

УДК 697.922.26.001.2

А.М. ЗИГАНШИН, Т.Л. КАРИМУЛЛИН, Э.И. ЯГФАРОВ

**НАСТРОЙКА ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ  
О ТЕЧЕНИИ ВОЗДУХА В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ КРЕСТОВИНАХ**

Работа посвящена разработке новых энергоэффективных конструкций фасонных элементов, которую рационально проводить при помощи компьютерного моделирования, для чего на первом этапе необходима настройка численного решения – ее верификация и валидация. В статье приводятся результаты настройки численной модели течения воздуха в приточной и вытяжной крестовинах с проверкой широко используемых моделей турбулентности и пристеночных функций. Найдены наиболее адекватные сочетания, но в некоторых случаях отмечаются отличия от экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** крестовина, численное исследование, сопротивление, вихревая зона.

DOI 10.32683/0536-1052-2021-752-8-42-49

**Введение.** Основная часть потерь давления в сетях систем вентиляции происходит в фасонных деталях. В настоящее время существует значительное количество исследований по снижению аэродинамического сопротивления отводов [1, 2] и тройников [3, 4], но нет работ для такой часто используемой на практике детали, как крестовина.

Для исследования течения наиболее рационально численное моделирование, которое позволит найти необходимые очертания вихревых зон, но и потребует подробной настройки компьютерной модели и валидации ее результатов [5]. Для этого будут использоваться известные экспериментальные данные по сопротивлению крестовин, приведенные в [6].

**Методы исследования.** В работе исследуется течение в вытяжной и проточной неравносторонних крестовинах. Решение задачи производится в программе *Fluent* (пакет *ANSYS® Academic Research Mechanical and CFD, Release 18.2*) в двухмерной турбулентной постановке. Для валидации численного решения используются три модели турбулентности: «стандартная»  $k-\epsilon$  (*SKE*),  $k-\omega$  (*SST*) и «Рейнольдсовых напряжений» (*RSM*). Из-за влияния моделирования пограничного слоя на решение о течении в канале также проверяются два варианта пристеночного моделирования – «стандартные» пристеночные функции (*Standard Wall Functions – SWF*) и расширенное пристеночное моделирование (*Enhanced Wall Treatments – EWT*).

При расчете с использованием модели «Рейнольдсовых напряжений» (*RSM*) в сочетании с расширенным пристеночным моделированием (*EWT*) решение получить не удалось, так как программа выдавала ошибку. Граничные условия (ГУ) задачи определены следующим образом: участок *AB* – приточная (рис. 1, *a*) или вытяжная (рис. 1, *б*) граница со скоростью течения  $u_0 = 30$  м/с (ГУ «*velocity-inlet*»), участки *DE*, *GH* и *JK* – свободные границы, через которые воздух вытекает из приточной крестовины (рис. 1, *a*) или втекает в вытяжную крестовину (рис. 1, *б*) – ГУ «*pressure-inlet*», с установкой

