DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-45-54

Елистратова Ю.В., Крюков И.В., Уваров В.А., Коверина В.Ю.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
E-mail: tgv.info@mail.ru.

CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ В ОПТИМИЗИРОВАННОМ ТРОЙНИКЕ

Аннотация. *В статье представлены результаты численного исследования влияния различной высоты вогнутости стенки тройника на величину коэффициента местного сопротивления. Актуальность исследования заключается в снижении энергоемкости систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Моделирование движения текучей среды проводилось с использованием методов вычислительной гидродинамики в программном комплексе COMSOL Multiphysics 5.6. Поставленная задача решалась в трехмерной стационарной постановке. При настройке расчетной сетки проводилось сравнение результатов величины коэффициента местного сопротивления с целью устранения влияния размера сетки и выбора подходящего уровня сетки для расчета. Получены профили распределения скорости при различном соотношении высоты вогнутости стенки тройника к высоте канала. В ходе численного исследования установлено, что при соотношении высоты вогнутости к высоте канала равном 0,15–0,25 наблюдается снижение коэффициента местного сопротивления оптимизированного тройника почти на 12 % по сравнению со стандартной конструкцией тройника. При соотношении от 0,05 до 0,1 наблюдается снижение величины коэффициента местного сопротивления от 5,8 до 8,7 %. При увеличении высоты вставки более 0,25 значение коэффициента местного сопротивления начинает увеличиваться за счет уменьшения пропускной способности тройника и общего увеличения сопротивления. Полученные результаты говорят об эффективности применения оптимизированной конструкции тройника в системах вентиляции и кондиционирования воздуха.*

Ключевые слова: *вентиляция, энергосбережение в вентиляции, симметричный тройник, оптимизированный тройник, коэффициент местного сопротивления, снижение потерь давления, вычислительная гидродинамик, численное моделирование.*

Введение. В современном строительстве одной из приоритетных задач является энергосбережение и повышение энергоэффективности инженерных систем зданий. Значительное внимание уделяется энергопотреблению систем механической вентиляции и кондиционирования воздуха. Энергопотребление вентиляторов на прямую зависит от аэродинамического сопротивления этих систем и составляет около 20–40% от общего энергопотребления здания, а в некоторых зданиях этот показатель может быть и выше [1–2]. Значительная часть энергопотребления системы вентиляции и кондиционирования воздуха расходуется на преодоление аэродинамических сопротивлений, возникающих в фасонных элементах, таких как отводы, крестовины и тройники. Эти компоненты вызывают деформацию воздушного потока, сопровождающуюся интенсивным вихреобразованием, что в совокупности может составлять до 85 % и более от общих потерь энергии в системе [3]. Таким образом, ключевой задачей является определение способов снижения аэродинамического сопротивления фасонных элементов путем оптимизации их геометрии.

Совершенствование геометрической конструкции фасонных элементов позволяет существенно снизить сопротивление и сделать систему вентиляции энергоэффективной. Особенно это важно в современных условиях, когда снижению энергопотребления здания отводится большая роль в связи с высокими затратами на эксплуатацию.

Известным способом снижения сопротивления тройника является скругление острых кромок [4], что позволяет создать более обтекаемую геометрию в области разделения потока. Однако, как было отмечено авторами [5] в зависимости от размеров поперечного сечения тройника и радиуса скругления это может привести к увеличению его габаритных размеров и увеличению затрат на изготовление.

В поисках способов оптимизации фасонных элементов системы вентиляции и кондиционирования воздуха некоторые исследователи вдохновлялись формой и строением живых организмов, а также свойствами и структурой природы. Например, в работе [6] с целью снижения местного сопротивления в системах вентиляции и кондиционирования воздуха предложена конструкция тройника с выступами, разработанная на основе принципов биомиметики и имитирующая ветвящуюся структуру растений. Среднее снижение сопротивления исследуемого трой-

ника по сравнению с пятью традиционными типами тройников составило 28–48 % на проход и 22–68 % на ответвлении. В работе [7] исследуется тройник для воздуховодов, имитирующий естественную конфигурацию реки. Показано, что использование вогнутой и выпуклой формы тройника позволяет значительно снизить местные потери давления по сравнению с традиционными конструкциями. Исследуемая конструкция тройника позволяет снизить сопротивление на проход при различных соотношениях сторон и расходов от 20,45 % до 248,21 %. Сопротивление на ответвлении снижается от 0 до 817,88 %. Авторы работы отмечают, что значительное снижение сопротивления на ответвлении возможно только при большем расходе в прямом канале тройника; чем в отводящем. В работе [8] авторами предложен биомиметический метод оптимизации формы переходного участка переменного диаметра воздуховодов, основанный на аппроксимации формы соединения кривой Больцмана, вдохновлённой естественной формой русла реки. Результаты численного моделирования и натурных экспериментов показали, что по сравнению с традиционным линейным переходом коэффициент местного сопротивления снижается до 28,92 %. Установлено, что наибольший эффект достигается при соотношении сторон сечения 1:1, что подтверждает целесообразность применения оптимизированных криволинейных переходов в энергоэффективных системах вентиляции и кондиционирования воздуха.

