

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 697.9

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.257-268

Численное исследование снижения коэффициента местного сопротивления тройника на разделение потока

Юлия Васильевна Елистратова, Илья Валерьевич Крюков,
Дмитрий Сергеевич Гайдаш, Варвара Юрьевна Коверина,
Светлана Сергеевна Юрьева

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);
г. Белгород, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В современном строительстве все большее предпочтение отдается системам вентиляции с механическим побуждением. С учетом высоких потерь давления в фасонных элементах системы вентиляции необходимо совершенствование геометрии их конструкции. Особенно это касается тройников приточной системы вентиляции, в которых происходит разделение потока, приводящее к большим потерям энергии при деформации потока. Цель исследования — численное моделирование течения воздуха в симметричном приточном тройнике квадратного сечения для установления коэффициента местного сопротивления, определение очертаний вихревых зон в месте разделения потока воздуха и коэффициента местного сопротивления оптимизированного приточного тройника, построенного с учетом очертания вихревой зоны в области деформации потока.

Материалы и методы. Определение коэффициента местного сопротивления стандартного симметричного приточного тройника, очертания вихревых зон в месте разделения потока, коэффициента местного сопротивления оптимизированного тройника проводилось с использованием методов вычислительной гидродинамики в программном комплексе COMSOL Multiphysics 5.6. Для численного решения уравнений неразрывности и Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу, применялась «стандартная» k - ϵ модель турбулентности с пристеночными функциями.

Результаты. Установлено значение коэффициентов местного сопротивления стандартного тройника, которое хорошо согласуется с известными данными. По очертаниям вихревой зоны в области деформации потока выполнялись оптимизация геометрии конструкции тройника путем скругления стенки и последующее численное исследование.

Выводы. Выявлено, что изменение конструкции стандартного приточного тройника посредством скругления стенки в области деформации потока позволяет снизить гидравлическое сопротивление на 11,9 %. Результаты исследования представляют научный и практический интерес при разработке оптимизированной конструкции тройника.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вентиляция, энергосбережение в вентиляции, симметричный тройник, оптимизированный тройник, коэффициент местного сопротивления, снижение потерь давления, вычислительная гидродинамика

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ) № 25-29-01023 (URL: <https://rscf.ru/project/25-29-01023/>) с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Елистратова Ю.В., Крюков И.В., Гайдаш Д.С., Коверина В.Ю., Юрьева С.С. Численное исследование снижения коэффициента местного сопротивления тройника на разделение потока // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 2. С. 257–268. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.257-268

Автор, ответственный за переписку: Юлия Васильевна Елистратова, tg.v.info@mail.ru.

Numerical study of the reduction of the local resistance coefficient of a tee for flow separation

Yulia V. Elistratova, Ilya V. Kryukov, Dmitrii S. Gaidash,
Varvara Yu. Koverina, Svetlana S. Iureva

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov);
Belgorod, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In modern construction, mechanical ventilation systems are becoming increasingly popular. Given the high-pressure losses in the shaped elements of ventilation systems, it is necessary to improve their design geometry. This is especially true for supply ventilation system tees, where flow separation occurs, leading to significant energy losses due to flow deformation. The aim of the study is to numerically simulate air flow in a symmetrical square-section supply tee to determine the local resistance coefficient, to determine the contours of vortex zones at the point of air flow separation and the local resistance coefficient of an optimized supply tee constructed taking into account the contour of the vortex zone in the flow deformation area.

Materials and methods. The pressure loss coefficient of a standard symmetric supply-air tee, the area of vortex zone formed in the flow separation region, and the pressure loss of an optimized tee were investigated using computational fluid dynamics (CFD) in COMSOL Multiphysics 5.6. The Reynolds-averaged continuity and Navier – Stokes equations were solved with the standard $k-\epsilon$ turbulence model incorporating wall functions.

Results. The value of the pressure loss coefficient of a standard tee showed close agreement with previously published data. The tee construction was optimized with consideration of the vortex zone in the deformation region by rounding the wall, with subsequent numerical investigation.

Conclusions. The study demonstrated that rounding the wall in the flow deformation zone of a standard supply-air duct tee reduces hydraulic resistance by 11.9 %. The results contribute to both scientific understanding and practical applications in the development of optimized tee.

KEYWORDS: ventilation, energy saving in ventilation, duct tee, pressure loss coefficient, pressure loss reduction, computational fluid dynamics

Acknowledgements. The study was supported by the Russian Science Foundation (RSF) grant No. 25-29-01023 (URL: <https://rscf.ru/project/25-29-01023/>) using equipment at the V.G. Shukhov BSTU High Technology Center.

FOR CITATION: Elistratova Yu.V., Kryukov I.V., Gaidash D.S., Koverina V.Yu., Iureva S.S. Numerical study of the reduction of the local resistance coefficient of a tee for flow separation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(2):257-268. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.257-268 (rus.).

Corresponding author: Yulia V. Elistratova, tgiv.info@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Система вентиляции здания обеспечивает подачу и удаление воздуха в помещения для обеспечения требуемых параметров микроклимата. В современном строительстве предпочтение отдается системам вентиляции с механическим побуждением, основными элементами которых являются разветвленная сеть воздуховодов и вентилятор. Однако повышенное энергопотребление механической вентиляции приводит к проблеме энергоэффективности здания за счет увеличения затрат на ее эксплуатацию [1–7].

При проектировании системы вентиляции проводится расчет полных потерь давления, которые складываются из потерь давления на преодоление сопротивления по длине воздуховода и на местные сопротивления. Разветвленная сеть воздуховодов содержит большое количество фасонных элементов, таких как тройники, отводы, крестовины. Фасонные элементы относятся к местным сопротивлениям, которые оказывают большее влияние на потери давления в системе, чем потери давления по длине воздуховода. При расчете потерь давления, возникающих в местных сопротивлениях, используются коэффициенты местных сопротивлений (КМС), они представлены в различных справочных и литературных источниках¹ [8–13].

