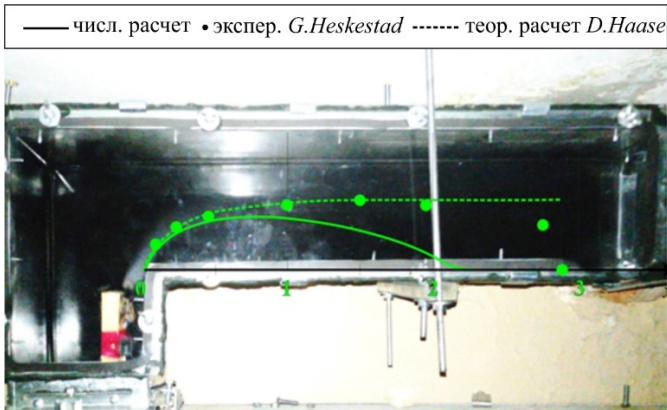
**Рисунок 2** - а) геометрия расчетной области (для случая  $b_1/b_0=2$  и  $a_0/b_0=4$ ); б) зависимость КМС колен от  $a_0/b_0$ , найденная: экспериментально *H. Recknagel*, *И. Е. Идельчик*, *H. Nippert* и численно *V. Zmrhal*, *S.F. Moujaes*

На рисунке 3 видно увеличение размеров ВЗ при увеличении  $b_1/b_0$ , что объясняется увеличением диффузорного эффекта и, следовательно, отрыва потока.



**Рисунок 3** - Очертания ВЗ в двумерных коленах; здесь  $\bar{x} = x/b_0$ ,  $\bar{y} = y/b_0$

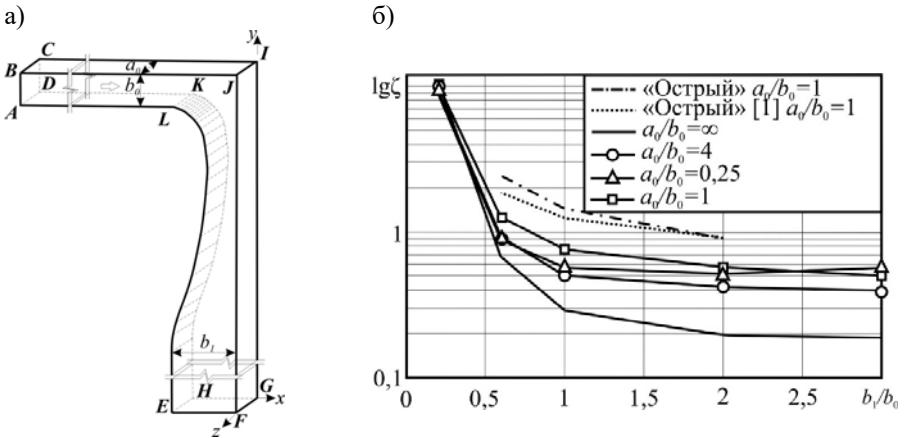
Удовлетворительное соглашение очертаний ВЗ с отрывочными данными других авторов и собственным экспериментом (рисунок 4) подтверждают адекватность компьютерной модели (отличие от 5% до 28%).