© Зиганшин А.М., Каримуллин Т.Л., Ягфаров Э.И., 2021

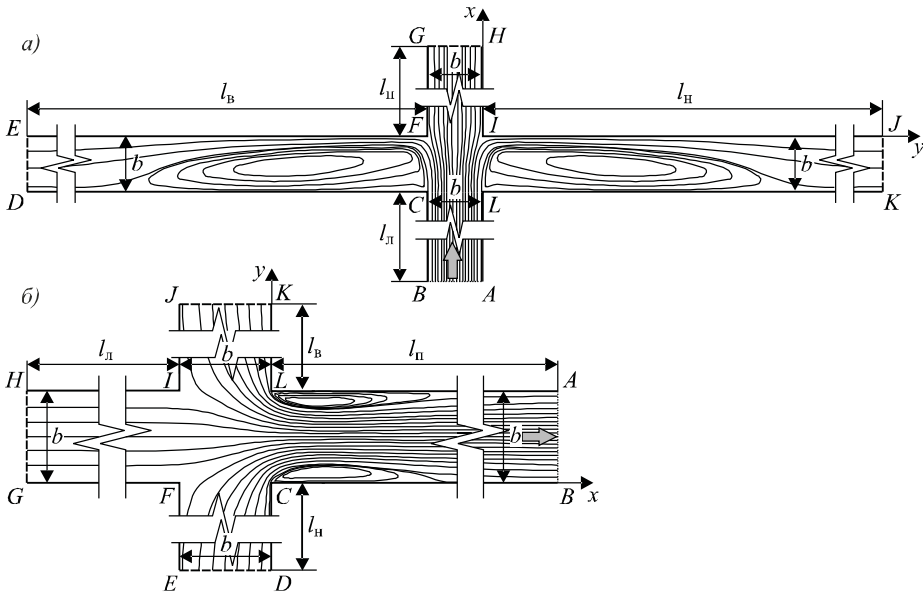


Рис. 1. Геометрия расчетной области и характерные линии тока течения

избыточного давления, равным нулю, остальные границы непроницаемые стенки – ГУ «wall». Построение геометрии выполнялось в программе *Gambit*. Основные размеры крестовины:  $b = 0,1$  м;  $l_{\text{л}} = 2$  м;  $l_{\text{н}} = l_{\text{в}} = l_{\text{п}} = 8$  м для приточного и  $l_{\text{л}} = l_{\text{н}} = l_{\text{в}} = 2$  м;  $l_{\text{п}} = 8$  м для вытяжного тройника. На рис. 1 приведена геометрия расчетной области для приточного (а) и вытяжного (б) тройников и характерные линии тока течения.

Видны отрывные зоны, образующиеся при срыве потока с острых кромок. На первом этапе было проведено исследование на «сеточную сходимость», проводились адаптации – измельчение сетки, при которых на каждом этапе решалась задача и определялся коэффициент местного сопротивления (КМС) крестовины. Первые 7–8 адаптаций проводились для всей расчетной области тройника, а далее вдоль твердых границ для правильного моделирования пограничного слоя и определения потерь давления.

**Результаты.** В результате исследования за окончательную принимается задача после 11 этапов измельчения сетки при достижении безразмерным параметром  $y^*$  для *SWF* и  $y^+$  для *EWT* [7] значения порядка 1. При этом количество расчетных ячеек составило 5,32 млн шт. Таким образом решаются задачи для всех указанных сочетаний моделей турбулентности и способов пристеночного моделирования – совмещенная верификация и валидация. Для определения значений КМС первоначально во всех каналах были построены сечения через каждые 0,05 м. В них установлены значения полного давления осредненные по расходу –  $P_{\text{л}}$ ,  $P_{\text{в}}$ ,  $P_{\text{п}}$ ,  $P_{\text{с}}$  (соответственно в левом, нижнем и верхнем ответвлениях и в стволе). По этому распределению давления определены значения среднего удельного падения давления  $R$ , которое затем используется для нахождения падения давления на трение:  $\Delta P^{\text{тр}} = Rl$ , где  $R$  и  $l$  удельные потери давления и длины соответствующих каналов [7].

Значения КМС определялись по формулам:

$$\zeta_{\text{в}} = \frac{P_{\text{в}} - P_{\text{п}} - \Delta P_{\text{в}}^{\text{тр}} - \Delta P_{\text{п}}^{\text{тр}}}{(\rho u_0^2 / 2)} \text{ – для верхнего ответвления;} \quad (1)$$

$$\zeta_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}} - P_{\text{п}} - \Delta P_{\text{н}}^{\text{тр}} - \Delta P_{\text{п}}^{\text{тр}}}{(\rho u_0^2 / 2)} - \text{для нижнего ответвления}; \quad (2)$$

$$\zeta_{\text{п}} = \frac{P_{\text{л}} - P_{\text{п}} - \Delta P_{\text{л}}^{\text{тр}} - \Delta P_{\text{п}}^{\text{тр}}}{(\rho u_0^2 / 2)} - \text{для прямого прохода}. \quad (3)$$

