



УДК 697.922.26.001.24

**Зиганшин Арслан Маликович**

кандидат технических наук, доцент

Email: amziganshin@kgasu.ru

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

**Сафиуллина Гузель Рамилевна**

инженер-проектировщик ОВиКВ

Email: grsafiullina@mail.ru

**ООО «Метрополис»**

Адрес организации: 129085, Россия, г. Москва, ул. Годовикова, д. 9, стр. 5

**Ермина Светлана Владимировна**

помощник инженера ПТО

Email: svetlana\_ev99@mail.ru

**ООО «ВТ Стройинжиниринг»**

Адрес организации: 420036, Россия, г. Казань, ул. Копылова, д. 1/2

**Гайфуллин Амир Айратович**

инженер вентиляционных систем

Email: gaifullin2546@mail.ru

**ООО «РЭУ Сфера»**

Адрес организации: 420073, Россия, г. Казань, ул. Гастелло, д. 20

### **Валидация компьютерной модели течения в вытяжном и приточном симметричных вентиляционных тройниках**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Большое количество энергии в системах вентиляции затрачивается на преодоление сопротивления в фасонных элементах и элементах, связанных с вихреобразованием в них. Устранение вихреобразования возможно путем профилирования по очертаниям вихревых зон. Их определение наиболее рационально проводить путем численного моделирования. Целью работы является проведение валидации численной модели путем сравнения получаемых численных результатов с экспериментальными или аналитическими данными как по сопротивлению, так и по очертаниям вихревых зон при решении тестовой задачи.

*Результаты.* В статье приводятся результаты настройки компьютерной модели течения воздуха в вытяжном и приточном симметричном вентиляционном тройнике, путем сравнения получающихся результатов с данными других исследователей и собственным экспериментом. Определяются значения коэффициентов местного сопротивления и очертания вихревых зон при разном сочетании наиболее универсальных и используемых при моделировании течений в каналах моделей турбулентности и способов пристеночного моделирования. В результате показано, что наиболее близкие к известным данным, показывают сочетание «стандартной»  $k-\varepsilon$  модели с «расширенным пристеночным моделированием».

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной области состоит в использовании для исследования течения воздуха в вентиляционных симметричных тройниках валидированных компьютерных моделей. Подробное исследование таких течений позволит, в том числе снизить энергопотребление систем вентиляции строящихся и реконструируемых зданий за счет снижения вихреобразования в таких фасонных элементах как симметричный тройник.

**Ключевые слова:** вентиляция, симметричный тройник, вихревые зоны, энергосбережение, снижение потерь давления, вычислительная гидродинамика, эксперимент.

**Для цитирования:** Зиганшин А. М., Сафиуллина Г. Р., Еремина С. В., Гайфуллин А. А. Валидация компьютерной модели течения в вытяжном и приточном симметричных вентиляционных тройниках // Известия КГАСУ. 2021. № 1 (55). С. 58–70. DOI: 10.52409/20731523\_2021\_1\_58.

## 1. Введение

Для сетей воздуховодов систем вентиляции и кондиционирования воздуха характерно наличие большого количества фасонных деталей: отводов, тройников, конфузоров и т.п. При этом в отличие от систем отопления в них происходят наибольшие потери энергии, связанные с деформацией течения и образованием отрывных зон. При проектировании этих систем проводится аэродинамический расчет, целью которого является также и определение потерь давления всей системы для подбора вентиляторных агрегатов. Для проведения качественного аэродинамического расчета и определения падения давления в конкретных фасонных элементах вентиляционной сети используют значения коэффициентов местного сопротивления (КМС), которые обычно получают экспериментальным путем и приводят в справочниках для проектировщиков [1] – в нашей стране, [2-4] – США, [5] – Европе или в специализированных справочниках [6, 7], из которых наибольшее распространение как в нашей стране, так и за рубежом получил «справочник Идельчика» [6]. Даже использование современных технологий проектирования с применением информационного моделирования, как, например, BIM-комплекс Autodesk® Revit при проведении аэродинамических расчетов использует базу данных КМС, практически наполовину состоящую из данных справочника [6]. В [6] сконцентрированы и сгруппированы данные о КМС разного рода элементов, встречающихся в каналах и устройствах различных инженерных систем. В основном данные, содержащиеся в справочнике [1] для проектирования каналов систем вентиляции и кондиционирования воздуха, взяты без изменения из справочника [6]. За рубежом соответствующие базы данных дополняются результатами более новых исследований, например, для отводов [8] и тройников в овальных каналах [9], которые были получены в ходе совместного экспериментального и численного исследования. По тройникам также имеются как более ранние [10], так и более современные исследования [11], в которых экспериментально, аналитически и численно достаточно полно исследованы и определены зависимости для КМС разных конструкций тройников, в том числе и симметричных, которые далее будут использованы при настройке компьютерных моделей в данном исследовании. В то же время данных об очертаниях вихревых зон (ВЗ), возникающих в тройниках, нет.

Поскольку тройники разной конструкции, также как и другие фасонные детали, являются местом существенных потерь давления, имеются работы по усовершенствованию их конструкции с целью уменьшения КМС. В [6] приведены данные о конструкциях тройников с острыми кромками скругленными по дуге окружности, сопротивление которых зависит от радиуса скругления  $R_r$  и для большого радиуса  $R_r = 1,5$  сопротивление существенно ниже стандартного на величину около 75 %. Однако существенным недостатком такого способа является то, что получаемая при этом фасонная деталь при встраивании в сеть увеличивает ее габариты, например, для  $R_r = 1,5$  и глубины воздуховода 500 мм увеличение составляет около 205 мм, и не позволяет использовать ее в обычно стесненных пространствах для размещения сетей систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Этот факт приводит к тому, что тройники такой конструкции редко используются на практике. Имеется ряд более современных исследований, где совершенствование формы тройников проводится с использованием примеров форм, увиденных в природе: изгибов русел рек [12] и ветвления растений [13] или в результате определения наиболее оптимальной формы путем перебора сочетаний скруглений разных кромок [14]. Такими способами получено снижение сопротивления на величины порядка 30-80 %, но и отмечается невозможность снижения сопротивления на всем диапазоне изменения отношения расхода, протекающего по боковому ответвлению ( $G_B$ ), к расходу в магистрали ( $G_C$ ), причем говорится и о необходимости совершенствования форм тройников с учетом особенностей течения воздуха в них. Также перспективным способом снижения КМС путем совершенствования формы фасонных

деталей является так называемая топологическая оптимизация, где с использованием алгоритмов поиска оптимальной конструкции по заданной целевой функции, чаще всего – минимальному сопротивлению [15, 16] производится определение формы фасонного элемента. На существующем этапе развития этого направления, получающиеся в итоге оптимизации конструкция и форма фасонного элемента, такие, что их производство возможно лишь с использованием аддитивных технологий, а это существенно повышает их стоимость и делает невозможным применение в системах вентиляции зданий.