**Рисунок 4** - Очертание ВЗ в «остром» колене

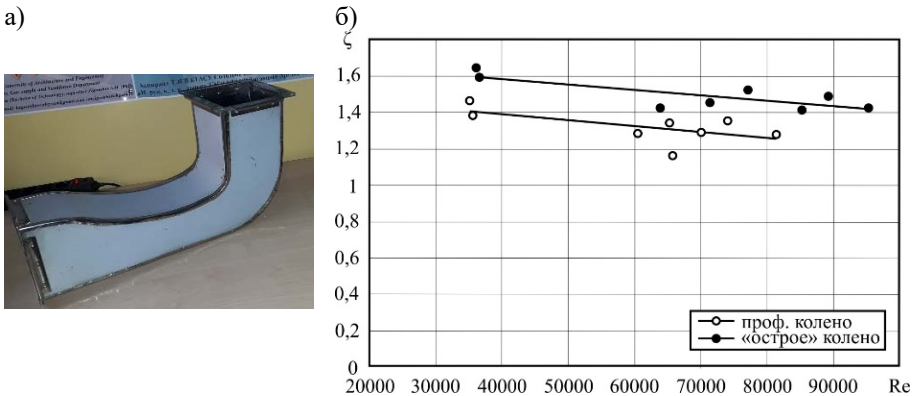
Для всего исследованного диапазона размеров «острых» колен разработаны и исследованы компьютерные модели колен профилированных по очертаниям ВЗ во внутреннем углу колена, найденной из двумерной постановки (рисунок 5а) и построены зависимости КМС от размеров колена (рисунок 5б). Видно, что сопротивление профилированного колена существенно ниже «острого» (снижение до 54%).

Экспериментальное исследование КМС профилированного колена (рисунок 6) показало эффективность профилирования  $\Delta\zeta = 100 \cdot (\zeta_{\text{непроф}} - \zeta_{\text{проф}}) / \zeta_{\text{непроф}} = 14,2\%$ , что меньше, чем при компьютерном моделировании, где  $\Delta\zeta = 37,3\%$ , но подтверждает факт снижения сопротивления при профилировании.



**Рисунок 5** – а) пример геометрии расчетной области профилированного колена (для случая  $b_1/b_0=2$  и  $a_0/b_0=1$ ); б) зависимость КМС профилированного колена от соотношения размеров  $b_1/b_0$  и  $a_0/b_0$

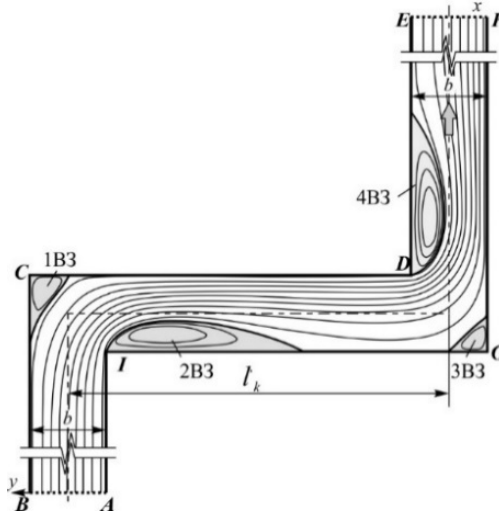
Отличие в  $\Delta\zeta$  может объясняться несовершенством при изготовлении профилированного колена и неопределенностью измерений.



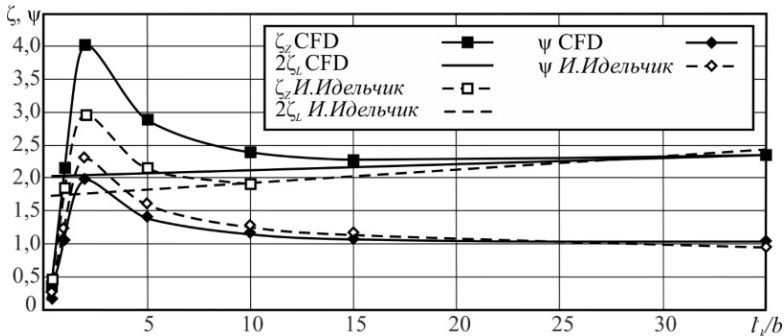
**Рисунок 6** – а) профилированное колено; б) зависимость КМС от  $Re$  в «остром» и профилированном коленах

В четвертой главе приведены результаты численных исследований двоянного колена в Z-конфигурации (рисунок 7). Ширина канала –  $b=0,1$  м, глубина –  $a=0,1$  м, расстояние между коленами изменялось:  $l'_k = 0,04$  м ( $0,4b$ );  $0,1$  м ( $1b$ );  $0,2$  м ( $2b$ );  $0,5$  м ( $5b$ ),  $1,5$  м ( $15b$ ),  $3,5$  м ( $35b$ ).