Здесь  $\zeta_{\text{в}}$ ,  $\zeta_{\text{н}}$ ,  $\zeta_{\text{п}}$  – КМС соответственно для верхнего, нижнего ответвлений и для прямого прохода. Поскольку в крестовинах моделировалось симметричное течение с точностью до третьего знака, значения КМС на боковых ответвлениях были равны между собой, используется одно значение, обозначенное  $\zeta_{\text{б}}$ .  $P_{\text{в}}$ ,  $P_{\text{н}}$ ,  $P_{\text{л}}$  – полное давление, соответственно в начале верхнего, нижнего, левого ответвлений;  $P_{\text{п}}$  – давление в конце канала по прямому проходу;  $\Delta P_{\text{в}}^{\text{тр}}$ ,  $\Delta P_{\text{н}}^{\text{тр}}$ ,  $\Delta P_{\text{л}}^{\text{тр}}$  – потери давления на трение соответственно в верхнем, нижнем и левом ответвлениях;  $\Delta P_{\text{п}}^{\text{тр}}$  – потери давления на трение в канале по прямому проходу;  $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха.

Результаты расчета КМС для всех исследованных сочетаний моделей представлены на рис. 2. Избыточные давления на входных границах для вытяжного тройника и на выходных границах для приточного приняты равными нулю. При этом для разных сочетаний моделей получаются различные