Одним из способов снижения сопротивления фасонных элементов является применение направляющих элементов, совершенствование конструкции которых проводится с применением методов вычислительной гидродинамики. К примеру, в [9] проведено сравнение сопротивления тройника, имеющего вогнутую стенку и оптимизированный участок ответвления, с пятью другими традиционными типами тройников при различных соотношениях расхода и размера сечения. Результаты показывают, что оптимизированная конструкция тройника имеет меньшее сопротивление по сравнению с традиционными конструкциями на 42 %. В работе [10] рассматривается влияние оптимизированной направляющей пластины в полости тройника на снижение сопротивления. Результаты показывают, что снижение сопротивления предлагаемой направляющей пластины составляет от 4,3 % до 263,8 % при различных соотношениях расхода по сравнению с тройником без направляющей пластины. В работе [11] исследовался прямоугольный отвод с направляющей лопаткой в форме язычка, оптимизация формы которой проводилась с использованием методов вычислительной гидродинамики. Снижение сопротивления при использовании такой конструкции отвода с лопаткой при соотношении сторон 1.0 и радиусе кривизны 1.0 достигает 31 %. Для совершенствования конструкции тройника с направляющей пластиной в работе [12] предложен метод вариационной градиентной оптимизации ее формы. Авторами была проведена оптимизация формы направляющей лопатки для восьми вариантов традиционных тройников, имеющих различное соотношение сечений сборного участка и ответвления. Результаты экспериментов показали, что применение оптимизированной направляющей пластины обеспечивает снижение сопротивления на 6–96 % при изменении соотношений расходов от 0,1 до 0,9.

Другим известным способом является оптимизация конструкции фасонных элементов с учетом характера движения текучей среды. Отметим работу [13], в которой авторами проводилось исследование полностью оптимизированного тройника, геометрия конструкции которого получена методами вычислительной гидродинамики путем моделирования движения текучей среды в рассматриваемой области проектирования. По результатам исследования получено снижение сопротивления тройника до 165 % на проход и до 118 % в ответвлении при различных соотношениях расхода.

Стоит также отметить работы отечественных исследователей в данной области. В работе [14] рассматривалась конструкция тройника, область оптимизации которого совпадает с очертаниями вихревых зон в месте отрыва потока с острых кромок. Авторами получен оптимальный профиль конструкции тройника, использование которого приводит к снижению сопротивления от 30 до 70 % при различном соотношении расхода. В работе [15] методами вычислительной гидродинамики определяются очертания вихревых зон, по которым осуществляется оптимизация конструкции вентиляционного отвода под углом 90°. Результаты показывают, что использование оптимизированного отвода может снизить сопротивление на 60–80 %. В работе [16] 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. Результаты исследований показывают, что профилирование позволяет снизить сопротивление фасонного элемента до 45 % на проход и до 60 % на боковом ответвлении. Подобные способы оптимизации конструкций по очертанию вихревых зон использовались отечественными авторами и

при совершенствовании конструкций местных вытяжных отсосов [17–18].

На основании проведенного обзора можно сделать вывод, что проблема снижения сопротивления фасонных элементов системы вентиляции и кондиционирования воздуха является достаточно актуальной. Совершенствование конструкций фасонных элементов позволит снизить потери энергии в указанных выше системах, что особо актуально в современном строительстве.

Ранее авторами [19] было проведено численное исследование по определению коэффициента местного сопротивления симметричного тройника квадратного сечения, сравнение полученных результатов с известными источниками [4, 20, 21], а также выполнена оптимизация конструкции путем скругления стенки с учетом области деформации потока в месте разделения потока. Представляет интерес оценить влияние оптимизированной поверхности тройника на изменение величины сопротивления при различных значениях высоты скругленной стенки. Поэтому целью работы является численное моделирование течения воздуха в симметричном приточном тройнике квадратного сечения, оптимизированного с учетом области деформации потока, а также определение оптимальной высоты скругленной поверхности стенки, при которой значение коэффициента местного сопротивления тройника будет минимальным.

Методы исследования. Объектом исследования является симметричный тройник квадратного сечения с оптимизированной поверхностью, геометрия которого строилась по результатам численного исследования, проведенного в работе [19]. Моделирование движения текучей среды проводилось с использованием методов вычислительной гидродинамики в программном комплексе COMSOL Multiphysics 5.6 [22]. Поставленная задача решается в турбулентной стационарной трехмерной постановке. Моделирование турбулентного течения производилось в рамках «стандартной» *k-ε* модели турбулентности. В качестве текучей среды из библиотеки программы COMSOL Multiphysics 5.6 выбран воздух. Исследование проводилось при температуре текучей среды равной 20 °С, а плотность и кинематическая вязкость рассчитывались в программном комплексе как функция от заданной температуры.

Размеры сечения входного и выходных участков тройника приняты равными 100 × 100 мм. Длина входного и выходных участков тройника приняты равными 2400 мм с учетом обеспечения выравнивания полей скорости и давления в каналах и устранения влияния граничных условий на течение в симметричном тройнике. Размеры участков тройника приняты равными 50 мм.