Кроме скругления кромок к некоторому снижению КМС может приводить и использование направляющих лопаток [17, 18], профилирующих вставок с очертаниями по различным профилям: эллипсу, элементам обтекателей автомобилей и самолетов [19]. Однако введение дополнительных элементов усложняет конструкцию, а значит также приводит к удорожанию их производства. В то же время имеются примеры использования способа, при котором для совершенствования формы фасонного элемента используются очертания вихревых зон, возникающие в стандартной непрофилированной конструкции фасонного элемента [20]. При этом на современном уровне технологии, с использованием станков для раскройки металла с ЧПУ не усложняется конструкция изготовления, а также не увеличиваются габариты системы. С использованием этого способа получено снижение сопротивления различных фасонных элементов – отводов одиночных [21, 22], в П-образной [23] и Z-образной конфигурации [24], всасывающих отверстий [25-27], а также несимметричных тройников [21]. Результаты по снижению сопротивления, полученные численно, подтверждены проведенными экспериментами. Однако для симметричных тройников таких исследований не проводилось. Наиболее рационально проводить такие исследования численно. Поэтому целью работы является разработка компьютерной модели для исследования течения в симметричном вытяжном и приточном тройниках для определения КМС и очертаний вихревых зон, а также проверка получаемых результатов при сравнении с данными других авторов и собственным экспериментом.

## 2. Методы исследования

Компьютерное моделирование проводится с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD), реализованных в программном комплексе ANSYS® Fluent. Задача решается в турбулентной, стационарной, двухмерной постановке. На первом этапе проводилось построение геометрии расчетной области и сетки в препроцессоре Gambit, расчетная сетка – структурированная с ячейками размерами  $b/4$ , где  $b = 0,1$  м – ширина канала (рис. 1).

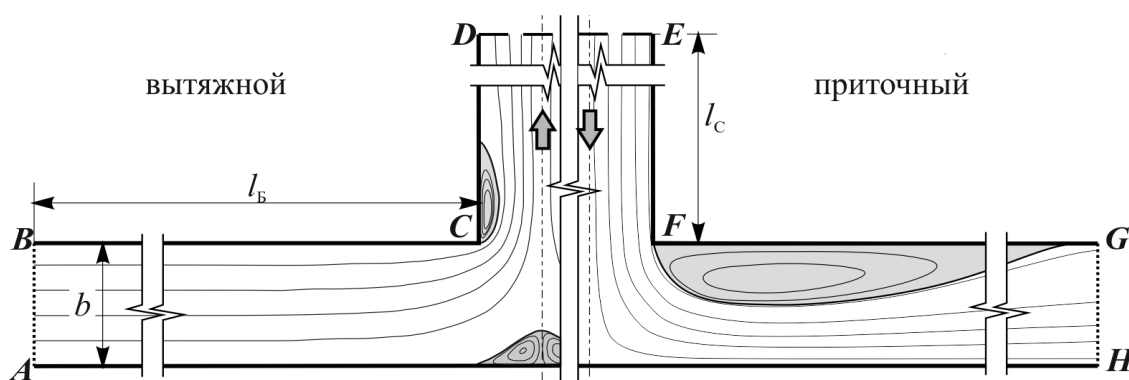


Рис. 1. Геометрия расчетной области и характерная картина течения – линии тока (иллюстрация авторов)

На рис. 1 в левой части показана симметричная половина вытяжного тройника, а в правой – приточного. Длины каналов приняты достаточными для обеспечения выравнивания полей скорости и давления в каналах и устранения влияния граничных условий на течение в тройнике. Граничные условия (ГУ) и длины каналов, соответствующие моделям вытяжных и приточных тройников, приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Размеры расчетной области и граничные условия для моделей тройников

| Параметр                                         | Вытяжной                             | Приточный                            |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Безразмерная длина боковых каналов $l_b/b$       | 20                                   | 80                                   |
| Безразмерная длина магистрального канала $l_c/b$ | 80                                   | 20                                   |
| ГУ на <b>AB</b> и <b>GH</b>                      | «pressure inlet»:<br>$\Delta p = 0$  | «pressure outlet»:<br>$\Delta p = 0$ |
| ГУ на <b>DE</b>                                  | «velocity inlet»:<br>$v_0 = -40$ м/с | «velocity inlet»:<br>$v_0 = 40$ м/с  |
| ГУ на <b>BCD</b> , <b>EFG</b> , <b>AH</b>        | «wall»                               | «wall»                               |

При верификации численного решения проводится исследование на сеточную зависимость для нескольких сочетаний моделей турбулентности и способов пристеночного моделирования. Используются модели турбулентности, которые считаются наиболее универсальными – «стандартная»  $k-\varepsilon$  (SKE), «стандартная»  $k-\omega$  (SKO), «рейнولدсовых напряжений» (RSM). А для моделирования пристеночного течения, что важно для течений в каналах, используется два способа пристеночного моделирования – «стандартные пристеночные функции» (SWF) и расширенное пристеночное моделирование (EWT). Исследование на сеточную зависимость заключается в решении ряда задач с последовательно измельчаемой расчетной сеткой – адаптацией. Первые несколько этапов адаптации, до достижения безразмерного параметра  $y^*$  (для SWF) или  $y^+$  (для EWT) значений порядка 30 [28], проводится для всей расчетной области, а затем вдоль твердых границ для лучшего разрешения расчетной сеткой области пограничного слоя. По итогам решения каждой задачи определяется значение КМС, которое определяется из анализа распределения полного давления по длине каналов.