Одним из направлений снижения гидравлического сопротивления тройника является установка направляющих перегородок. В работе [14] с помощью численного моделирования исследовалось влияние длины и различных положений направляющей перегородки на сопротивление приточного тройника круглого сечения. По результатам исследования удалось снизить сопротивление тройника на 21,5 %. Осуществлялось численное моделирование в двумерной постановке тройника на слияние с верти-

кальной перегородкой [15]. По результатам исследования определено оптимальное соотношение длины перегородки и размера сборного канала тройника, что позволяет снизить расход металла на изготовление по сравнению с конструкцией, приведенной в справочнике [8]. В труде [16] рассматривались различные конструкции приточных тройников с направляющей перегородкой, выполненной по дуге окружности, установленной на боковом ответвлении. Использование такой конструкции дает возможность снизить сопротивление бокового канала тройника в зависимости от его конфигурации от 5,2 до 38,4 %. С помощью численного моделирования исследовались форма, длина и угол наклона направляющей перегородки в приточном тройнике [17]. В зависимости от соотношения расходов воздуха, конструкции и положения направляющей перегородки авторам удалось снизить гидравлическое сопротивление от 4,3 до 263,8 %. С применением численного моделирования изучалась конструкция приточного тройника с направляющей лопаткой на боковом ответвлении, выполненной по дуге окружности, и выступом на проходном участке тройника [18]. Такая конструкция тройника позволила снизить сопротивление на 22,29 % на проход и на 2,4 % на боковом ответвлении.

Другой способ снижения гидравлического сопротивления в фасонных элементах — использование оптимизации и профилирования по очертаниям вихревых зон. В работе [19] проводилось численное и экспериментальное исследование полностью оптимизированного приточного тройника. По результатам исследования получено снижение сопротивления до 165 % на проход и до 118 % в ответвлении при различных соотношениях расходов. Методами численного моделирования в двумерной постановке исследовалась конструкция профилированной вытяжной крестовины, геометрия которой построена по очертаниям вихревых зон, образуемых при срыве потока с острой кромки [20]. Результаты показывают,

¹ ВСН 353–86. Проектирование и применение воздуховодов из унифицированных деталей. М. : Минмонтажспецстрой СССР, 1986. 24 с.

что профилирование позволяет снизить сопротивление фасонного элемента до 45 % на проход и до 60 % на боковом ответвлении. Численное моделирование применялось при изучении конструкции профилированного тройника на слияние в двумерной постановке [21]. По результатам исследования авторам удалось снизить сопротивление тройника примерно в четыре раза по сравнению со стандартным тройником. Выполнялось компьютерное моделирование течения воздуха в симметричном тройнике круглого сечения на слияние в трехмерной постановке [22]. По результатам исследования получено значение коэффициента местного сопротивления тройника. Однако сравнение со справочными сведениями, в частности с данными И.Е. Идельчика, дает расхождение в 34 %.

На основании обзора проведенных исследований видно, что проблема сопротивления фасонных элементов системы вентиляции может привести к серьезным потерям энергии и удорожанию стоимости системы в целом. Кроме этого, из анализа существующих публикаций можно сделать вывод, что на настоящий момент мало научных работ, посвященных изучению снижения сопротивления в симметричных прямоугольных тройниках на разделении потока. Имеется незначительное количество информации о значениях коэффициента местного сопротивления симметричного тройника.

Цель работы — численное исследование течения воздуха в симметричном приточном тройнике квадратного сечения для определения коэффициента местного сопротивления, установление очер-

таний вихревых зон в месте разделения потока воздуха и коэффициента местного сопротивления оптимизированного приточного тройника, построенного с учетом очертания вихревой зоны в области деформации потока.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Численное моделирование осуществлялось с использованием методов вычислительной гидродинамики в программном комплексе (ПК) COMSOL Multiphysics 5.6. Поставленная задача решается в турбулентной стационарной трехмерной постановке. Трехмерная модель стандартного тройника строилась в ПК SolidWorks.

Моделируются стандартный симметричный тройник на разделение потока с размерами входного и выходных участков 100×100 мм. Длины входного и выходных участков тройника приняты равными 2,45 м. Длины участков тройника выбирались с учетом обеспечения выравнивания полей скорости и давления в каналах и устранения влияния граничных условий (ГУ) на течение в тройнике.

Первым этапом моделирования является задание ГУ, а также построение расчетной области модели и сетки. В качестве граничных условий задавались условия скорости на входном сечении ГУ_{inlet} и избыточного статического давления на выходных сечениях — ГУ_{outlet} (рис. 1). Значение скорости принималось 1 м/с, значение избыточного давления — равным нулю. Эквивалентная шероховатость стенок не учитывалась.