Оптимизированная поверхность тройника имеет ширину и длину равную 100 мм, что соответствует размерам сечения, а высота вогнутости стенки изменялась в диапазоне от 5 до 45 мм с шагом 5 мм. Для каждой поверхности, обозначенными от A1 до A9, проводилось численное моделирование и исследование на сеточную независимость. Синим цветом на рисунке 1, б выделена область для случая A5, полученная по результатам [19].

В качестве граничных условий задавались условия скорости на входном сечении ГУ$_{inlet}$ и статического избыточного давления на выходных сечениях – ГУ$_{outlet}$ (рис. 1). Значение скорости принималось равным 1 м/с, а значение избыточного статического давления равным нулю. На всех стенках тройника задано граничное условие ГУ$_{wall}$, характеризующее отсутствие проскальзывания и непроницаемости для текучей среды. Эквивалентная шероховатость стенок не учитывалась.

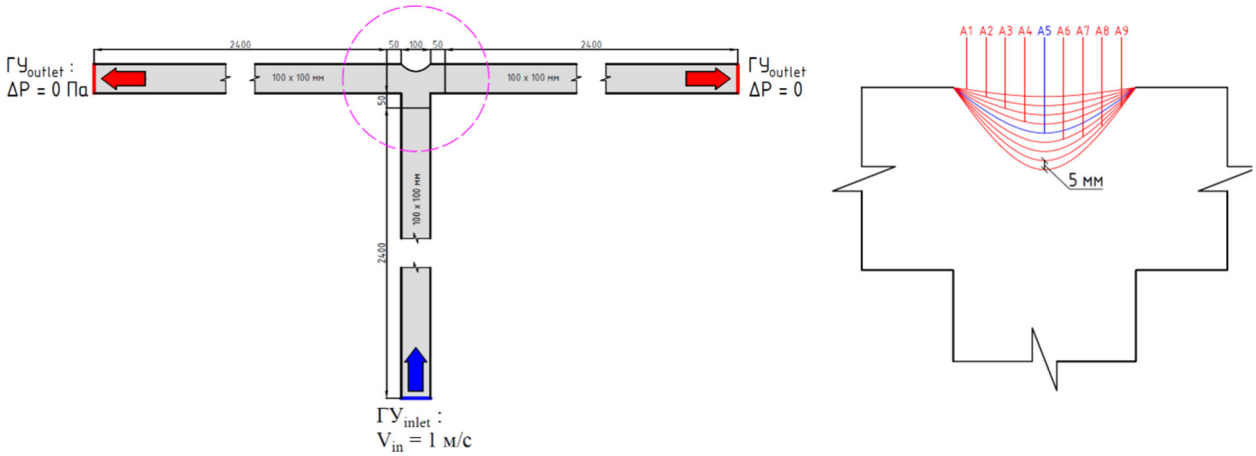
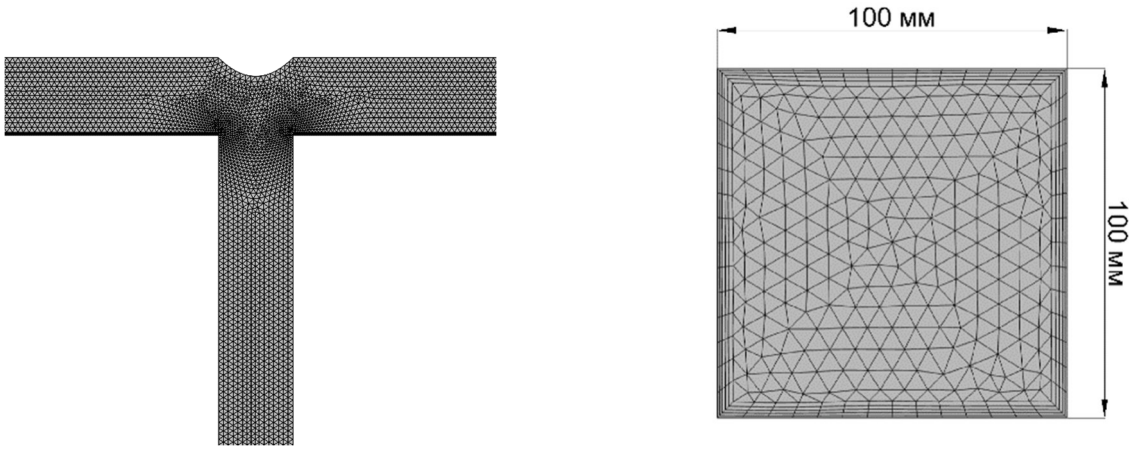


Рис. 1. Схема исследуемого тройника: а) заданные геометрические размеры и граничные условия; б) схема изменения геометрии оптимизированной поверхности

Результаты исследования и обсуждение. На первом этапе моделирования проводился выбор подходящей расчетной сетки для исследования на сеточную независимость, целью которого является определения конфигурации и размера расчетной сетки не оказывающей влияния на изменение результата. На рисунке 2 показана расчетная сетка в области разделения потока и в сечении участка тройника для случая А5. Построение расчетной сетки проводилось автоматически с учетом заданного уровня и требуемого качества. В данном исследовании используется неструктурированная расчетная сетка. В области течения строилась тетраэдральная сетка, а в пристеночной области – призматическая. Среднее качество ячеек расчетной сетки составляет 0,69, что является хорошим результатом. Увеличение качества сетки приводит к заметному уменьшению размеров сетки и увеличению числа ячеек, что требует больших вычислительных мощностей. Размер ячеек сетки в пристеночной области строился с учетом полного разрешения сеткой пограничного слоя. Для этого необходимо, чтобы безразмерный параметр y^+ был приблизительно равным 1 [16].