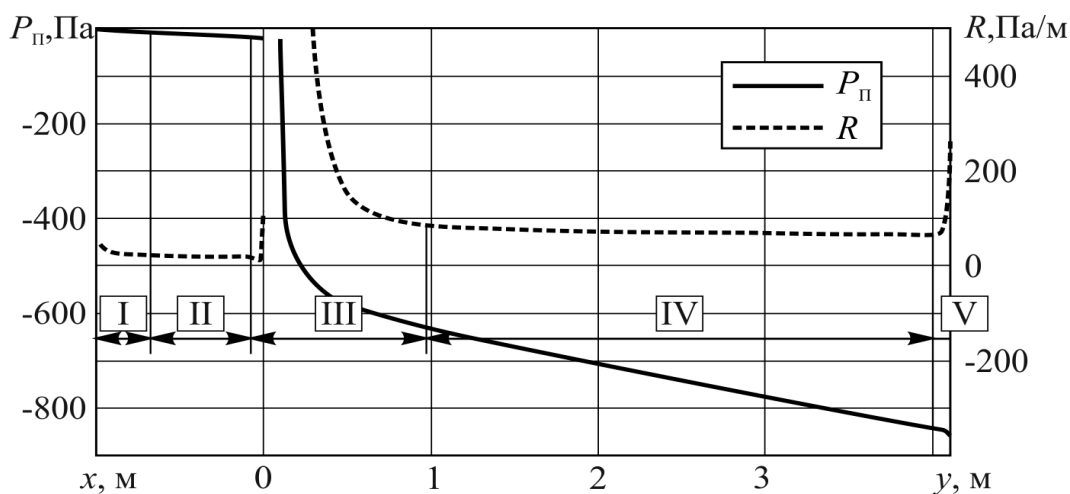


Рис. 2. Распределение полного давления ( $P_p$ , Па) и удельного падения давления ( $R$ , Па/м) по длине каналов вытяжного тройника (иллюстрация авторов)

Как видно на рис. 2 по длине канала можно выделить несколько участков. Участок I ( $-1 < x < -0,675$ ) – начальный, где падение полного давления нелинейно. Это связано с деформацией потока из-за нефизичности наложенных граничных условий – равномерного профиля скорости. Этот участок далее не участвует в определении КМС. Участок II ( $-0,675 < x < -0,1$ ) – падение давления линейно: потери энергии происходят только за счет трения. На участке III ( $-0,1 < x; y < 0,975$ ) падение давления нелинейно – кроме трения в канале происходят потери энергии, связанные с деформацией потока из-за возмущений, вносимых тройником. Причем эти деформации начинаются на некотором расстоянии до тройника ( $.. = 1$ ) и продолжают далеко вниз по потоку ( $l_{\text{после}}^{3B}/b = 9,75$ ) – так называемые зоны влияния (ЗВ) фасонного элемента. Далее снова следует зона линейного падения давления на трение – участок IV ( $0,975 < x < 4$ ) и участок V ( $4 < x < 4,1$ )

нелинейного падения из-за влияния выходного граничного условия, который также не учитывается в расчете. Значение КМС рассчитывается по формуле:

$$\zeta = \frac{P_1 - P_2 - \Delta P_{\text{до}}^{\text{тр}} - \Delta P_{\text{после}}^{\text{тр}}}{\rho v_0^2 / 2}, \quad (1)$$

здесь  $P_1$  – полное давление в начале участка II, Па;  $P_2$  – полное давление в конце участка IV, Па;  $\Delta P_{\text{до}}^{\text{тр}} = R_{\text{до}} \cdot l_{\text{до}}$  и  $\Delta P_{\text{после}}^{\text{тр}} = R_{\text{после}} \cdot l_{\text{после}}$  – потери давления на трение в каналах до тройника и после, Па;  $R_{\text{до}}$  и  $R_{\text{после}}$  – средние значения удельных падений давления на участках линейного изменения давления в каналах до и после тройника (участки II и IV соответственно), Па/м;  $l_{\text{до}}$  и  $l_{\text{после}}$  – длины каналов до и после тройника, за вычетом длин участка I и V соответственно, м (рис. 2), то есть  $l_{\text{до}} = l_{\text{II}}$ ;  $l_{\text{после}} = l_{\text{III}} + l_{\text{IV}}$ .

Для дальнейшей разработки энергоэффективных тройников необходимо знать очертания вихревых зон (ВЗ). При численном решении очертания ВЗ определяются как линия тока, ограничивающая вихревую зону от основного течения. Для этого на выходной границе строится распределение функций тока и определяется значение функции тока соответствующее самой крайней линии тока выходящей из расчетной области. Это позволяет, с точностью до размеров пристеночной ячейки (около 0,1 мм), определить положение и координаты очертаний ВЗ.

Экспериментальная проверка результатов, получаемых численно, проводится на лабораторной установке [29], скорректированной для проведения исследования тройника в симметричной постановке (рис. 3). На одной схеме показаны два варианта конструкции установки, собранной в режиме вытяжки и в режиме притока. Соответствующие обозначения в режиме притока – штриховой линией, а в режиме вытяжки или в обоих режимах – сплошной.

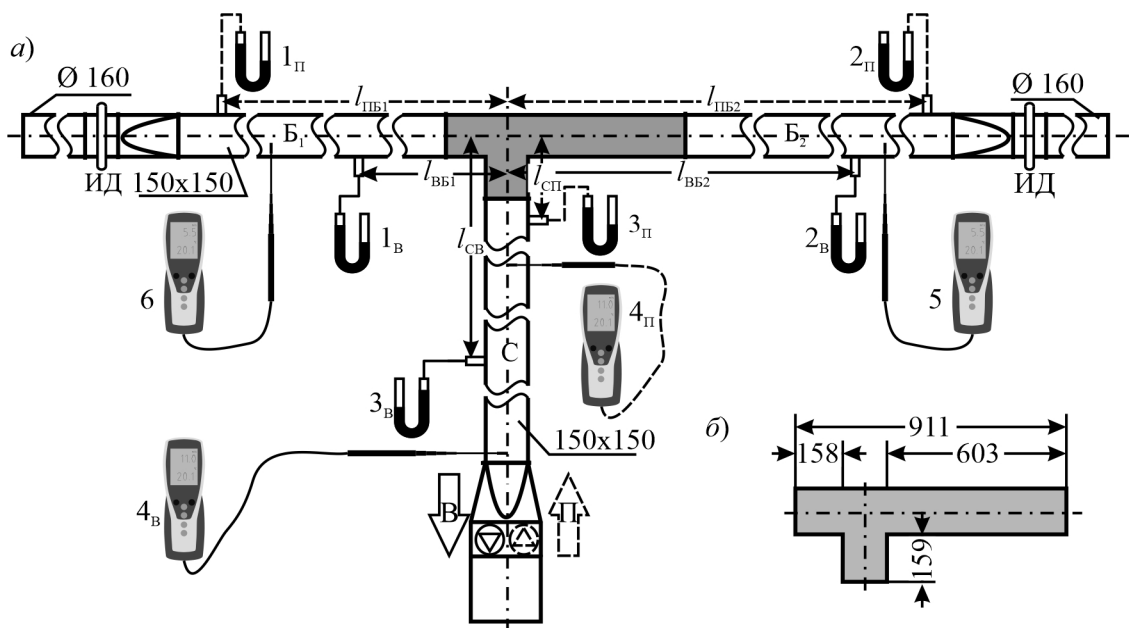


Рис. 3. Схема экспериментальной установки (а), размеры исследуемого участка (б)  
(иллюстрация авторов)