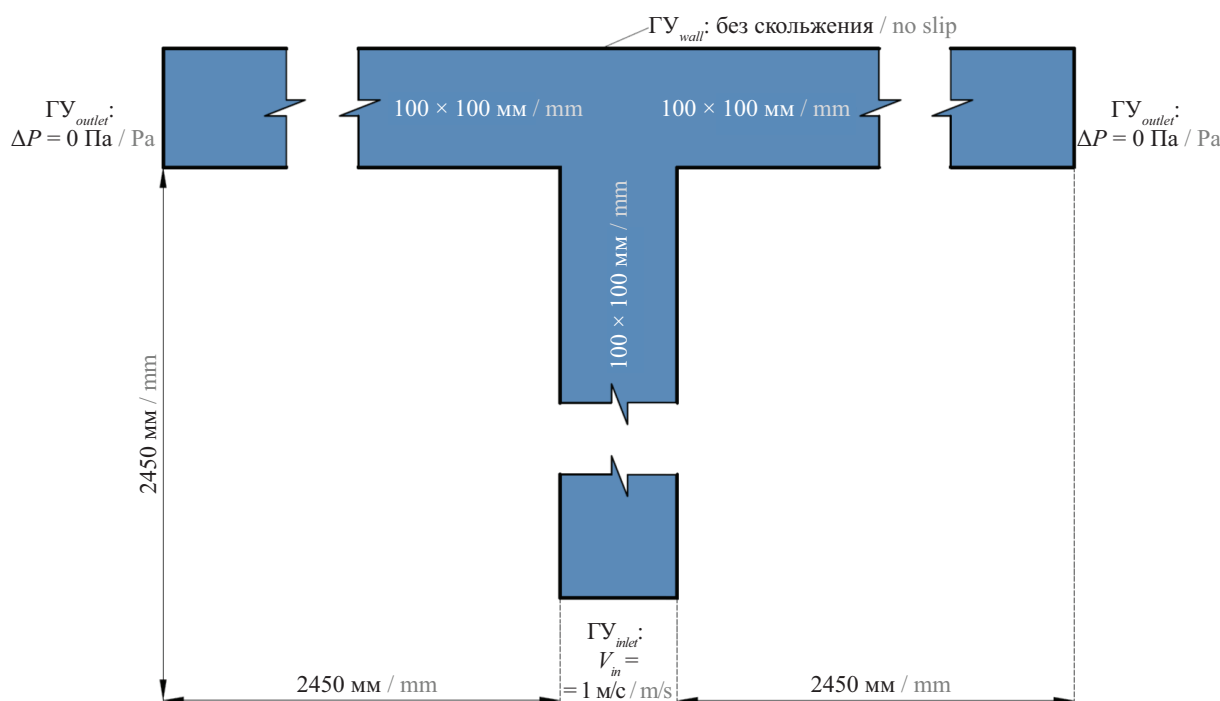


Рис. 1. Область исследования и граничные условия исследуемого тройника

Fig. 1. Research area and boundary conditions of the investigated tee

Табл. 1. Граничные условия исследуемой области тройника

Table 1. Boundary conditions of the investigated tee area

Граничные/начальные условия Boundary/initial conditions	Физический параметр Physical parameter	Значение Value
Граничное условие Inlet Boundary condition Inlet	Скорость на входе Velocity at the inlet	1 м/с m/s
Граничное условие Outlet Boundary condition Outlet	Избыточное статическое давление на выходе Excessive static pressure at the outlet	0 Па Pa
Граничное условие Wall Boundary condition Wall	Без скольжения No slip	–
Начальное условие текучей среды Initial fluid condition	Температура текучей среды Fluid temperature	20 °С

В качестве текучей среды из библиотеки COMSOL Multiphysics 5.6 выбран воздух. Исследование проводилось при температуре текучей среды 20 °С. Плотность и кинематическая вязкость рассчитывались в ПК как функция от температуры текучей среды. Рассчитанные значения в дальнейшем сравнивались с табличными величинами. Задаваемые ГУ представлены в табл. 1.

Для замыкания уравнений неразрывности и Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу, используется «стандартная» $k-\epsilon$ модель турбулентности с пристеночными функциями.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выбора подходящей расчетной сетки выполнялся анализ на сеточную независимость, целью которого является определение размера расчетной сетки, не оказывающей существенного влияния на изменение результата. В данном исследовании используется неструктурированная расчетная сетка. Элементы сетки представляют собой тетраэдры.

Среднее качество сетки при изменении уровня меняется от 0,59 до 0,69.

На рис. 2 показан результат численного исследования на сеточную независимость коэффициента местного сопротивления при различной настройке сетки.

В табл. 2 приведен результат исследования на сеточную независимость при различном уровне настройки расчетной сетки и числе расчетных ячеек сетки. При увеличении числа расчетных ячеек начиная с 6-го уровня сетки наблюдается отсутствие влияния на значение коэффициента местного сопротивления ζ_c .

На рис. 3 показано распределение скорости при различном уровне настройки сетки. На основании представленных графиков можно сделать вывод, что потери давления в приточном тройнике складываются из потерь на внезапное расширение потока в месте его разделения, деформацию потока в месте контакта со стенкой тройника, поворот потока в боковом ответвлении, внезапное сужение прохода бокового ответвле-

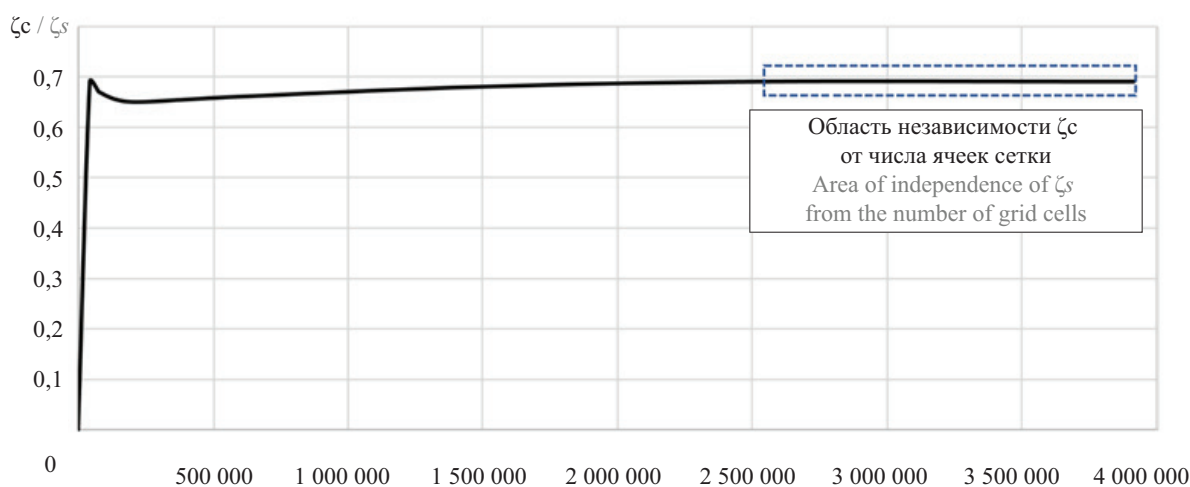


Рис. 2. Зависимость коэффициента местного сопротивления ζ_c от числа ячеек расчетной сетки

Fig. 2. Dependence of the local resistance coefficient ζ_c on the number of cells in the computational grid

Табл. 2. Значение коэффициента местного сопротивления при различном уровне настройки расчетной сетки

Table 2. Pressure loss coefficient value at different levels of the calculation grid setting

Настройка сетки Grid level	Число ячеек Number of cells	Значение ζ_s Value of ζ_s
Уровень сетки 1 Grid level 1	44 075	0,690
Уровень сетки 2 Grid level 2	76 806	0,670
Уровень сетки 3 Grid level 3	194 896	0,650
Уровень сетки 4 Grid level 4	584 360	0,660
Уровень сетки 5 Grid level 5	1 498 627	0,680
Уровень сетки 6 Grid level 6	2 513 660	0,690
Уровень сетки 7 Grid level 7	3 916 704	0,690