При сравнении с данными справочника *И. Е. Идельчика* выбрана «стандартная»  $k-\varepsilon$  модель турбулентности с расширенным пристеночным моделированием (SKE EWT), различие не превышает 20-25% (рисунок 8).



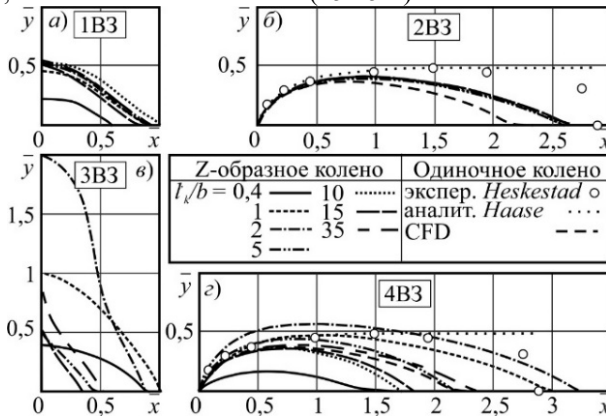
**Рисунок 7** - Расчетная область и характерные линии тока для Z-образного колена с  $l'_k/b=5$



**Рисунок 8** – Зависимость КМС ( $\zeta_z$ ) и коэффициента взаимного влияния  $\psi$  от  $l'_k/b$  для Z-образного колена и удвоенное значение КМС для одиночного колена ( $2\zeta_L$ )

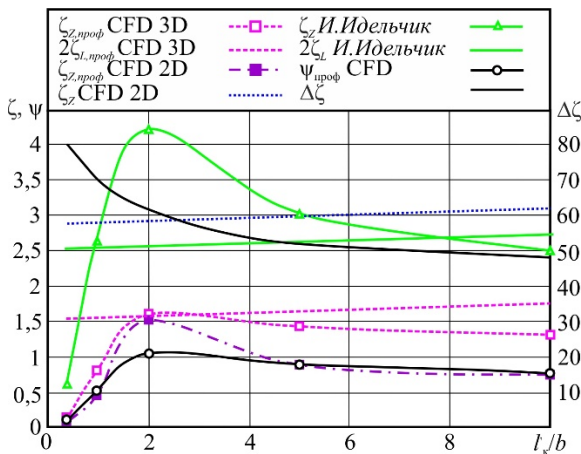
Построены зависимости для  $\zeta_z$  и  $\psi = (\zeta_z - \zeta_{тр})/2\zeta_L$ , где  $\zeta_{тр}$  – коэффициент учета трения. В диапазоне  $0 < l'_k/b < \sim 2b$   $\zeta_z$  и  $\psi$  растут до своего максимума и затем снижаются, приближаясь соответственно к  $2\zeta_L$  и 1. На расстоянии  $l'_k = 15b$  взаимным влиянием колен уже можно пренебречь.

Определены очертания ВЗ (двумерная постановка, рисунок 9). Здесь видно, что размеры 2ВЗ несут существенно зависят от  $l'_k/b$ , и близки к одиночному, хотя и несколько больше (~5-15%).



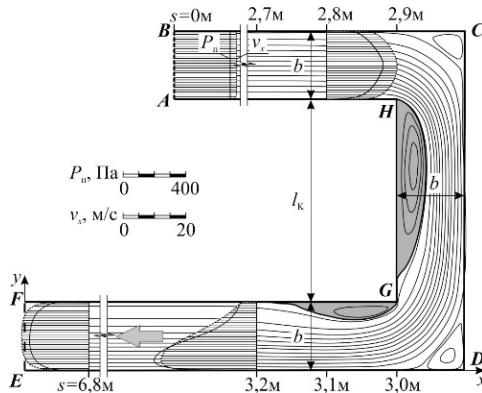
**Рисунок 9** – Очертания ВЗ: а) 1ВЗ; б) 2 ВЗ; в) 3 ВЗ; г) 4 ВЗ для Z-образного колена с  $l'_k/b = 0,4 \div 35$  и 2 ВЗ и 4 ВЗ для одиночного колена