а) б)

Рис. 2 Расчетная сетка исследуемого тройника:
а) в области разделения потока; б) в сечении участка тройника

На рисунке 3 показан результат численного исследования на сеточную независимость коэффициента местного сопротивления стандартного тройника при различной настройке сетки для случая конструкции А5. Значение коэффициента местного сопротивления определялось по формуле:

$$\zeta = \frac{(P_{cm1} + 0{,}5\rho V_{in}^2) - (P_{cm2} + 0{,}5\rho V_{out}^2) - \Delta P_{mp}^{вх} - \Delta P_{mp}^{вых})}{0{,}5\rho V_{in}^2},$$

где P_{cm1}, P_{cm2} – статическое давление во входном и выходных сечениях тройника, найденные по результатам моделирования, Па; V_{in}, V_{out} – скорость воздуха во входном и выходных сечениях тройника, м/с; $\Delta P_{mp}^{вх}$ и $\Delta P_{mp}^{вых}$ – потери давления на входном и выходных линейных участках тройника, Па, определяемые по формуле Дарси-Вейсбаха [23].

При определении потерь давления на линейных участках коэффициент гидравлического сопротивления при отсутствии влияния шероховатости стенок рассчитывается по формуле Блазиуса [23].

В таблице 1 показаны результаты исследования на сеточную независимость при различном уровне настройки расчетной сетки и числе расчетных ячеек сетки. Стоит отметить, что при задании уровня сетки в COMSOL Multiphysics калибровка осуществлялась для физического процесса, связанного с динамикой течения жидкости. При увеличении числа расчетных ячеек начиная с 7-го уровня наблюдается отсутствие влияния сетки на значение коэффициента местного сопротивления ζ.

На рисунке 3 показаны профили скорости в продольном сечении оптимизированного тройника в зоне разделения потока воздуха при различном значении h/H, где h – высота оптимизированной поверхности, мм; H – высота канала, мм.

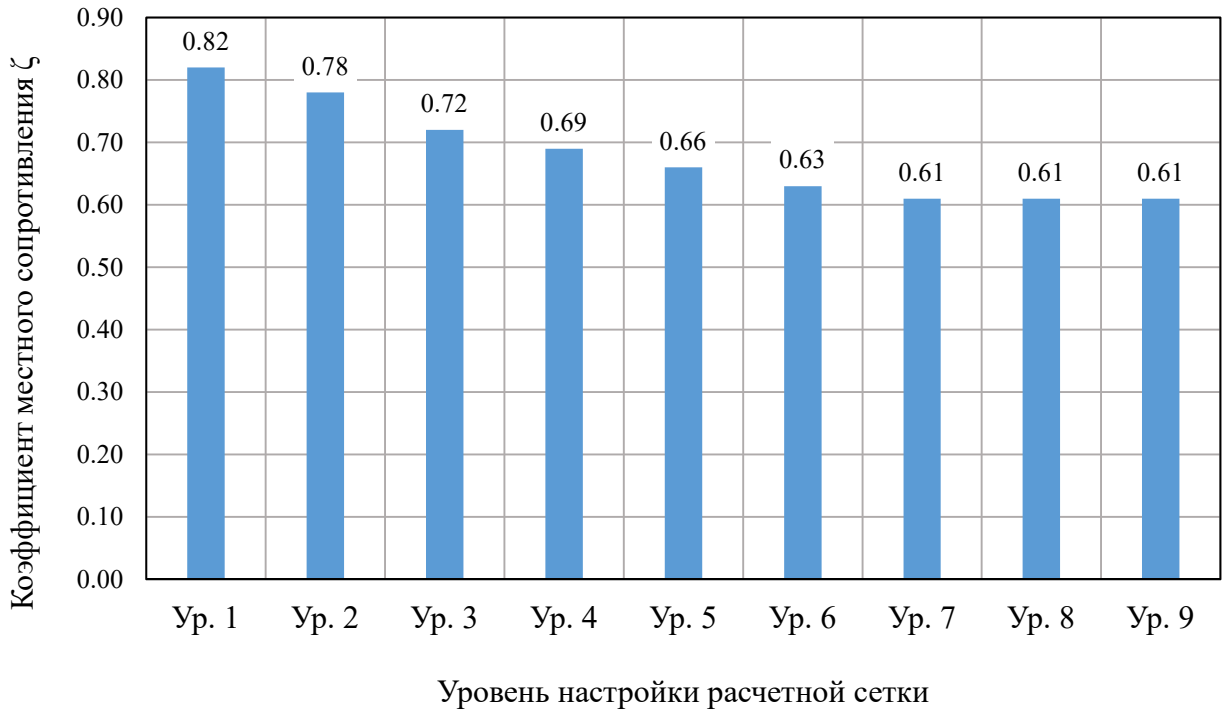


Рис. 3. Зависимость коэффициента местного сопротивления ζ от уровня настройки расчетной сетки