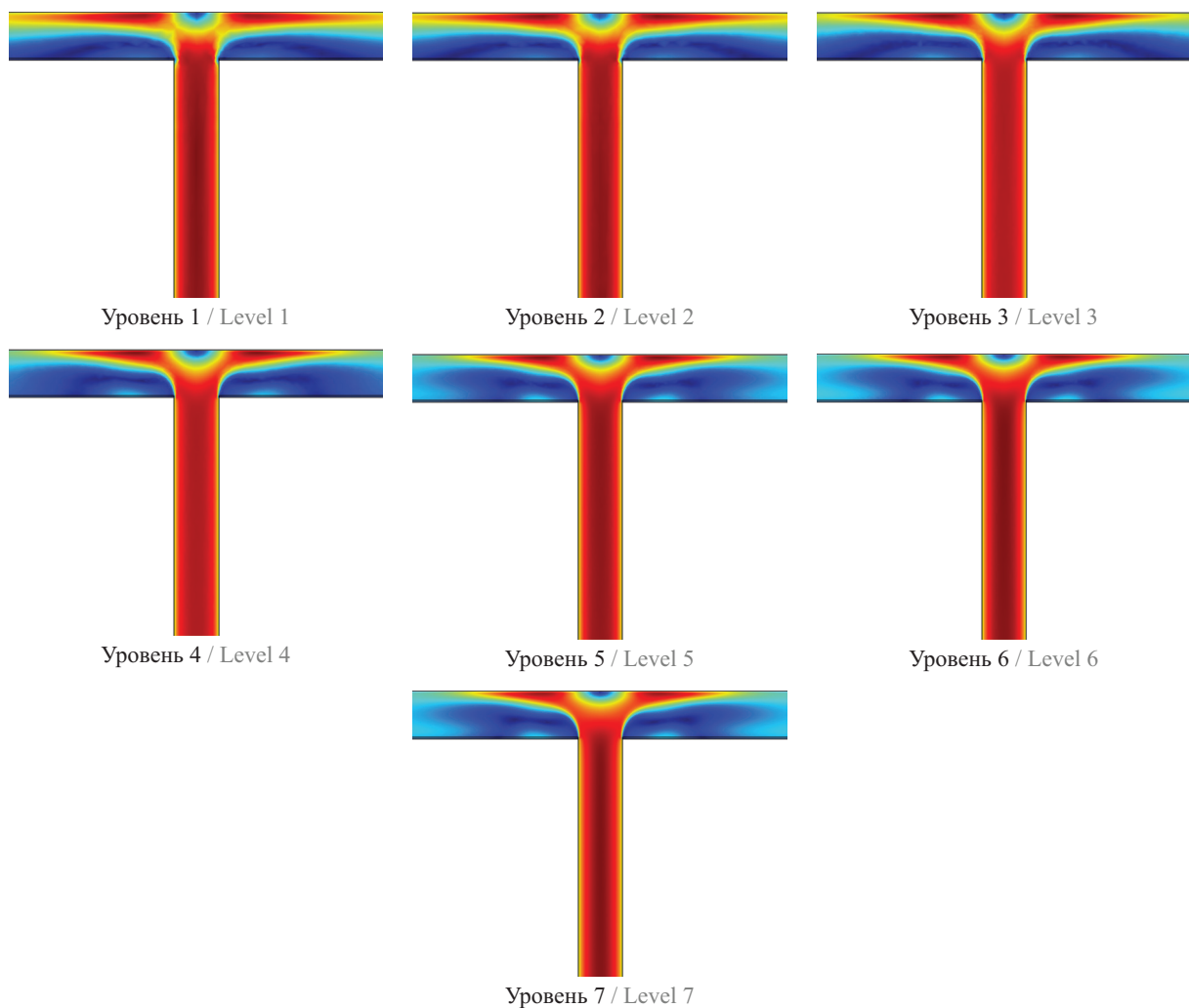


Рис. 3. Распределение скорости при различном уровне настройки расчетной сетки

Fig. 3. Velocity distribution at different levels of mesh configuration

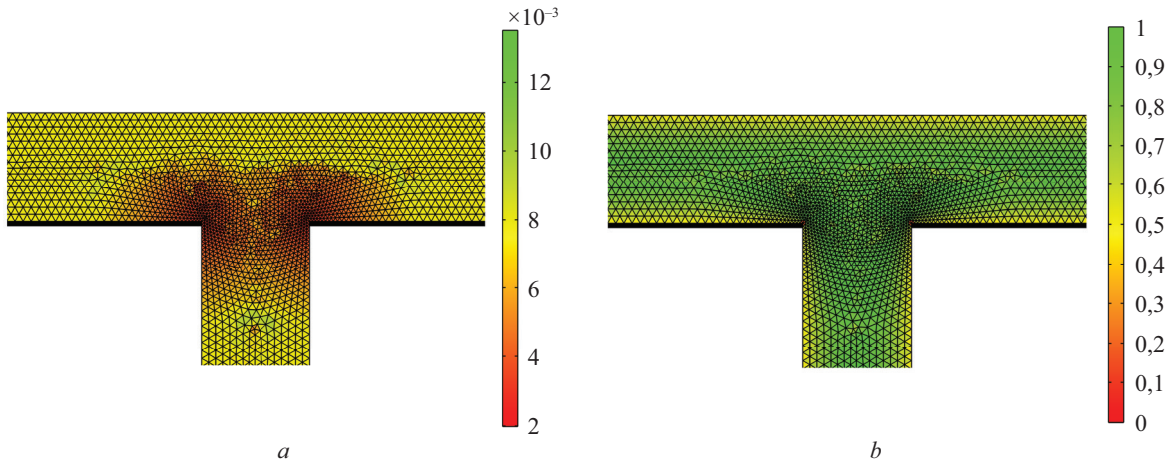


Рис. 4. Размер ячеек (a) и качество ячеек (b) расчетной сетки при исследовании стандартного тройника

Fig. 4. Cell size (a) and cell quality (b) of the computational grid in the study of a standard tee

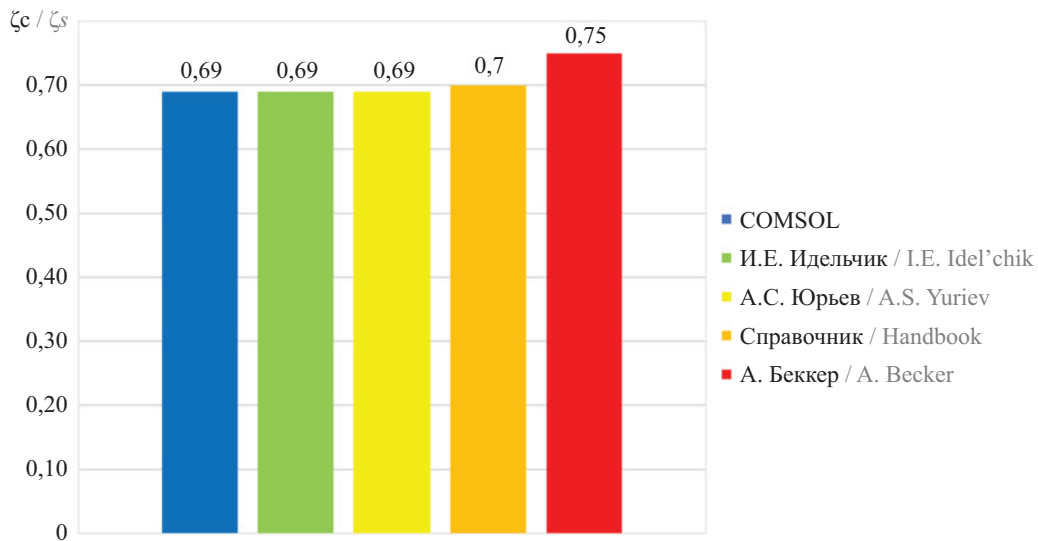


Рис. 5. Сравнение данных численного моделирования со справочными

Fig. 5. Comparison of numerical simulation data with reference data

ния из-за деформации потока, что согласуется с данными [8].