Измерения скорости производилось в точках № 1, 2 и 3 при помощи термоанемометра Testo 425. Измерения давлений производились в точках № 4, 5 и 6 при помощи микроманометра Testo 521-3. На рис. 3 индексом «П» отмечены точки замера для установки собранной в режиме притока, а индексом «В» – в режиме вытяжки, без индекса – использовались в обоих режимах. Каждый замер ( $x_i$ ) производится в течение не менее 30 с, с частотой замеров 2/с, и далее осредняется внутренним алгоритмом термоанемометра. Такие замеры проводятся в каждой точке не менее 4-х раз. По

результатам 3-х замеров определяется размах вариационного ряда  $R|_3$ , как разность максимального  $x_{max}$  и минимального  $x_{min}$  значения измеренной величины. Если 4-й замер попадает в интервал  $R|_3$ , а относительный размах  $\bar{R}|_4 = 100\% \cdot R|_4 / \bar{X}$  не превышает 15 %,

где  $\bar{X} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_i$  – среднеарифметическое из 4-х замеров, то замеры в этой точке

прекращаются, а за окончательное значение принимается величина  $\bar{X}$ . В противном случае замеры продолжаются до выполнения условия попадания измеряемой величины в текущий интервал размаха вариационного ряда:  $x_i \in \bar{R}|_n$ , причем интервал значений замеров проверяется на условие  $\bar{R}|_n = 100\% \cdot R|_n / \bar{X} \leq 15\%$ , и если оно перестает выполняться, то максимальное и минимальное значение проверяются на наличие грубой погрешности (промаха) с использованием критерия Романовского [30], который по сути аналогичен критерию Граббса, рекомендуемому стандартом<sup>1</sup>, но в отличие от него исключает из расчетов среднеквадратического отклонения  $S$ , а также интервала размаха  $R$  сомнительное значение, которое проверяется на грубую погрешность, что, по-видимому, более логично. Кроме того, как это указано в ГОСТ<sup>1</sup> критерий Граббса используется для измеряемых величин имеющих нормальное распределение. При измерении скорости или давления в одной точке, предполагается равномерное распределение замеров, что лучше учитывается использованием величины центра размаха в качестве оценки центра распределения:  $\bar{X}_R = 0,5 \cdot (x_{max} + x_{min})$ , вместо среднеарифметического в критерии Граббса. Таким образом, наличие грубой погрешности подтверждается, если выполняются следующие неравенства:

- для минимального ( $x_{min}$ ):

$$|x_{min} - \bar{X}_R| \geq t_p \cdot S, \quad (2)$$

- для максимального значения измеренной величины ( $x_{max}$ ):

$$|x_{max} - \bar{X}_R| \geq t_p \cdot S, \quad (3)$$

где  $t_p$  – коэффициент Стьюдента при доверительной вероятности  $P = 0,95$  и числе степеней свободы  $k=n-1$  – число замеров за вычетом сомнительного замера, проверяемого на грубую погрешность;  $S$  – среднеквадратическое отклонение результатов наблюдений (также как и  $\bar{X}_R$ , определяемое без учета сомнительной величины). В случае если неравенства (2) или/и (3) выполняются, то соответствующие измерения признаются промахами и исключаются из рассмотрения и если общее количество измерений становится меньше четырех, проводятся дополнительные измерения.

Кроме того, проводится контроль выполнения закона сохранения массы по выполнению условия: сумма расходов по ветвям тройника отличается не более чем на 10 % от расхода в магистральном канале  $|(L_{лев} + L_{пр}) - L_M| \cdot 100 \% \leq 10 \%$  и величина относительного среднеквадратического отклонения результатов измерения

$\bar{\sigma} = \sigma / \bar{X} = \sqrt{\sum (x_i - \bar{X})^2 / (n-1)} \cdot 100\% \leq 5\%$ . Искомое значение КМС вычислялось по формуле (4), где значение потерь давления в соответствующих прямых участках воздухопроводов находилось по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P = \frac{\lambda \cdot l}{D_r} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – коэффициент трения вычисляемый по формуле Блазиуса [29],  $l$  – длина соответствующего канала, м,  $D_r = 2AB/A+B$  – гидравлический диаметр воздуховода, м,  $\rho = 353/(273,15 + t)$  – плотность воздуха при текущей температуре воздуха в воздуховоде  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ,  $v$  – скорость воздуха в соответствующем канале, м/с.

Значение КМС далее определяется по формуле (1), где соответствующие длины каналов приведены в табл. 2.

<sup>1</sup>ГОСТ Р 8.736-2011 ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения

Таблица 2

## Длины каналов в эксперименте

| Параметр                                     | Вытяжной                           | Приточный                            |
|----------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Длины каналов до тройника $l_{до}$ , м       | $l_{ВБ1} = 1,15$ ; $l_{ВБ2} = 2,1$ | $l_{СП} = 0,359$                     |
| Длина каналов после тройника $l_{после}$ , м | $l_{СВ} = 1,22$                    | $l_{ПБ1} = 1,242$ ; $l_{ПБ2} = 2,47$ |

Визуализация отрывной зоны проводится с использованием модифицированного метода «нагретой нити» – генератор пара представляет собой цилиндрическую спираль диаметром 5 мм и длиной около 5 см, свернутую из нихромовой проволоки диаметром 0,8 мм. Внутрь спирали установлена ватная вставка, которая пропитывается глицерином. Длина нихромовой проволоки рассчитана таким образом, чтобы при подаче на нее постоянного тока напряжением 12 В, спираль разогревалась до температуры кипения глицерина. Генератор на штанге вносится в поток вблизи точки отрыва и струя белого пара визуализирует начальную область очертания вихревой зоны.