А 4ВЗ зависит от  $l'_k/b$ . При малых  $l'_k = 0,4b$  4ВЗ имеет минимальные размеры из-за минимальной деформации потока, и далее увеличивается при  $l'_k/b = 1$  и  $l'_k/b = 2$  из-за образования объединенной ВЗ (2 и 3 ВЗ) и далее при  $l'_k/b > 2$  снова уменьшается, стремясь к ВЗ в одиночном колене.



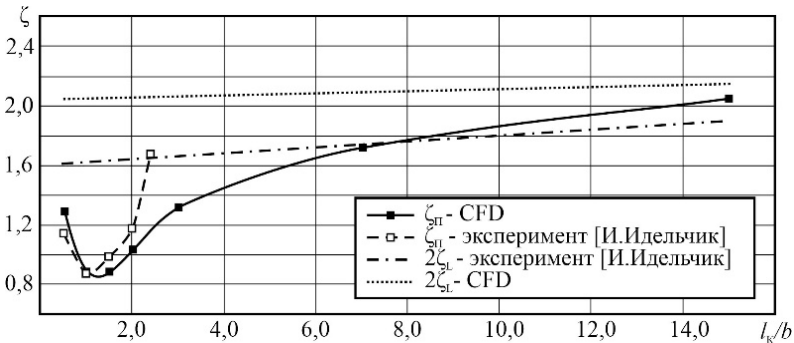
**Рисунок 10** - Зависимость КМС ( $\zeta_{Z, \text{проф}}$ ,  $2\zeta_{L, \text{проф}}$ ), коэффициента взаимного влияния  $\psi$  и эффективности профилирования  $\Delta\zeta$  для трехмерного Z-образного колена от  $l'_k/b$

В пятой главе приведены результаты численных исследований сдвоенного колена в П-конфигурации (рисунок 11). Расстояние между коленами  $l_K/b$  менялось от  $0,5b$  до  $7b$ , ширина канала –  $b = 0,1\text{м}$ .



**Рисунок 11** – Пример геометрии расчетной области и картины течения для случая  $l_K/b = 3$ : линии тока, эпюры полного давления и продольной скорости

При сравнении с данными *И.Е. Идельчика* (рисунок 12) настроена компьютерная модель. Диапазон зависимости КМС ( $\zeta_{\Pi}$ ) от  $l_K/b$  расширен до  $l_K/b = 15$ .



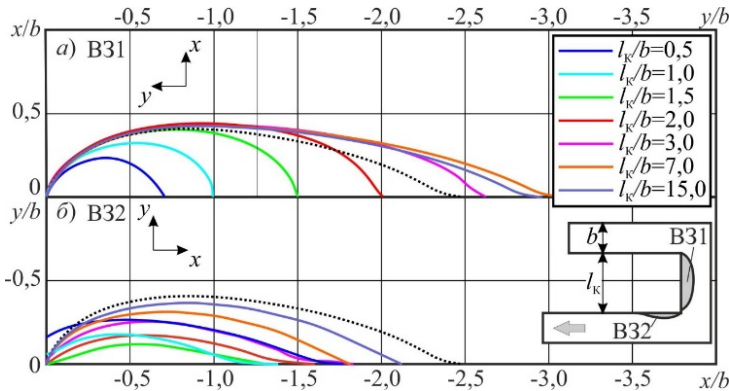
**Рисунок 12** - Зависимость  $\zeta$  П-образного колена ( $\zeta_{\Pi}$ ) от расстояния  $l_K/b$