На рис. 4 приведены размер и качество ячеек расчетной сетки, используемой при численном исследовании стандартного тройника, в области разделения потока для принятого в исследовании уровня сетки.

Сравнение результатов, полученных при численном моделировании с известными данными, показывает расхождение менее 1 % с И.Е. Идельчиком [8] и А.С. Юрьевым [9]; 1,45 % со справочником; 8,7 % с А. Беккер [10] (рис. 5).

Для установления значения коэффициента местного сопротивления применялась формула:

$$\zeta_c = \frac{2(\Delta P - \Delta P_{тр}^{вх} - \Delta P_{тр}^{вых})}{\rho_{ж} v_{вх}^2}, \quad (1)$$

где ΔP — разность полных давлений во входном и выходных сечениях тройника, Па; $\Delta P_{тр}^{вх}$ и $\Delta P_{тр}^{вых}$ —

потери давления на входном и выходных линейных участках тройника, Па, определяемые по формуле Дарси — Вейсбаха:

$$\Delta P_{тр}^{вх} = \lambda_{вх} \frac{l_{вх}}{d_3} \frac{\rho_{ж} v_{вх}^2}{2}; \quad (2)$$

$$\Delta P_{тр}^{вых} = \lambda_{вых} \frac{l_{вых}}{d_3} \frac{\rho_{ж} v_{вых}^2}{2}, \quad (3)$$

где $\lambda_{вх}$ и $\lambda_{вых}$ — коэффициент гидравлического трения входного и выходных участков соответственно; $l_{вх}$ и $l_{вых}$ — длина входного и выходных участков соответственно с учетом половины ширины сечения, м; d_3 — эквивалентный диаметр участков, м; $\rho_{ж}$ — плотность текучей среды при заданной температуре, кг/м³; $v_{вх}$ и $v_{вых}$ — скорость во входном и выходных сечениях участков соответственно, м/с.