## 3. Результаты и обсуждение

Численные исследования – тестирование моделей (валидация) и исследование на сеточную зависимость (верификация) совмещались путем анализа графика изменения КМС при измельчении расчетной сетки для разных сочетаний моделей турбулентности и пристеночного моделирования (рис. 4а) при одном отношении расходов воздуха протекающего по ветвям тройника  $L_{лев} / L_M = 0,5$ . Размер ячеек сетки характеризуется безразмерным параметром  $y^*$  (для SWF) или  $y^+$  (для EWT). На рис. 4б показаны и соответствующие изменения очертаний вихревых зон – при измельчении сетки и для разного сочетания моделей. Также на рис. 4а для сравнения приведены значения КМС известные из других источников – справочника [6] (Идельчик), экспериментов Gardel [10] и Ito, Imai приведенные в статье [11].

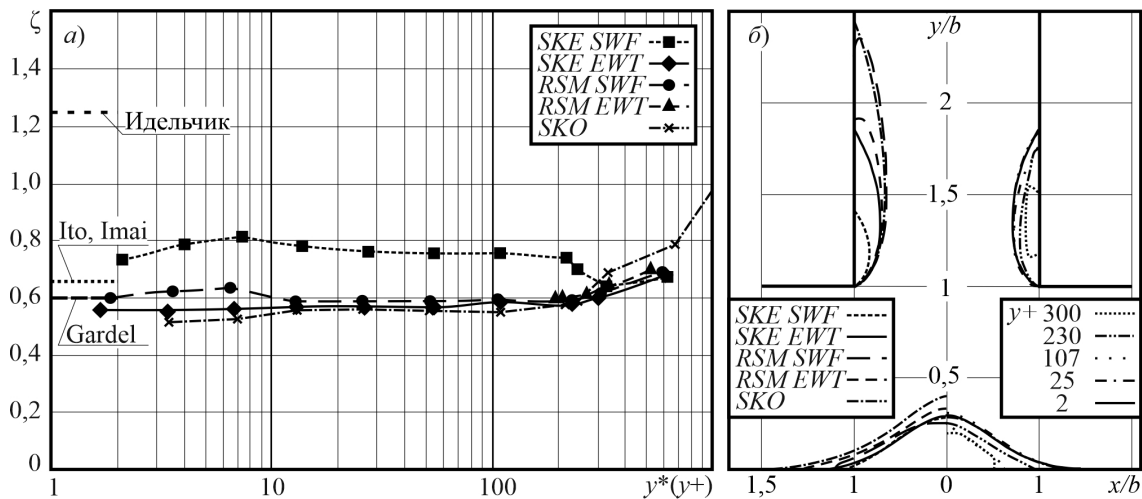


Рис. 4. Исследования на сеточную зависимость течения в вытяжном тройнике:  
а) изменение коэффициента местного сопротивления; б) изменение очертаний вихревых зон  
(иллюстрация авторов)

Как видно из рис. 4а, все сочетания моделей показывают хорошие результаты при исследовании на сеточную сходимость – значения КМС практически перестают изменяться при сетках, для которых  $y^*$  ( $y^+$ )  $< 100$  и только сочетание SKE SWF при  $y^* < 10$  начинает существенно меняться. Причем по значениям КМС нужно отметить, что в данном случае значения по данным справочника Идельчика существенно отличаются от данных двух других экспериментов, которые проводились в разное время и в разных странах и между собой отличаются несущественно. Как указано в справочнике Идельчика эти значения приведены для чугунных и сварных тройников, что по-видимому существенно увеличивает значение КМС. Наиболее близкие к этим данным показывает

численное моделирование с использованием сочетаний SKE EWT и RSM SWF. Но при анализе очертаний вихревых зон (ВЗ) видно (левая половина рис. 46), что сочетания с использованием модели турбулентности «Рейнольдсовых напряжений» (RSM) имеют нефизичную форму в области замыкания ВЗ на стенке канала.

Поэтому для дальнейшего моделирования принимается сочетание моделей SKE EWT. И для этого сочетания построены очертания ВЗ на разных этапах адаптации расчетной сетки (правая половина рис. 46). Здесь также видно, что очертания ВЗ существенно различаются на грубой сетке  $y^+ > 100$ , а для меньших значений, и отличие меньше, а при  $y^+ < 10$  сливаются в одну.

При численном моделировании приточного тройника аналогично проводится исследование на сеточную зависимость при найденном ранее сочетании моделей SKE EWT и при достижении независимости решения от размеров ячейки определяется значение КМС. В табл. 3 приведена сводка данных о КМС вытяжного и приточного симметричных тройников найденных численно и экспериментально, а также из других источников и отличие КМС, найденного численно от значений из других источников.

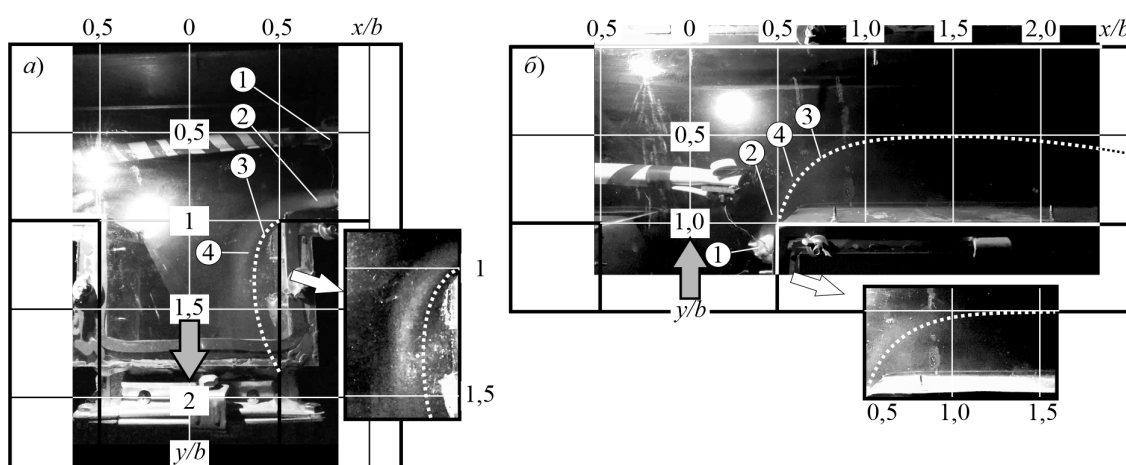
Таблица 3

Сравнение значений коэффициентов местных сопротивлений

| Источник                 | Вытяжной |            | Приточный |            |
|--------------------------|----------|------------|-----------|------------|
|                          | $\zeta$  | Отличие, % | $\zeta$   | Отличие, % |
| Идельчик [6]             | 1,25     | 115,5      | 1,075     | 92,3       |
| Gardel [10]              | 0,602    | 3,8        | 1,003     | 79,4       |
| Ito, Imai из статьи [11] | 0,654    | 12,7       | –         | –          |
| Basset [11]              | –        | –          | 0,867     | 55,1       |
| Эксперимент              | 0,494    | 14,8       | 0,644     | 15,2       |
| Численно                 | 0,58     | –          | 0,553     | –          |