Построены линии удвоенного значения КМС одиночного колена ( $2\zeta_L$ ) по данным *И.Е. Идельчика* и по данным численного расчета. При  $0,5 < l_K/b < 1$   $\zeta_{\Pi}$  уменьшается, и становится существенно меньше  $2\zeta_L$ , из-за слияния отрывных зон, что обеспечивает плавный вход потока во второй поворот и уменьшает КМС узла. При  $l_K/b > 1,5$  ВЗ разделяются и увеличиваются, что увеличивает  $\zeta_{\Pi}$  до  $2\zeta_L$  при  $l_K/b = 8,5$ . Найденная зависимость коэффициента



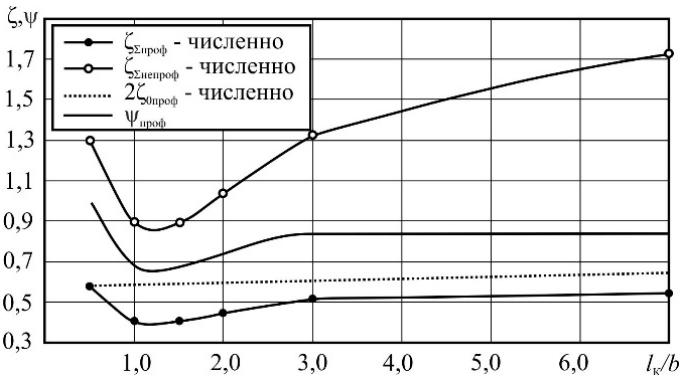
взаимного влияния  $\psi$  от  $l_K/b$  показывает, что взаимное влияние становится несущественным и  $\psi$  приближается к 1 при  $l_K/b = 15$ .

Численно найдены очертания ВЗ1 и ВЗ2 (рисунок 13). Для  $l_K/b < 1$  ВЗ1 и ВЗ2 сливаются в одну. При  $l_K/b > 1$  ВЗ разделяются и существенно зависят от  $l_K/b$ . Для исследованного диапазона  $l_K/b < 15$  очертания ВЗ стремятся к очертаниям в одиночном колене.



**Рисунок 13** - Очертания вихревых зон: а) – первой ВЗ (ВЗ1); б) – второй ВЗ (ВЗ2)

С использованием найденных очертаний, построены и исследованы компьютерные модели профилированных П-образных колен для  $l_K/b = 0,5 \div 7$  – определена зависимость для КМС  $\zeta_{\Sigma \text{проф}}$  от  $l_K/b$  (рисунок 14). Видно, что эффект профилирования  $\Delta \zeta \approx 57\%$ , и  $\zeta_{\Sigma \text{проф}}$  стремится к  $2\zeta_{0 \text{проф}}$ , а  $\psi$  стремится к 1, но на исследованном диапазоне  $l_K/b$  не достигает 1.



**Рисунок 14** - Зависимость КМС профилированного П-образного колена от  $l_K/b$

**В шестой главе** представлены результаты практического применения разработанных в ходе исследования зависимостей и конструкций.

Разработанные конструкции профилированных колен на  $90^\circ$  (рисунок 15), наряду с профилированием и скруглением других фасонных элементов, использованы при проектировании и конструировании основных 15 приточно-вытяжных систем вентиляции офисного центра класса энергоэффективности «А» «URBAN». Получено снижение их сопротивления в среднем на 32%, что позволило уменьшить типоразмеры приточно-вытяжных установок и снизило стоимость закупки оборудования на 1,1 млн. руб. Общее снижение потребляемой мощности установок составило 37,7 кВт, что позволяет снизить затраты на оплату электроэнергии на 425,9 тыс. руб./год.



**Рисунок 15** - Усовершенствованное профилированное L-образное колено системы ПВ5

Для удобства использования результатов исследования разработаны модули в «Онлайн калькулятор» по расчету сопротивления отводов, которые внедрены в учебный процесс и в реальное проектирование.