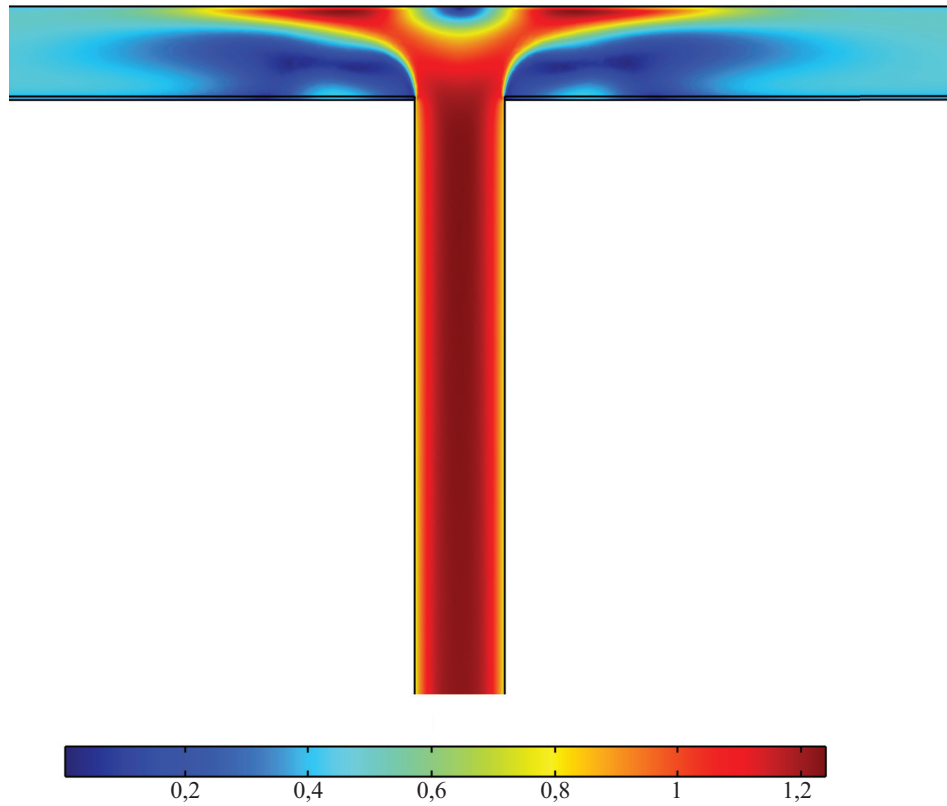


Рис. 6. Распределение скорости в стандартном тройнике

Fig. 6. Velocity distribution in a standard tee

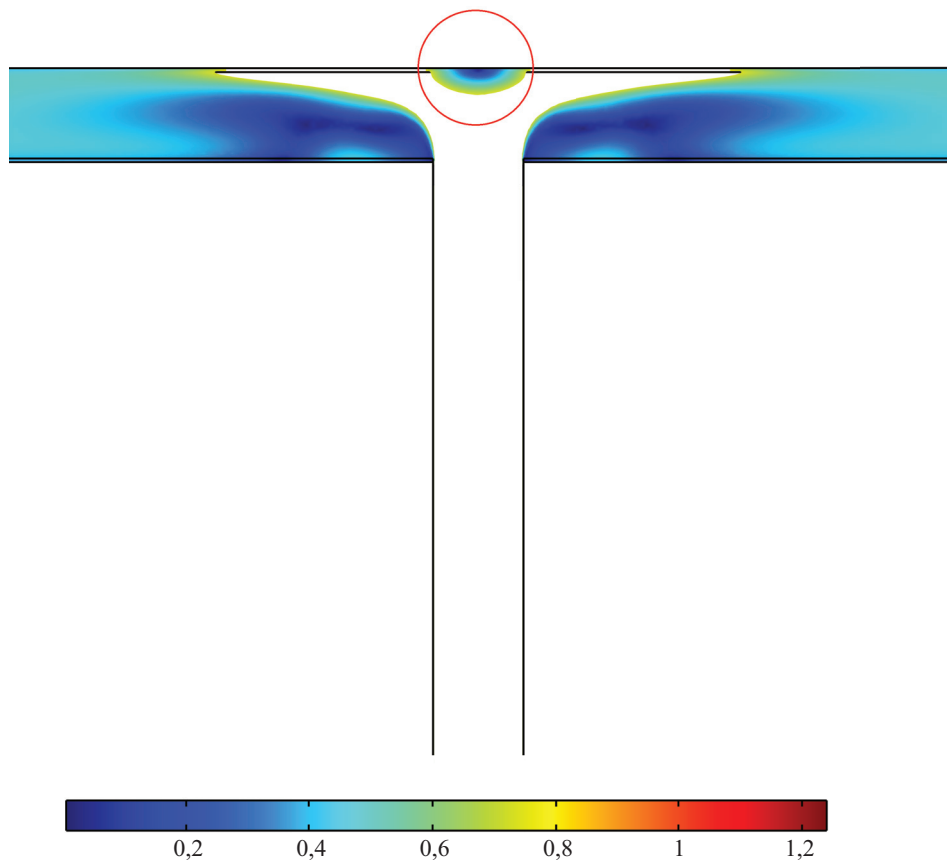


Рис. 7. Распределение скорости в области деформации потока и зоны вихреобразования при отрыве потока с острых кромок

Fig. 7. Velocity distribution in the flow deformation region and vortex formation zones during flow separation from sharp edges

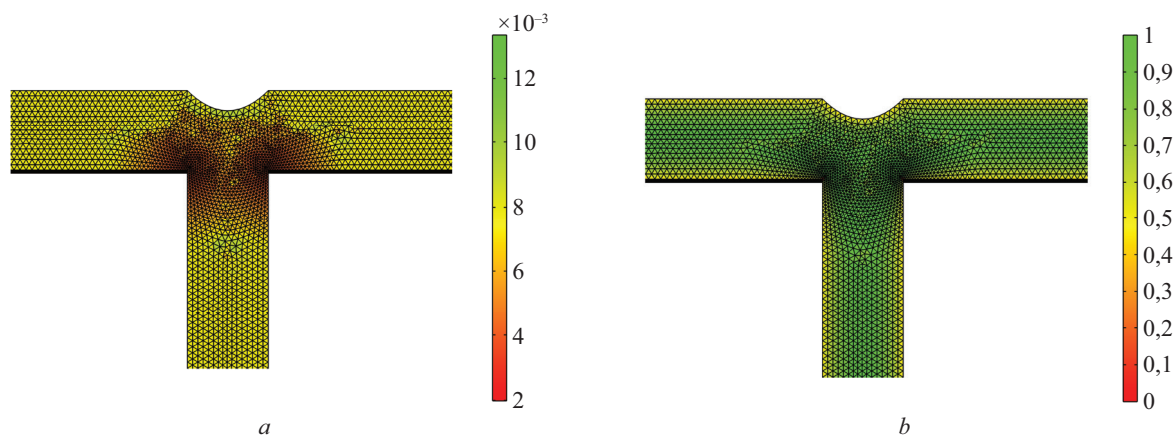


Рис. 8. Размер ячеек (a) и качество ячеек (b) расчетной сетки при исследовании оптимизированного тройника
 Fig. 8. Cell size (a) and cell quality (b) of the computational grid in the study of an optimized tee

Коэффициент гидравлического сопротивления при отсутствии влияния шероховатости стенок определяется по формуле Блазиуса:

$$\lambda_{\text{вх}} = \frac{0,316}{\text{Re}_{\text{вх}}^{0,25}}; \quad (4)$$

$$\lambda_{\text{вых}} = \frac{0,316}{\text{Re}_{\text{вых}}^{0,25}}; \quad (5)$$

где $\text{Re}_{\text{вх}}$ и $\text{Re}_{\text{вых}}$ — число Рейнольдса на входном и выходных участках соответственно, рассчитываемое по формуле:

$$\text{Re}_{\text{вх}} = \frac{v_{\text{вх}} d_2}{\nu_{\text{ж}}}; \quad (6)$$

$$\text{Re}_{\text{вых}} = \frac{v_{\text{вых}} d_3}{\nu_{\text{ж}}}; \quad (7)$$

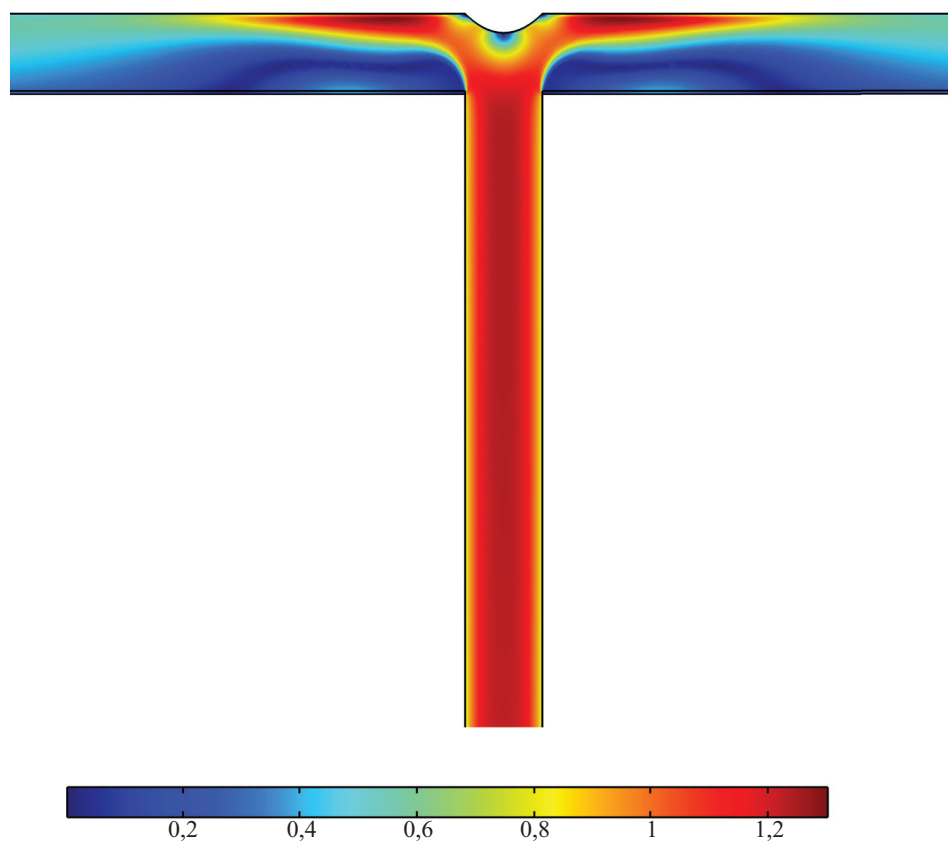


Рис. 9. Распределение скорости в оптимизированном тройнике

Fig. 9. Velocity distribution in an optimized tee

где $\nu_{ж}$ — кинематическая вязкость жидкости при заданной температуре, $\text{м}^2/\text{с}$.