Видно, что результаты, получаемые численно, достаточно хорошо подтверждаются как собственным экспериментом – отличие 14,8 % и 15,2 % для вытяжного и приточного тройника соответственно, так и данными некоторых других авторов, наихудшее совпадение с данными справочника [6]. Здесь необходимо отметить, на существенное отличие материала и технологию изготовления тройника. В [6] приведены данные для сварных и чугунных тройников.

На рис. 5 приведены результаты численного моделирования и экспериментального определения очертаний ВЗ и их сравнение между собой.

Рис. 5 Сравнение очертаний вихревых зон (ВЗ) при отношении расходов  $G_B/G_C \approx 0,5$ :

а) вытяжной; б) приточный: 1 – генератор пара на штанге; 2 – струя пара;  
3 – очертание ВЗ, найденное численно; 4 – очертание ВЗ экспериментальное  
(иллюстрация авторов)



На рис. 5а-б видны струи пара 2 визуализирующие поток воздуха, срывающийся с острой кромки вытяжного и приточного тройника соответственно. Ее правая граница очерчивает отрывную зону на начальном участке (4). Очертания несколько больше из-за большего соотношения расходов  $G_B/G_C = 0,597$  для вытяжного, и  $G_B/G_C = 0,53$  – для приточного, из-за того, что в эксперименте нельзя точно подобрать необходимое соотношение. Видно хорошее совпадение характера очертаний, найденных численно (3) и экспериментально (4).

Найденное сочетание модели турбулентности  $k$ - $\varepsilon$  «стандартная» и «расширенного пристеночного моделирования» привело к удовлетворительной сходимости результатов как по КМС, так и по очертаниям ВЗ, как с данными собственных экспериментов, так и с результатами других авторов, за исключением данных справочника Идельчика [6], что, по-видимому, связано с тем, что имеющиеся в нем зависимости приведены для сварных и чугунных тройников, хотя они сейчас используются и для расчетов систем вентиляции. При этом возникает существенная погрешность определения сопротивления сети воздухопроводов в большую сторону, что обычно считается «запасом», но такой излишний «запас» приводит к неоправданным затратам электроэнергии. Разработанная компьютерная модель далее будет использоваться для определения КМС и очертаний вихревых зон на всем диапазоне изменения отношения расходов воздуха протекающего по боковому ответвлению к расходу протекающему по магистрали. Найденные очертания далее будут использованы для разработки энергоэффективных профилированных конструкций симметричных тройников, приводящие к снижению энергопотребления систем вентиляции зданий и сооружений.

#### 4. Заключение

В работе приводятся результаты настройки численных моделей вытяжного и приточного симметричного тройника для определения его коэффициента местного сопротивления, а также очертаний вихревых зон.

1. Проведена проверка получаемого численного решения путем сравнения получаемых результатов при измельчении сетки и использовании большого количества сочетаний моделей турбулентности и пристеночного моделирования с известными результатами других авторов и собственным экспериментом.

2. Получена удовлетворительная сходимость результатов при использовании модели турбулентности «стандартная»  $k$ - $\varepsilon$  в сочетании с «расширенным пристеночным моделированием».

#### Список библиографических ссылок

1. Баркалов Б. В., Павлов Н. Н., Амирджанов С. С., Гримитлин М. И., Моор Л. Ф., Позин Г. М., Креймер Б. Н., Рубчинский В. М., Садовская Т. И., Березина Н. И., Бычкова Л. А., Ушомирская А. И., Финкельштейн С. М., Пирумов А. И. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 ч. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 2. М. : Стройиздат, 1992. 416 с.
2. Hvac Systems Duct Design // SMACNA. 4th ed. SMACNA, 2006. 392 p.
3. Brooks P. J., Iacouzze G. L., Talbot T. A. Duct System Design Guide. Groveport : McGill AirFlow Corporation, 2003. 321 p.
4. ASHRAE Handbook-Fundamentals. SI edition. 2017. 1088 p.
5. Eurovent 2/10-1996: Catalogue of energy loss coefficients of air handling components. Paris : Eurovent/Cecomaf, 1996. P. 55.
6. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М. : Машиностроение, 1992. 672 с.
7. Miller D. S. Internal Flow-a Guide to Losses in Pipe and Duct Systems. British Hydromechanics Research Association, 1971. 329 p.
8. Khair S., Idem S. Measurements of Flat Oval Elbow Loss Coefficients // ASHRAE Trans. 2009. Vol. 115[1] S. № 1. P. 35–47.
9. Liu W., Long Z., Chen Q. A procedure for predicting pressure loss coefficients of duct