Найденные зависимости для коэффициентов влияния позволяют при аэродинамическом расчете в зависимости от расстояния между последовательно идущими коленами определить необходимость использования КМС узла или КМС двух изолированных колен.

Зависимости для длин зон влияния могут использоваться для более точного определения мест установки устройств для измерения скорости, давления и расхода, а также устройств типа регуляторов переменного расхода воздуха.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные итоги исследования.**

1. Выполнен аналитический обзор исследований внутренних течений в каналах с коленами и способов повышения энергоэффективности систем вентиляции при транспортировании воздуха, использованный для валидации

результатов исследований по определению коэффициентов местных сопротивлений, очертаний зон отрыва и длин зон влияния.

2. Разработаны «численные схемы» компьютерного моделирования с использованием методов ВГД для течений в L-, Z- и П-образных коленах систем вентиляции. Проведена их валидация и верификация. Для всех задач выбрана стационарная постановка. Для одиночного колена принята «стандартная» модель турбулентности SKE со «стандартным» пристеночным моделированием SWF. В Z- и П-образном коленах - модель турбулентности SKE в сочетании с EWT, поскольку расширенное пристеночное моделирование позволяет лучше разрешать сложные течения. В качестве ГУ выбраны равномерный профиль скорости на входе в канал и избыточное давление, равное 0 на выходе, остальные границы – твердая стенка. В качестве НУ - кинетическая энергия турбулентности  $k = 1 \text{ м}^2/\text{с}^2$  и ее диссипация  $\epsilon = 1 \text{ м}^3/\text{с}^2$ .

3. Посредством численного моделирования получены новые результаты по КМС – расширен диапазон размеров L-образных колен для  $b_1/b_0$  от 0,2 до 3, Z-образных колен для  $l'_k/b$  до 35, П-образных колен для  $l_k/b$  до 15, данные по сопротивлению которых отсутствуют в известных справочниках. Найдены зависимости для определения очертания вихревых зон, длин зон влияния до и после возмущающего элемента и коэффициента местного сопротивления в «острых» одиночных и сдвоенных коленах для широкого диапазона размеров.

4. Разработаны компьютерные модели энергоэффективных колен и их узлов для широкого диапазона размеров, в которых за счет профилирования – исключения вихревой зоны во внутреннем углу колен существенно снижается их сопротивление (от 31,7% до 80%) и определены зоны их влияния.

5. Экспериментально подтверждены результаты численного исследования по определению очертаний вихревых зон и сопротивлений непрофилированных и профилированных колен.

6. Найдены коэффициенты взаимного влияния колен в узле, которые позволяют определить, как рассматривать данный возмущающий элемент и правильно определять его КМС. Найдено критическое расстояние 15 калибров ( $b$ ) для Z- и П-образного колен более которого можно рассматривать колена в узле, как самостоятельные фасонные детали.

7. Для упрощения расчета КМС «острых» и профилированных колен в L-, Z- и П-образных конфигурациях, разработаны модули для программы «Онлайн-расчеты КМС», которые позволяют рассчитать коэффициент местного сопротивления для аэродинамического расчета, задав геометрические параметры колена и расход, протекающий через него, не используя графические и аппроксимационные зависимости.

Предлагаются следующие **рекомендации** по использованию основных результатов работы:

1. В целях повышения энергоэффективности систем вентиляции, путем сокращения эксплуатационных затрат на электроэнергию и капитальных затрат на закупку вентиляционного оборудования, использовать в системах воздуховодов усовершенствованные конструкции колен. Для нового строительства применять изготовленные на заводе-изготовителе профилированные фасонные детали, в рамках реконструкции – профилирующие вставки, изготовленные на заказ.

2. Для расчета КМС «острых» и профилированных колен использовать графические зависимости, представленные в работе, или пользоваться программой «Онлайн-расчеты КМС», находящейся в свободном доступе в сети Интернет.