На рис. 6 показано распределение скорости в продольном сечении на входном и выходных участках стандартного тройника в зоне разделения потока. Попадание потока воздуха из сборного участка воздуховода в зону разделения вызывает его деформацию за счет контакта со стенкой тройника, что приводит к заметному снижению скорости в области контакта и увеличению скорости вокруг данной области.

По результатам численного моделирования стандартного тройника были определены вихревые зоны в местах отрыва потока с острых кромок и область деформации потока при контакте со стенкой воздуховода (рис. 7).

С целью снижения влияния деформации потока на сопротивление тройника выделенная на рис. 7 область оптимизировалась путем скругления конструкции тройника. Ширина и длина оптимизированной поверхности приняты равными 100 мм, а высота — 25 мм. Для оптимизированной конструкции тройника также осуществлялось численное моделирование и исследование на сеточную независимость при тех же граничных условиях.

На рис. 8 показаны размер и качество ячеек расчетной сетки, используемой при численном исследовании оптимизированного тройника, в области разделения потока.

На рис. 9 представлен профиль скорости в продольном сечении на входном и выходных участках оптимизированного тройника в зоне разделения потока воздуха.

В отличие от стандартного тройника оптимизированный тройник снижает деформацию потока за счет обтекания выпуклой поверхности. Однако при этом увеличивается протяженность зоны вихреобразования в месте разделения потока и при его повороте.

Сравнение результатов, полученных при численном моделировании стандартного и оптимизированного тройника, показывает снижение коэффициента местного сопротивления на 11,9 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведено исследование сопротивления стандартного приточного тройника. Распределение поля скорости изучается методом численного моделирования. Достоверность численной модели подтверждается независимостью расчетной сетки и сравнением со справочными данными. Проанализирован эффект снижения сопротивления стандартного тройника за счет геометрической оптимизации его конструкции при заданном значении скорости движения потока. По результатам исследования установлено, что изменение конструкции стандартного приточного тройника путем скругления стенки в области деформации потока позволяет снизить сопротивление на 11,9 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Афонин К.В., Жилина Т.С., Загорская А.А., Молостова И.Е. Эффективность систем вентиляции с периодическим режимом работы // *Архитектура, строительство, транспорт*. 2024. № 1 (107). С. 58–67. DOI: 10.31660/2782-232X-2024-1-58-67. EDN CQXQYT.
2. Карневич В.В., Алескеров Р.М., Грицай М.М. Повышение энергоэффективности эксплуатируемых зданий // *Наукофера*. 2024. № 5–2. С. 251–261. DOI: 10.5281/zenodo.11355211. EDN BUOCOV.
3. Ильина Т.Н., Колесников М.С., Крюков И.В. О комплексных системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха в помещениях торговых центров // *Строительные материалы и изделия*. 2020. Т. 3. № 4. С. 39–47. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-4-39-47. EDN AOPIRF.
4. Колесников М.С., Ильина Т.Н. Инновационные способы создания микроклимата в помещениях значительного объема // *Альманах мировой науки*. 2020. № 1 (37). С. 86–89. EDN MZRSBV.
5. Taheri A., Khoshnevis A.B., Lakzian E. The effects of wall curvature and adverse pressure gradient on air ducts in HVAC systems using turbulent entropy generation analysis // *International Journal of Refrigeration*. 2020. Vol. 113. Pp. 21–30. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2020.01.014
6. González-Torres M., Pérez-Lombard L., Coronel J.F., Maestre I.R., Yan D. A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers // *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. Pp. 626–637. DOI: 10.1016/j.egy.2021.11.280
7. Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout C. A review on buildings energy consumption information // *Energy and Buildings*. 2008. Vol. 40. Issue 3. Pp. 394–398. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007
8. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. 3-е изд., перераб. и доп. / под ред. М.О. Штейнберга. М. : Машиностроение, 1992. 672 с.
9. Грачев И.Г., Пирогов С.Ю., Савищенко Н.П., Юрьев А.С. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем. СПб. : Мир и семья, 2001. 1154 с.
10. Беккер А. Системы вентиляции; пер. с нем. Л.Н. Казанцевой / под ред. Г.В. Резникова. М. : Техносфера, Евроклимат, 2008. 231 с.
11. Богословский В.Н. Отопление и вентиляция : уч. для вузов в 2 ч. Ч. 2. Вентиляция. М. : Стройиздат, 1976. 439 с.
12. Каменев П.Н., Тертичник Е.И. Вентиляция : учебник. М. : Издательство АСВ, 2008. 624 с.

13. Краснов Ю.С. Системы вентиляции и кондиционирования. Рекомендации по проектированию для производственных и общественных зданий. М.: Термокул, 2006. 288 с.

14. Yin Y., Wen X., Zhang J., Li A. Geometric parameters optimization of low resistance T-junction with guide vanes in HVAC system // E3S Web of Conferences. 2022. Vol. 356. P. 02056. DOI: 10.1051/e3sconf/202235602056

15. Ziganshin A., Eremina S., Safiullina G., Logachev K. Numerical study of the flow in a symmetrical ventilation junction tee with a baffle vane // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Pp. 213–222. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_23

16. Gao R., Li H., Li A., Liu K., Yu S., Deng B. Applicability study of a deflector in ventilation and air conditioning duct tees based on an analysis of energy dissipation // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2019. Vol. 184. Pp. 256–264. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.11.025

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 // Building and Environment. 2018. Vol. 132. Pp. 345–356. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.02.006

18. Misaran M.S., Sing C.F., Adzrie M. Study of Wye-Tee Duck Design at Various Protrusion and Guide Vane Location Using CFD // CFD Letters. 2019. Vol. 11. Issue 11. Pp. 39–47.

19. Tian Y., Gao R., Liu M., Li A., Dong X., Yu S. et al. Low-resistance local components design method based on topology optimization: A case study of a duct tee // Building and Environment. 2023. Vol. 244. P. 110823. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110823

20. Зиганшин А.М., Каримуллин Т.Л., Логачев К.И., Кареева Ю.П. Очертания вихревых зон и разработка энергоэффективных крестовин вытяжных вентиляционных систем // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 9 (789). С. 77–87. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-789-9-77-87. EDN JEQPOG.

21. Зиганшин А.М., Бадыкова Л.Н. Численное моделирование течения в профилированном вентиляционном тройнике на слияние // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. № 6 (702). С. 41–48. EDN ZGFVWZ.