- fittings using CFD (RP-1493) // HVAC&R Res. 2012. Vol. 18. № 1997. P. 1168–1181. DOI: 10.1080/10789669.2012.713833.
10. Gardel A., Rechsteiner G. F. Les pertes de charge dans les branchements en T des conduites de section circulaire // Bull. Tech. la suisse Rom. 1970. Vol. 96. № 25. P. 363–376.
11. Bassett M. D., Winterbone D. E., Pearson R. J. Calculation of steady flow pressure loss coefficients for pipe junctions // Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci. 2001. Vol. 215. № 8. P. 861–881. DOI: 10.1177/095440620121500801.
12. Gao R., Zhang H., Li A., Liu K., Yu S., Deng B. A novel low-resistance duct tee emulating a river course // Build. Environ. Elsevier, 2018. Vol. 144. June. P. 295–304. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.08.034.
13. Gao R., Liu K., Li A., Fang Z., Yang Z., Cong B. Biomimetic duct tee for reducing the local resistance of a ventilation and air-conditioning system // Build. Environ. 2018. Vol. 129. P. 130–141. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.11.023.
14. Gao R., Fang Z., Li A., Liu K., Yang Z., Cong B. A novel low-resistance tee of ventilation and air conditioning duct based on energy dissipation control // Appl. Therm. Eng. 2018. Vol. 132. P. 790–800. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.12.107.
15. Zhou M., Lian H., Sigmund O., Aage N. Shape morphing and topology optimization of fluid channels by explicit boundary tracking // Int. J. Numer. Methods Fluids. 2018. Vol. 88. № 6. P. 296–313. DOI: 10.1002/flid.4667.
16. Goeke S., Wunsch O. Adjoint based topology optimization of a duct bend // Pamm. 2019. Vol. 19. № 1. P. 2–3. DOI: 10.1002/pamm.201900438.
17. Gao R., Liu K., Li A., Fang Z., Yang Z., Cong B. Study of the shape optimization of a tee guide vane in a ventilation and air-conditioning duct // Build. Environ. Elsevier Ltd, 2018. Vol. 132. P. 345–356. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.02.006.
18. Shopayeva A., Safiullin R. CFD-modeling of flow in confluence nodes of ventilation units of multi-storey buildings // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 890. P. 012157. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012157.
19. Li A., Chen X., Chen L. Numerical investigations on effects of seven drag reduction components in elbow and T-junction close-coupled pipes // Build. Serv. Eng. Res. Technol. 2015. Vol. 36. № 3. P. 295–310. DOI: 10.1177/0143624414541453.
20. Соединительный фасонный элемент с профилирующими вставками : пат. 2604264 Рос. Федерация. №. 2014137755/06 ; заявл. 17.09.14 ; опубл. 10.12.16, Бюл. № 34. 13 с.
21. Зиганшин А. М., Беляева Е. Э., Соколов В. А. Снижение потерь давления при профилировании острого отвода и отвода с нишей // Известия ВУЗов. Строительство. 2017. № 1. С. 108–116.
22. Ziganshin A. M., Beljaeva E. E., Logachev K. I., Averkova O. A. Decrease of pressure losses in elbow fittings of ventilation systems of thermal power plant buildings // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2019. Vol. 288. P. 012133. DOI: 10.1088/1755-1315/288/1/012133.
23. Зиганшин А. М., Озеров А. О., Солодова Е. Э. Численное исследование течения в П-образном отводе и снижение его сопротивления // Известия ВУЗов. Строительство. 2019. № 1. С. 82–93. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-721-1-82-93.
24. Ziganshin A., Solodova E., Logachev K. Numerical simulation of a z-shaped ventilation elbow and reduction of its resistance // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 890. P. 012146. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012146.
25. Зиганшин А. М., Батрова К. Э., Гимадиева Г. А., Логачев К. И., Аверкова О. А. Повышение энергоэффективности систем вентиляции посредством профилирования фасонных элементов // Строительство и техногенная безопасность. 2019. Т. 67. № 15. С. 111–123.
26. Logachev K. I., Ziganshin A. M., Averkova O. A. On the resistance of a round exhaust hood, shaped by outlines of the vortex zones occurring at its inlet // Build. Environ. 2019. Vol. 151. P. 338–347. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.01.039.
27. Ziganshin A. M., Logachev K. I. Minimizing local drag by shaping a flanged slotted hood along the boundaries of vortex zones occurring at inlet // J. Build. Eng. 2020. Vol. 32. P. 101666. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101666.
28. ANSYS® Academic Research Mechanical and CFD, Release 18.2, Help System,

- Coupled Field Analysis Guide, ANSYS, Inc.
29. Бадыкова Л. Н., Беляева Е. Э., Гимадиева Г. А. Испытание установки для исследования энергоэффективных вентиляционных фасонных деталей // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2017. Т. 3. № 4. С. 25–34.
30. Романовский В. И. Применения математической статистики в опытном деле. М.-Л. : Гостехиздат, 1947. 248 с.

**Ziganshin Arslan Malikovich**

candidate of technical sciences, associate professor

Email: amziganshin@kgasu.ru

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Safiullina Guzel' Ramilevna**

HVAC design engineer

Email: grsafiullina@mail.ru

**LTD «Metropolis»**

The organization address: 129085, Russia, Moscow, Godovikov st., 9, bldg. 5

**Eremina Svetlana Vladimirovna**

assistant of technical engineer

Email: svetlana\_ev99@mail.ru

**LTD «VT Strojinzhiniring»**

The organization address: 420036, Russia, Kazan, Kopylov st., 1/2

**Gayfullin Amir Ayratovich**

engineer of ventilation system

Email: gaifullin2546@mail.ru

**LTD «REU Sfera»**

The organization address: 420073, Russia, Kazan, Gastello st., 20

### **Validation of a numerical model of a flow in an exhaust and supply symmetrical ventilation tees**

**Abstract**

*Problem statement.* A large amount of energy in ventilation systems is spent on overcoming resistance in duct fitting elements due to vortex formation. Elimination of vortex formation is possible by shaping along with the outlines of vortex zones and most efficiently carried out by numerical modelling. The aim of the study is a validation of the numerical model, which is carried out by comparing the obtained numerical results with experimental or analytical data, both in resistance and in the outlines of vortex zones when solving a test problem.

*Results.* The article presents the results of setting a numerical model of airflow in the exhaust and supply symmetrical ventilation tee, by comparing the obtained results with the data of other researchers and our experiment. The values of the local drag coefficients and the outlines of vortex zones are determined for a different combination of the most universal models of turbulence and methods of near-wall modelling that are used in modelling flows in channels. The closest results are shown by the combination of the «standard» k-ε model with the «enhanced wall treatments».

*Conclusions.* The developed computer models of the supply and exhaust tee further will be used to numerically determine the local drag coefficient and the outlines of vortex zones for the entire range of variation of the ratio of airflow rates flowing through the side channel to the flow rate in the main channel. The resulting outlines of the vortex zones will be used to develop the energy-efficient shaped tees. Usage of these improved duct fittings will reduce the energy consumption of ventilation systems of buildings and facilities.

**Keywords:** ventilation, symmetrical tee, vortex zones, energy saving, pressure loss reduction, computational fluid dynamics, experiment.

**For citation:** Ziganshin A. M., Safiullina G. R., Eremina S. V., Gayfullin A. A. Validation of a numerical model of a flow in an exhaust and supply symmetrical ventilation tees // *Izvestiya KGASU*. 2021. № 1 (55). P. 58–70. DOI: 10.52409/20731523\_2021\_1\_58.