Таблица 1

Значение коэффициента местного сопротивления при различном уровне настройки расчетной сетки

Настройка уровня сетки	Число расчетных ячеек	Значение ζ
Уровень сетки 1	12 000	0,82
Уровень сетки 2	17 500	0,78
Уровень сетки 3	45 000	0,72
Уровень сетки 4	76 000	0,69
Уровень сетки 5	195 000	0,66
Уровень сетки 6	587 000	0,63
Уровень сетки 7	2 510 000	0,61
Уровень сетки 8	2 700 000	0,61
Уровень сетки 9	3 910 000	0,61

На рисунке 4 показан график сравнения значения коэффициента местного сопротивления при различном значении h/H.

Сравнение результатов, полученных при численном моделировании стандартного и оптимизированного тройника показывает снижение коэффициента местного сопротивления на 11,9 % при h/H в диапазоне от 0,15 до 0,25. При увеличении h/H от 0,05 до 0,15 наблюдается снижение величины коэффициента местного сопротивления от 5,8 до 11,9%. При увеличении h/H более 0,25 значение коэффициента местного сопротивления начинает увеличиваться за счет уменьшения пропускной способности тройника и общего увеличения сопротивления.

Полученные данные говорят об эффективности применения оптимизированной конструкции приточного тройника и снижении коэффициента местного сопротивления. Стоит также отметить, что именно оптимизация геометрии тройника по области деформации потока дает снижение величины коэффициента местного сопротивления.

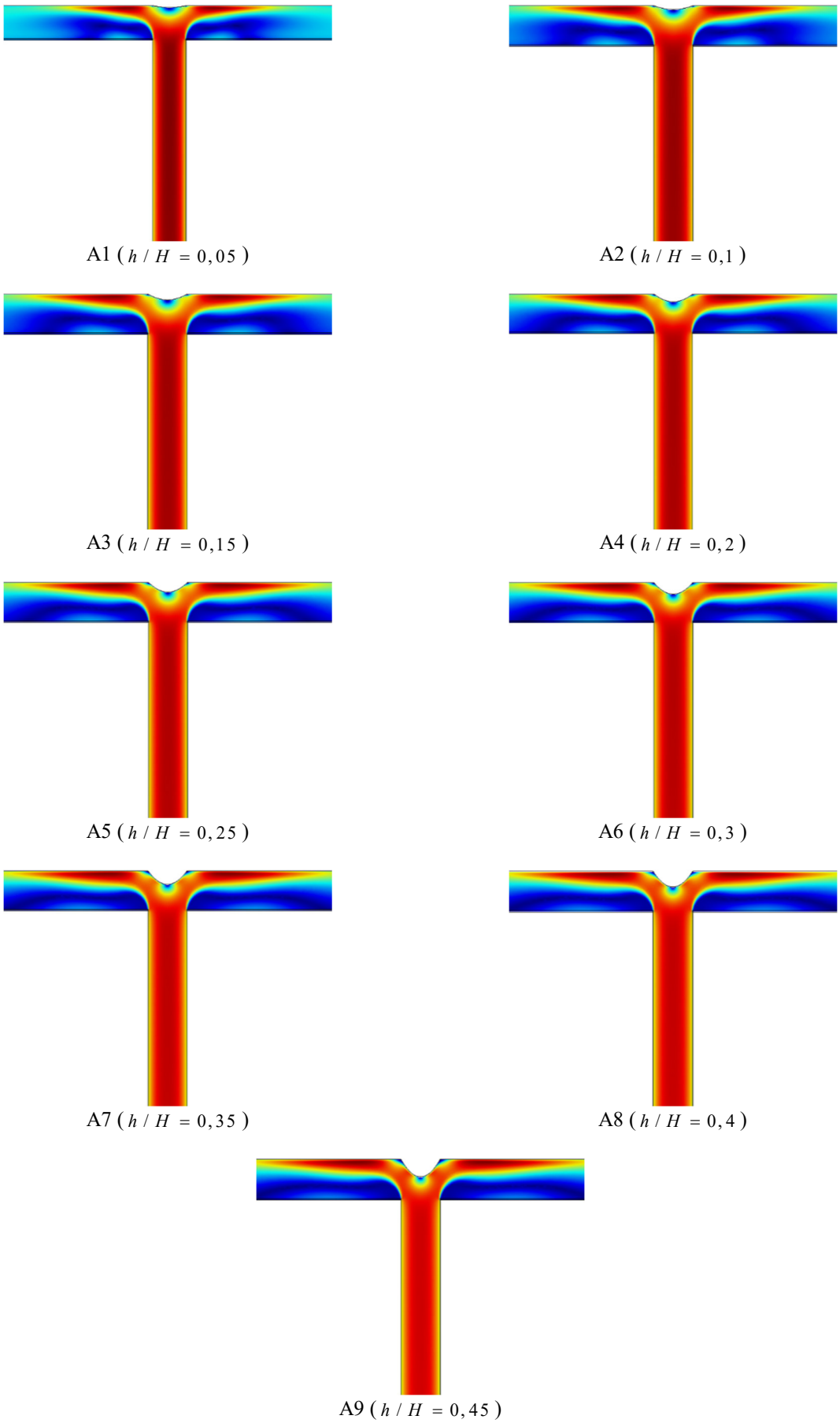


Рис. 3. Изменение скорости в оптимизированном тройнике при различном значении h / H