22. Зиганшин А.М., Еремина С.В. Компьютерное моделирование течения в симметричном вентиляционном тройнике круглого сечения на слияние // Строительные конструкции, здания и сооружения. 2023. № 1 (2). С. 25–31. EDN HKLXYV.

Поступила в редакцию 18 сентября 2025 г.

Принята в доработанном виде 9 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 9 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Юлия Васильевна Елистратова** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова д. 46; РИНЦ ID: 853532, Scopus: 57201772844, ORCID: 0000-0003-1989-0632; tg.v.info@mail.ru;

Илья Валерьевич Крюков — кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова д. 46; РИНЦ ID: 875197, Scopus: 56189577300, Google Scholar: D5NEa4kAAAAJ; iliya.krukov@yandex.ru;

Дмитрий Сергеевич Гайдаш — аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова д. 46; РИНЦ ID: 1277019; gaidashdmit@yandex.ru;

Варвара Юрьевна Коверина — студент; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова д. 46; v.k.232128@yandex.ru;

Светлана Сергеевна Юрьева — студент; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова д. 46; yurevass22@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Afonin K.V., Zhilina T.S., Zagorskaya A.A., Molostova I.E. Efficiency of ventilation systems with intermittent operation. *Architecture, Construction, Transport*. 2024; 1(107):58-67. DOI: 10.31660/2782-232X-2024-1-58-67. EDN CQXQYT. (rus.).

2. Karnevich V.V., Aleskerov R.M., Gritsay M.M. The increase in energy efficiency of existing buildings.

Naukosfera. 2024; 5-2:251-261. DOI: 10.5281/zenodo.11355211. EDN BUOCOV. (rus.).

3. Piina T.N., Kolesnikov M.S., Kryukov I.V. On integrated heating, ventilation and air conditioning systems in rooms of shopping centers. *Construction Materials and Products*. 2020; 3(4):39-47. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-4-39-47. EDN AOIIRF. (rus.).

4. Kolesnikov M.S., Ilina T.N. Innovative ways to create a microclimate in large spaces. *The Almanac of World Science*. 2020; 1(37):86-89. EDN MZRSBV. (rus.).
5. Taheri A., Khoshnevis A.B., Lakzian E. The effects of wall curvature and adverse pressure gradient on air ducts in HVAC systems using turbulent entropy generation analysis. *International Journal of Refrigeration*. 2020; 113:21-30. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2020.01.014
6. González-Torres M., Pérez-Lombard L., Coronel J.F., Maestre I.R., Yan D. A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. *Energy Reports*. 2022; 8:626-637. DOI: 10.1016/j.egy.2021.11.280
7. Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout C. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*. 2008; 40(3):394-398. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007
8. Idel'chik I.E. *Handbook of hydraulic resistance*. 3rd revise / ed. Shtejnberg M.O. Moscow, Mashinostroenie, 1992; 672. (rus.).
9. Grachev I.G., Pirogov S.Yu., Savishchenko N.P., Yuriev A.S. *Handbook on Calculations of Hydraulic and Ventilation Systems*. St. Petersburg, Mir i Sem'ya, 2001; 1154. (rus.)
10. Becker A. *Ventilation Systems*; translated from German by L.N. Kazantseva / ed. by G.V. Reznikov. Moscow, Tekhnosfera, Evroklimat, 2008; 231. (rus.).
11. Bogoslovsky V.N. *Heating and Ventilation : textbook for Universities in 2 Parts. Part 2. Ventilation*. Moscow, Stroyizdat, 1976; 439. (rus.).
12. Kamenev P.N., Tertichnik E.I. *Ventilation : textbook*. Moscow, ASV Publishing House, 2008; 624. (rus.).
13. Krasnov Yu.S. Ventilation and air conditioning systems. *Design recommendations for industrial and public buildings*. Moscow, Thermocool, 2006; 288. (rus.).
14. Yin Y., Wen X., Zhang J., Li A. Geometric parameters optimization of low resistance T-junction with guide vanes in HVAC system. *E3S Web of Conferences*. 2022; 356:02056. DOI: 10.1051/e3sconf/202235602056
15. Ziganshin A., Eremina S., Safiullina G., Logachev K. Numerical study of the flow in a symmetrical ventilation junction tee with a baffle vane. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 213-222. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_23
16. Gao R., Li H., Li A., Liu K., Yu S., Deng B. Applicability study of a deflector in ventilation and air conditioning duct tees based on an analysis of energy dissipation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2019; 184:256-264. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.11.025
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. *Building and Environment*. 2018; 132:345-356. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.02.006
18. Misaran M.S., Sing C.F., Adzrie M. Study of Wyee-Tee Duck Design at Various Protrusion and Guide Vane Location Using CFD. *CFD Letters*. 2019; 11(11):39-47.
19. Tian Y., Gao R., Liu M., Li A., Dong X., Yu S. et al. Low-resistance local components design method based on topology optimization: A case study of a duct tee. *Building and Environment*. 2023; 244:110823. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110823
20. Ziganshin A.M., Karimullin T.L., Logachev K.I., Kareeva Yu.R. Outlines of vortex zones and development of energy-efficient cross junctions of exhaust ventilation systems. News of Higher Educational Institutions. *Construction*. 2024; 9(789):77-87. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-789-9-77-87. EDN JEQPOG. (rus.).
21. Ziganshin A.M., Badykova L.N. Numerical investigation of flow in profiled ventilation tee at junction. News of Higher Educational Institutions. *Construction*. 2017; 6(702):41-48. EDN ZGFVWZ. (rus.).
22. Ziganshin A.M., Eremina S.V. Numerical simulation of flow in a symmetrical round ventilation merging tee. *Construction, Buildings and Structures*. 2023; 1(2):25-31. EDN HKLXYV. (rus.).

Received September 18, 2025.

Adopted in revised form on December 9, 2025.

Approved for publication on December 9, 2025.

B I O N O T E S : **Yulia V. Elistratova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 853532, Scopus: 57201772844, ORCID: 0000-0003-1989-0632; tgv.info@mail.ru;

Iliya V. Kryukov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 875197, Scopus: 56189577300, Google Scholar: D5HEa4kAAAAJ; iliya.kryukov@yandex.ru;

Dmitrii S. Gaidash — postgraduate student of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 1277019; iliya.krukov@yandex.ru;

Varvara Yu. Koverina — student; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; v.k.232128@yandex.ru;

Svetlana S. Iureva — student; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; yurevass22@gmail.com.

Author contributions: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.