### References

1. Barkalov B. V., Pavlov N. N., Amirdzhanov S. S., Grititlin M. I., Moor L. F., Pozin G. M., Krejmer B. N., Rubchinskij V. M., Sadovskaja T. I., Berezina N. I., Bychkova L. A., Ushomirskaja A. I., Finkel'shtejn S. M., Pirumov A. I. Internal sanitary facilities. In 3 parts. Part 3. Ventilation and air conditioning. Book. 2. M. : Strojizdat, 1992. 416 p.
2. Hvac Systems Duct Design // SMACNA. 4th ed. SMACNA, 2006. 392 p.
3. Brooks P. J., Iacouzze G. L., Talbot T. A. Duct System Design Guide. Groveport: McGill AirFlow Corporation, 2003. 321 p.
4. ASHRAE Handbook – Fundamentals. SI edition. 2017. 1088 p.
5. Eurovent 2/10-1996: Catalogue of energy loss coefficients of air handling components. Paris: Eurovent/Cecomaf, 1996. P. 55.
6. Idel'chik I. E. Handbook of Hydraulic Resistance. M : Mashinostroenie, 1992. 672 p.
7. Miller D. S. Internal Flow-a Guide to Losses in Pipe and Duct Systems. British Hydromechanics Research Association, 1971. 329 p.
8. Khaire S., Idem S. Measurements of Flat Oval Elbow Loss Coefficients // *ASHRAE Trans.* 2009. Vol. 115[1] S., № 1. P. 35–47.
9. Liu W., Long Z., Chen Q. A procedure for predicting pressure loss coefficients of duct fittings using CFD (RP-1493) // *HVAC&R Res.* 2012. Vol. 18, № 1997. P. 1168–1181. DOI: 10.1080/10789669.2012.713833.
10. Gardel A., Rechsteiner G.F. Les pertes de charge dans les branchements en T des conduites de section circulaire // *Bull. Tech. la suisse Rom.* 1970. Vol. 96, № 25. P. 363–376.
11. Bassett M. D., Winterbone D. E., Pearson R. J. Calculation of steady flow pressure loss coefficients for pipe junctions // *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 2001. Vol. 215, № 8. P. 861–881. DOI: 10.1177/095440620121500801.
12. Gao R., Zhang H., Li A., Liu K., Yu S., Deng B. A novel low-resistance duct tee emulating a river course // *Build. Environ.* Elsevier, 2018. Vol. 144, June. P. 295–304. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.08.034.
13. Gao R., Liu K., Li A., Fang Z., Yang Z., Cong B. Biomimetic duct tee for reducing the local resistance of a ventilation and air-conditioning system // *Build. Environ.* 2018. Vol. 129. P. 130–141. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.11.023.
14. Gao R., Fang Z., Li A., Liu K., Yang Z., Cong B. A novel low-resistance tee of ventilation and air conditioning duct based on energy dissipation control // *Appl. Therm. Eng.* 2018. Vol. 132. P. 790–800. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.12.107.
15. Zhou M., Lian H., Sigmund O., Aage N. Shape morphing and topology optimization of fluid channels by explicit boundary tracking // *Int. J. Numer. Methods Fluids.* 2018. Vol. 88, № 6. P. 296–313. DOI: 10.1002/fld.4667.
16. Goeke S., Wunsch O. Adjoint based topology optimization of a duct bend // *Pamm.* 2019. Vol. 19, № 1. P. 2–3. DOI: 10.1002/pamm.201900438.
17. Gao R., Liu K., Li A., Fang Z., Yang Z., Cong B. Study of the shape optimization of a tee guide vane in a ventilation and air-conditioning duct // *Build. Environ.* Elsevier Ltd, 2018. Vol. 132. P. 345–356. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.02.006.
18. Shopayeva A., Safiullin R. CFD-modeling of flow in confluence nodes of ventilation units of multi-storey buildings // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 890. P. 012157. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012157.
19. Li A., Chen X., Chen L. Numerical investigations on effects of seven drag reduction components in elbow and T-junction close-coupled pipes // *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 2015. Vol. 36, № 3. P. 295–310. DOI: 10.1177/0143624414541453.
20. Connection fitting with profiling inserts : patent 2604264 Rus. Federation. № 2014137755/06 ; decl. 17.09.14 ; publ. 10.12.16, Bull. № 34. 13 p.
21. Ziganshin A. M., Beljaeva E. E., Sokolov V. A. Pressure losses reduction with profiling

- of sharp elbow and elbow with dead-end // *Izvestija VUZov. Stroitel'stvo*. 2017. № 1. P. 108–116.
22. Ziganshin A. M., Beljaeva E. E., Logachev K. I., Averkova O. A. Decrease of pressure losses in elbow fittings of ventilation systems of thermal power plant buildings // *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2019. Vol. 288. P. 012133. DOI: 10.1088/1755-1315/288/1/012133.
23. Ziganshin A. M., Ozerov A. O., Solodova E. E. Numerical study of flow in U-shaped elbow and reduction of its resistance // *Izvestija VUZov. Stroitel'stvo*. 2019. Vol. 1. P. 82–93. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-721-1-82-93.
24. Ziganshin A., Solodova E., Logachev K. Numerical simulation of a z-shaped ventilation elbow and reduction of its resistance // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 890. P. 012146. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012146.
25. Ziganshin A. M., Batrova K. E., Gimadieva G. A., Logachev K. I., Averkova O. A. Increase of energy efficiency of ventilation systems by means of profiling phason elements // *Stroitel'stvo i tehnogennaja bezopasnost'*. 2019. Vol. 67, № 15. P. 111–123.
26. Logachev K. I., Ziganshin A. M., Averkova O. A. On the resistance of a round exhaust hood, shaped by outlines of the vortex zones occurring at its inlet // *Build. Environ.* 2019. Vol. 151. P. 338–347. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.01.039.
27. Ziganshin A. M., Logachev K. I. Minimizing local drag by shaping a flanged slotted hood along the boundaries of vortex zones occurring at inlet // *J. Build. Eng.* 2020. Vol. 32. P. 101666. DOI: 10.1016/j.job.2020.101666.
28. ANSYS® Academic Research Mechanical and CFD, Release 18.2, Help System, Coupled Field Analysis Guide, ANSYS, Inc.
29. Badykova L. N., Beljaeva E. E., Gimadieva G. A. Test run of laboratory installation for research of energy efficient ventilation duct fittings // *Zhilishhnoe hozjajstvo i kommunal'naja infrastruktura*. 2007. Vol. 3, № 4. P. 25–34.
30. Romanovskij V. I. Applications of mathematical statistics in experimental work. M.-L. : Gostehizdat, 1947. 248 p.