3. При расстоянии менее  $10b$  для Z-образного колена и  $15b$  П-конфигурации между коленами при расчете КМС узла использовать разработанные в работе зависимости или их реализацию в виде «Онлайн калькулятора».

4. При проведении измерений, выборе места установки контрольно-измерительных приборов, мерных сечений, воздухораспределителей и др. возмущающих элементов использовать данные о длинах зон влияния, представленные в работе.

**Перспективы дальнейшей разработки темы** состоят в расширении разнообразия новых конструкций энергоэффективных фасонных деталей и их узлов сложной геометрии в том числе разноплоскостных Z-образных колен; исследовании и разработке универсального очертания для профилирования одиночных и сдвоенных колен; подготовке BIM моделей для проектирования усовершенствованных L-, Z- и П-образных колен на платформе Autodesk Revit.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

*В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ*

1. *Зиганшин А. М.* Снижение потерь давления при профилировании острого отвода и отвода с нишей / *А. М. Зиганшин, Е. Э. Беляева, В.В. Соколов* // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2017. - №1.-С.108-116.
2. *Зиганшин А. М.* Численное исследование течения в П-образном отводе и снижение его сопротивления / *А. М. Зиганшин, А. О. Озеров, Е. Э. Солодова* // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2019. - №1.-С.82-93.

3. **Солодова Е. Э.** Особенности численного моделирования течений в Z-образных отводах систем вентиляции и кондиционирования зданий и сооружений / Е. Э. Солодова // Известия Казанского Государственного Архитектурно-Строительного Университета.-2021. - №1.-С.71-84.

*В изданиях, индексируемых в базе данных Scopus*

4. **Ziganshin A. M.** Decrease of pressure losses in elbow fittings of ventilation systems of thermal power plant buildings [Текст] / A. M. Ziganshin, **Е. Е. Belyaeva**, K. I. Logachev, O. A. Averkova // Conference Series: Earth and Enviromental Science 288 (2019) 012133.
5. **Ziganshin A. M.** Numerical simulation of a z-shaped ventilation elbow and reduction of its resistance [Текст] / A. M. Ziganshin, **Е. Е. Solodova**, K. I. Logachev // Conf. Series: Materials Science and Engineering 890 (2020) 012146 doi:10.1088/1757-899X/890/1/012146.

*В сборниках трудов конференций*

6. **Беляева Е.Э.** Численное определение сопротивления плоского отвода для широкого диапазона изменения размеров / Е.Э. Беляева, А.М. Зиганшин // Материалы III международной конференции (IX Всероссийской конференции) «Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконстракции «НАСКР – 2016»» 23-24 ноября. Чебоксары: ЧувГУ, 2016. С. 464-469.
7. **Беляева Е. Э.** Численное определение вихревых зон при срыве потока с внутренней кромки острого отвода / Е. Э. Беляева, А. М. Зиганшин, Т. Ф. Шамсутдинов // Материалы Ежегодной научной сессии аспирантов и молодых учёных 24-25 ноября. Вологда: ВоГУ, 2016.
8. **Беляева Е. Э.** Численное моделирование течения в канале с острым отводом для широкого диапазона изменения размеров / Е. Э. Беляева, А. М. Зиганшин // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии в промышленности: образование, наука и производство» 16 декабря. Стерлитамак: УГНТУ, 2016. С. 205-206.
9. **Беляева Е. Э.** Численное моделирование течения в канале с профилированным отводом для широкого диапазона изменения размеров / Е. Э. Беляева, А. М. Зиганшин // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Всероссийской научно - практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. Екатеринбург: УрФу, 2016. С. 81-84.