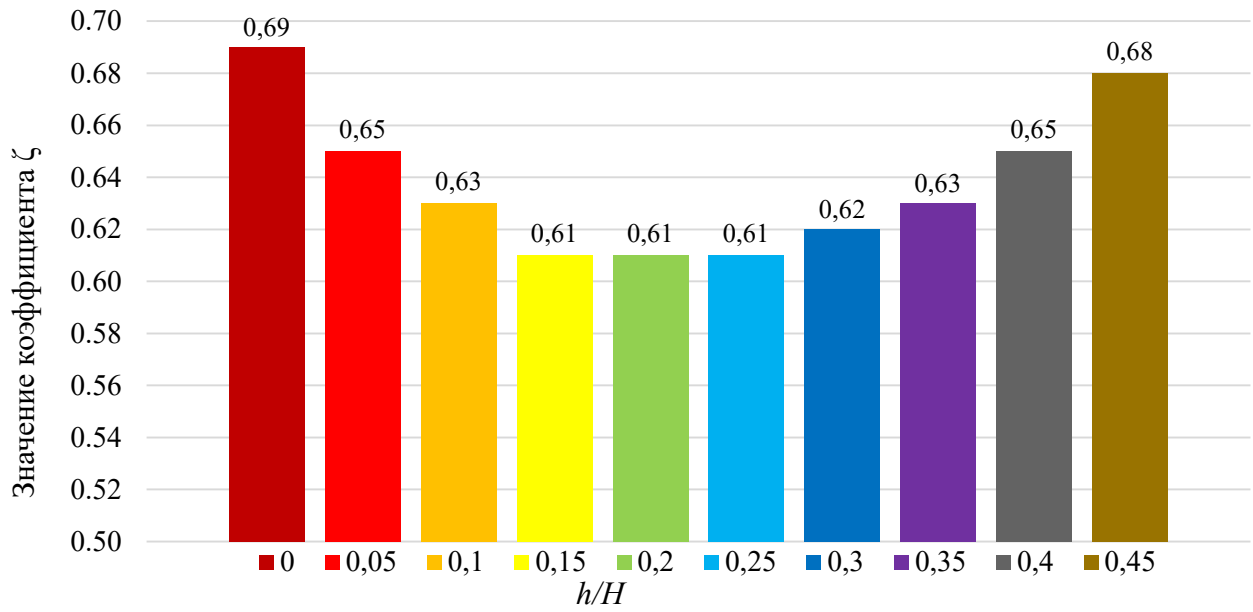


Рис. 4. График изменения коэффициента местного сопротивления при различном значении h/H

Заключение. В данной работе проводилось численное исследование конструкции оптимизированного тройника и определение его величины коэффициента местного сопротивления при различной высоте вогнутости стенки. Достоверность полученных результатов подтверждается независимостью расчетной сетки. Получено распределение скорости в конструкции оптимизированного тройника при различном значении h/H. Проанализирован эффект снижения сопротивления по сравнению со стандартным тройником. По результатам исследования установлено, что при h/H в диапазоне от 0,15 до 0,25 наблюдается снижение коэффициента местного сопротивления на 11,9 %.

Источник финансирования. *Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (РНФ) № 25-29-01023, https://rscf.ru/project/25-29-01023/, с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hu Sh., Yan D., Guo S., Cui Y., Dong B. A survey on energy consumption and energy usage behavior of households and residential building in urban China // Energy Build. 2017. Vol. 148. Pp. 366–378. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.03.064.

2. Tsinghua Building Energy Research Center, Annual Report on China, Building Energy Efficiency, China architecture and building press. Beijing, China. 2014.

3. Зиганшин А.М., Логачев К.И. Вихревая вентиляция. Профилированные элементы систем вентиляции сниженной энергоемкости. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2022. 336 с.

4. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М.О. Штейнберга. 3-е. изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

5. Зиганшин А.М., Бадыкова Л.Н. Численное моделирование течения в профилированном вентиляционном тройнике на слияние // Известия вузов. Строительство. 2017. №6. С. 41–48.

6. 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 // Building and Environment. 2018. Vol. 129. Pp. 130–141. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.11.023.

7. Gao R., Zhang H., Li A., Liu K., Yu Sh., Deng B. A novel low-resistance duct tee emulating a river course // Building and Environment. 2018. Vol. 144. Pp. 295–304. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.08.034.

8. Gao R., Wang M., Guo W., Zhang S., Wen Sh., Wu D., Zhou H., Li A. Study of the shape optimization of a variable diameter in a ventilation and air-conditioning duct based on the Boltzmann function // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 43. 102833. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102833.