10. **Беляева Е.Э.** Снижение потерь давления при профилировании острого отвода для широкого диапазона изменения размеров / Е. Э. Беляева // Тезисы докладов 69-ой Международной научной конференции. Казань: КГАСУ, 2017. С. 209.
11. **Беляева Е.Э.** Численное определение вихревых зон и зон влияния острого отвода / Е. Э. Беляева, А. М. Зиганшин // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды. XV международная научная конференция 19-29 сентября. Волгоград: ВолгГТУ, 2017. С. 276-281.
12. **Беляева Е.Э.** Повышение энергоэффективности вентиляции: профилирование фасонных деталей, новая методика расчёта тепlopоступлений / Е. Э. Беляева // Сборник тезисов участников форума «Наука будущего - наука молодых». НН: ННГУ, 2017. С. 348-349.
13. **Беляева Е. Э.** Разработка и исследование энергоэффективных вентиляционных отводов с использованием численного 3D-моделирования / Е. Э. Беляева, А. М. Зиганшин // Перспективы развития строительного комплекса. XI Международная научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов «Перспективы социально-экономического развития стран и регионов» 24-25 октября. Астрахань: АГАСУ, 2017. С. 89-93.
14. **Беляева Е. Э.** Экспериментальное определение коэффициента местного сопротивления (кмс) острых и энергоэффективных отводов под углом 90° / Е. Э. Беляева, А. М. Зиганшин // Материалы студенческой научно-практической конференции «Актуальные вопросы теплогазоснабжения и вентиляции» 12 апреля. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. С. 18-22.
15. **Беляева Е. Э.** Экспериментальное определение КМС «острого» и профилированного отводов / Е. Э. Беляева // Тезисы докладов 70-ой Международной научной конференции. Казань: КГАСУ, 2018. С. 258-259.
16. **Солодова Е.Э.** Численное исследование потока воздуха в двухмерном прямоугольном канале с Z-образным «острым» отводом / Е. Э. Солодова // Тезисы докладов 71-ой Международной научной конференции. Казань: КГАСУ, 2019. С. 250.
17. **Зиганшин А. М.** Валидация численного решения задачи о течении в Z-образном отводе / А. М. Зиганшин, **Е. Э. Солодова** // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : материалы XVIII Международной научной конференции, 25–29 сентября 2020 г., г. Москва / М-во строительства и ЖКХ РФ, НИИ Строит. физики РААСН, НИУ Моск. Гос. Строт. Ун-т, Нижневолжское представительство ЮТО РААСН, Фонд Ромуальдо Дель Бьянко, НИУ Моск. гос.строит. ун-т : [сост. А.Н. Гвоздков]. Волгоград : Изд-во ВолгГМУ, 2020. С. 248-255.

*В иных изданиях*

18. *Бадыкова Л. Н.* Испытание установки для исследования энергоэффективных фасонных деталей / Л. Н. Бадыкова, **Е. Э. Беляева**, Г. А. Гимадиева // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. - 2017. - №4.-С. 25-34.

*Объекты интеллектуальной собственности*

19. Свид. 2020614938 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Онлайн-расчеты КМС: энергоэффективные отводы / А.М. Зиганшин, **Е.Э. Солодова**, А.О. Озеров; заявитель и правообладатель А.М. Зиганшин (RU); заявл. 24.03.20; опубл. 29.04.20, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.
20. Свид. 2022615646 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. «Онлайн-расчеты КМС: энергоэффективный Z-отвод» / А.М. Зиганшин, **Е.Э. Солодова**; заявитель и правообладатель А.М. Зиганшин (RU); заявл. 21.02.22; опубл. 01.04.22, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

**СОЛОДОВА ЕВГЕНИЯ ЭДУАРДОВНА**

**РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ КОЛЕН И ИХ УЗЛОВ ДЛЯ  
СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ МЕТОДОМ ПРОФИЛИРОВАНИЯ,  
ИСКЛЮЧАЮЩИМ ПОЯВЛЕНИЕ ВИХРЕВЫХ ЗОН**

Специальность 2.1.3 - Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование  
воздуха, газоснабжение и освещение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 21.10.22 г. Формат 60×84/16  
Усл. печ. л. 1,44 Тираж 100 экз. Заказ №2

Отпечатано в КГАСУ  
420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1