9. 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 // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 132. Pp. 790–800. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.12.107.

10. 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.

11. Liu Y., Gao R., Zhang Z., Zhu W., Zhou L., Jing R., Zheng Q., Li A., Study on resistance reduction in a jugular profiled bend based on entropy increase analysis and the field synergy principle // Building and Environment. 2021. Vol. 203. 108102. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.02.006.

12. Jing R., Song B., Gao R., Yang Ch., Hao X. A variable gradient descent shape optimization method for guide tee resistance reduction // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 95. 110161. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.110161.

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

14. 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. №15 (67). С. 111–123.

15. Malanichev I., Akhmadiev F. Pressure loss reduction in ventilation ducts by shape optimization of the removable profiled components // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 890. 012154. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012154.

16. Зиганшин А.М., Каримуллин Т.Л., Логачев К.И., Кареева Ю.Р. Очертания вихревых зон и разработка энергоэффективных крестовин вытяжных вентиляционных систем // Известия вузов. Строительство. 2024. №9. С. 77–87. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-789-9-77-87.

17. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Kryukova O.S., Averkova O.A., Kryukov I.V., Gol`tsov A.B. Improving dust capture efficiency with local exhaust hoods in manicure shops // Building and Environment. 2020. Vol. 181. 107124. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107124.

18. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Popov E.N., Averkova O.A., Kryukova O.S., Gol`tsov A.B. Experiment determining pressure loss reduction using a shaped round exhaust hood // Building and Environment. 2021. Vol. 190. 107572. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107572.

19. 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.

20. Грачев И.Г., Пирогов С.Ю., Савищенко Н.П., Юрьев А.С. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем / Под ред. Юрьева А.С. // СПб.: АНО НПО «Мир и семья», 2001. 1154 с.

21. Беккер А. Системы вентиляции: Пер. с нем. Л.Н. Казанцевой. Под ред. Г.В. Резникова. М.: Техносфера: Евроклимат, 2008. 231 с.

22. Tabatabaian M. COMSOL®5 for Engineers // Dulles, VA: Mercury learning and information, 2015. 335 p.

23. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика (Основы механики жидкости). Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Стройиздат. 1975. 323 с.

Информация об авторах

Елистратова Юлия Васильевна, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: tgv.info@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Крюков Илья Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: iliya.krukov@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Уваров Валерий Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: tgv.info@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Коверина Варвара Юрьевна, студент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: v.k.232128@ya.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 15.03.2026 г.

© Елистратова Ю.В., Крюков И.В., Уваров В.А., Коверина В.Ю., 2026

Elistratova Yu.V., Kryukov I.V., Uvarov V.A., Koverina V.Yu.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
**Email: tgv.info@mail.ru.*

CFD SIMULATION OF FLUID FLOW IN AN OPTIMIZED TEE

Abstract. *This article presents the results of a numerical study of the effect of varying tee wall concavity heights on the local resistance coefficient. The relevance of the study lies in reducing the energy consumption of ventilation and air conditioning systems. Fluid flow simulation was performed using computational fluid dynamics methods in the COMSOL Multiphysics 5.6 software package. The problem was solved in a three-dimensional steady-state formulation. When setting up the computational grid, the local resistance coefficient results were compared in order to eliminate the influence of the grid size and select an appropriate grid level for the calculation. Velocity distribution profiles were obtained for different tee wall concavity to channel height ratios. The numerical study found that with a concavity to channel height ratio of 0.15–0.25, the local resistance coefficient of the optimized tee decreases by almost 12% compared to the standard tee design. With a ratio of 0.05 to 0.1, the local resistance coefficient decreases from 5.8 to 8.7 %. As the insertion height increases beyond 0.25, the local resistance coefficient begins to increase due to a decrease in the tee's flow capacity and an overall increase in resistance. These results demonstrate the effectiveness of the optimized tee design in ventilation and air conditioning systems.*

Keywords: *ventilation, energy saving in ventilation, symmetrical tee, optimized tee, local resistance coefficient, pressure loss reduction, computational fluid dynamics, numerical modeling.*

REFERENCES

1. Hu Sh., Yan D., Guo S., Cui Y., Dong B. A survey on energy consumption and energy usage behavior of households and residential building in urban China. Energy Build. 2017. Vol. 148. Pp. 366–378. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.03.064.

2. Tsinghua Building Energy Research Center, Annual Report on China, Building Energy Efficiency, China architecture and building press. Beijing, China. 2014.

3. Ziganshin A.M., Logachev K.I. Vortex ventilation. Profiled elements of ventilation systems with reduced energy intensity [Vihrevaya ventilyaciya. Profilirovannye elementy sistem ventilyacii snizhennoj energoemkosti]. Moscow; Izhevsk: Institute of Computer Research. 2022. 336 p. (rus)

4. Idelchik I.E. Handbook of hydraulic resistance. Ed. by M.O. Shteynberg. 3rd ed., revised and enlarged [Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam. Pod red. M.O. Shtejnberga. 3-e. izd., pererab. i dop.]. Moscow: Mashinostroenie. 1992. 672 p. (rus)

5. Ziganshin A.M., Badykova L.N. Numerical Simulation of Flow in a Profiled Ventilation Tee at Confluence [Chislennoe modelirovanie techeniya v profilirovannom ventilyacionnom trojnike na sliyanie]. News of Universities. Construction. 2017. No. 6. Pp. 41–48. (rus)

6. 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. Building and Environment. 2018. Vol. 129. Pp. 130–141. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.11.023.

7. Gao R., Zhang H., Li A., Liu K., Yu Sh., Deng B. A novel low-resistance duct tee emulating a river course. Building and Environment. 2018. Vol. 144. Pp. 295–304. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.08.034.

8. Gao R., Wang M., Guo W., Zhang S., Wen Sh., Wu D., Zhou H., Li A. Study of the shape optimization of a variable diameter in a ventilation and air-conditioning duct based on the Boltzmann function. Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 43. 102833. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102833.

9. 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. Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 132. Pp. 790–800. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.12.107.

10. 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.

11. Liu Y., Gao R., Zhang Z., Zhu W., Zhou L., Jing R., Zheng Q., Li A., Study on resistance reduction in a jugular profiled bend based on entropy increase analysis and the field synergy principle. Building and Environment. 2021. Vol. 203. P. 108102. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.02.006.

12. Jing R., Song B., Gao R., Yang Ch., Hao X. A variable gradient descent shape optimization method for guide tee resistance reduction. Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 95. 110161. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.110161.

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

14. Ziganshin A.M., Batrova K.E., Gimadieva G.A., Logachev K.I., Averkova O.A. Improving the energy efficiency of ventilation systems through the profiling of shaped elements [Povyshenie energoeffektivnosti sistem ventilyacii posredstvom profilirovaniya fasonnyh elementov]. Construction and technological safety. 2019. No. 15 (67). Pp. 111–123. (rus)

15. Malanichev I., Akhmadiev F. Pressure loss reduction in ventilation ducts by shape optimization of the removable profiled components. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 890. 012154. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012154.

16. Ziganshin A.M., Karimullin T.L., Logachev K.I., Kareeva Yu.R. Outlines of vortex zones and the development of energy-efficient crosses for exhaust ventilation systems [Ochertaniya vihrevyh zon i razrabotka energoeffektivnyh krestovin vytyazhnyh ventilyacionnyh sistem]. News of universities. Construction. 2024. No. 9. Pp. 77–87. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-789-9-77-87. (rus)

17. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Kryukova O.S., Averkova O.A., Kryukov I.V., Gol`tsov A.B. Improving dust capture efficiency with local exhaust hoods in manicure shops. Building and Environment. 2020. Vol. 181. 107124. DOI 10.1016/j.buildenv.2020.107124.

18. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Popov E.N., Averkova O.A., Kryukova O.S., Gol`tsov A.B. Experiment determining pressure loss reduction using a shaped round exhaust hood. Building and Environment. 2021. Vol. 190. 107572. DOI 10.1016/j.buildenv.2020.107572.

19. 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 [Chislennoe issledovanie snigenia koefficienta mestnogo soprotivlenia troynika na razdelenie potoka]. Vestnik MGSU. 2026. Vol. 21. Issue 2. Pp. 257–268. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.257-268. (rus)

20. Grachev I.G., Pirogov S.Yu., Savishchenko N.P., Yuryev A.S. Handbook of calculations of hydraulic and ventilation systems. Ed. by Yuryev A.S. [Spravochnik po raschetam gidravlicheskih i ventilyacionnyh system. Pod red. Yur'eva A.S.]. St. Petersburg: ANO NPO "Mir i Semya". 2001. 1154 p. (rus)

21. Becker A. Ventilation Systems: Translated from German by L.N. Kazantseva. Ed. by G.V. Reznikov [Sistemy ventilyacii: Per. s nem. L.N. Kazancevoj. Pod red. G.V. Reznikova]. Moscow: Tekhnosfera: Evroklimat. 2008. 231 p. (rus)

22. Tabatabaian M. COMSOL®5 for Engineers. Dulles, VA: Mercury learning and information. 2015. 335 p.

23. Altshul A.D., Kiselev P.G. Hydraulics and Aerodynamics (Fundamentals of Fluid Mechanics) [Gidravlika i aerodinamika (Osnovy mekhaniki zhidkosti)]. Textbook for Universities. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Stroyizdat. 1975. 323 p. (rus)

Information about the author

Elistratova, Yulia V. PhD, Assistant professor. E-mail: tgv.info@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kryukov, Ilia V. PhD, Assistant professor. E-mail: iliya.krukov@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Uvarov, Valery A., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation. E-mail: tgv.info@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova Street, 46.

Koverina, Varvara Iu. Bachelor student. E-mail: v.k.232128@ya.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 13.03.2026

Для цитирования:
Елистратова Ю.В., Крюков И.В., Уваров В.А., Коверина В.Ю. CFD-моделирование движения текучей среды в оптимизированном тройнике // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 9. С. 45–54. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-45-54

For citation:
Elistratova Yu.V., Kryukov I.V., Uvarov V.A., Koverina V.Yu. CFD simulation of fluid flow in an optimized tee. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 9. Pp. 45–54. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-45-54