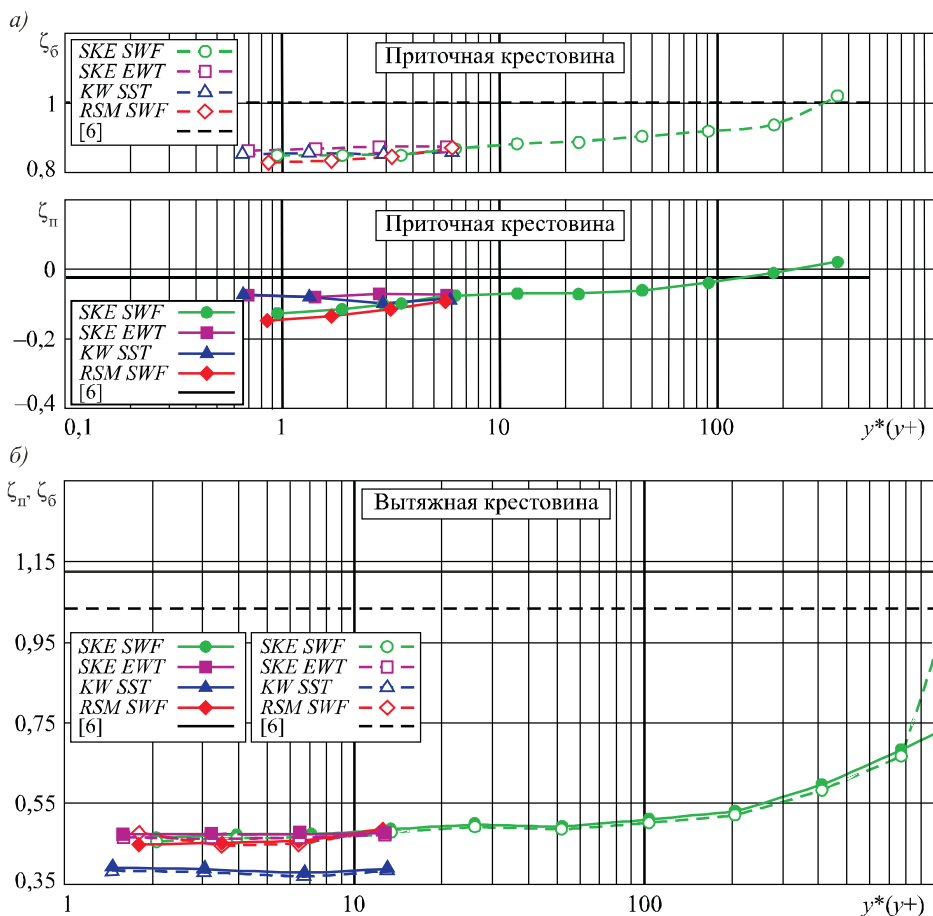


Рис. 2. Валидация и верификация по значениям КМС

Значения отношений расходов  $G_6/G_c$

Сочетание моделей	$G_6 / G_c$ для крестовины	
	приточной	вытяжной
<i>SKE SWF</i>	0,1723	0,3508
<i>SKE EWT</i>	0,1323	0,3562
<i>KW SST</i>	0,1206	0,3498
<i>RSM SWF</i>	0,1530	0,3487

соотношения расходов воздуха, протекающего по боковому ответвлению  $G_6$  к общему расходу  $G_c$  (таблица).

В зависимости от сочетания моделей при одном и том же давлении в начале каналов отличаются получаемые отношения расходов  $G_6 / G_c$ , причем если для вытяжной крестовины отличие около 2 %, то для приточной около 30 %. Это говорит о существенном различии сопротивления и характеристик течения в крестовинах при использовании разных сочетаний моделей.

По изменению КМС на рис. 2 видно, что все сочетания приводят к постоянному значению КМС при измельчении сетки, т. е. при значениях  $y^*(y^+) < 3$  наблюдается «сеточная сходимость». Для случая приточной крестовины, для которого в [6] нет сведений и рекомендуется принимать КМС по данным приточных тройников, соглашение с результатами численных исследований удовлетворительное, и наиболее близкое значение как на проход, так и на боковое ответвление, получено в сочетании *SKE EWT*:  $\zeta_{\text{п}} = -0,0737$ ;  $\zeta_6 = 0,863$  в численном решении, и  $\zeta_{\text{п}} = -0,0224$ ;  $\zeta_6 = 1,002$  согласно [6]. Для значения КМС на проход видно существенное отличие около 70 %, а для КМС на ответвление хорошая сходимость – отличие менее 14 %. Для КМС на проход такое существенное отличие можно объяснить близостью значения КМС к нулю.

Обратная ситуация наблюдается для вытяжной крестовины, где в [6] приведены данные специальных исследований крестовин [8, 9]. Наиболее близкие к [6] значения получаются при использовании сочетания *SKE EWT* ( $\zeta_{\text{п}} = 0,474$ ;  $\zeta_6 = 0,466$ ), но как для КМС на проход, так и для КМС на боковое ответвление отличие от [6], где  $\zeta_{\text{п}} = 1,125$ ;  $\zeta_6 = 1,035$ , составляет от 31 до 55 %. К сожалению, больше таких систематических данных о течении в крестовине не найдено. Например, в известном за рубежом справочнике по гидравлическим сопротивлениям [10] приводятся данные только по приточным крестовинам, согласно которым  $\zeta_6 = 1,012$  (рис. 3, а);  $\zeta_{\text{п}} = 0,0053$  (рис. 3, б). В [11] имеются данные для приточных крестовин:  $\zeta_6 = 54,7$  (рис. 3, в);  $\zeta_{\text{п}} = -0,035$  (рис. 3, г), а также некоторые данные для вытяжной крестовины:  $\zeta_6 = 0,047$  (рис. 3, д). Видно, что все данные существенно различаются между собой, что может быть следствием разных условий проведения эксперимента. Например, в [11] указано, что при исследованиях использовались тройники с закруглением острых кромок в местах соединения и поэтому ожидалось, что значения КМС будут меньше, чем для острых, приведенных в [6], однако КМС на боковом ответвлении во много раз выше.

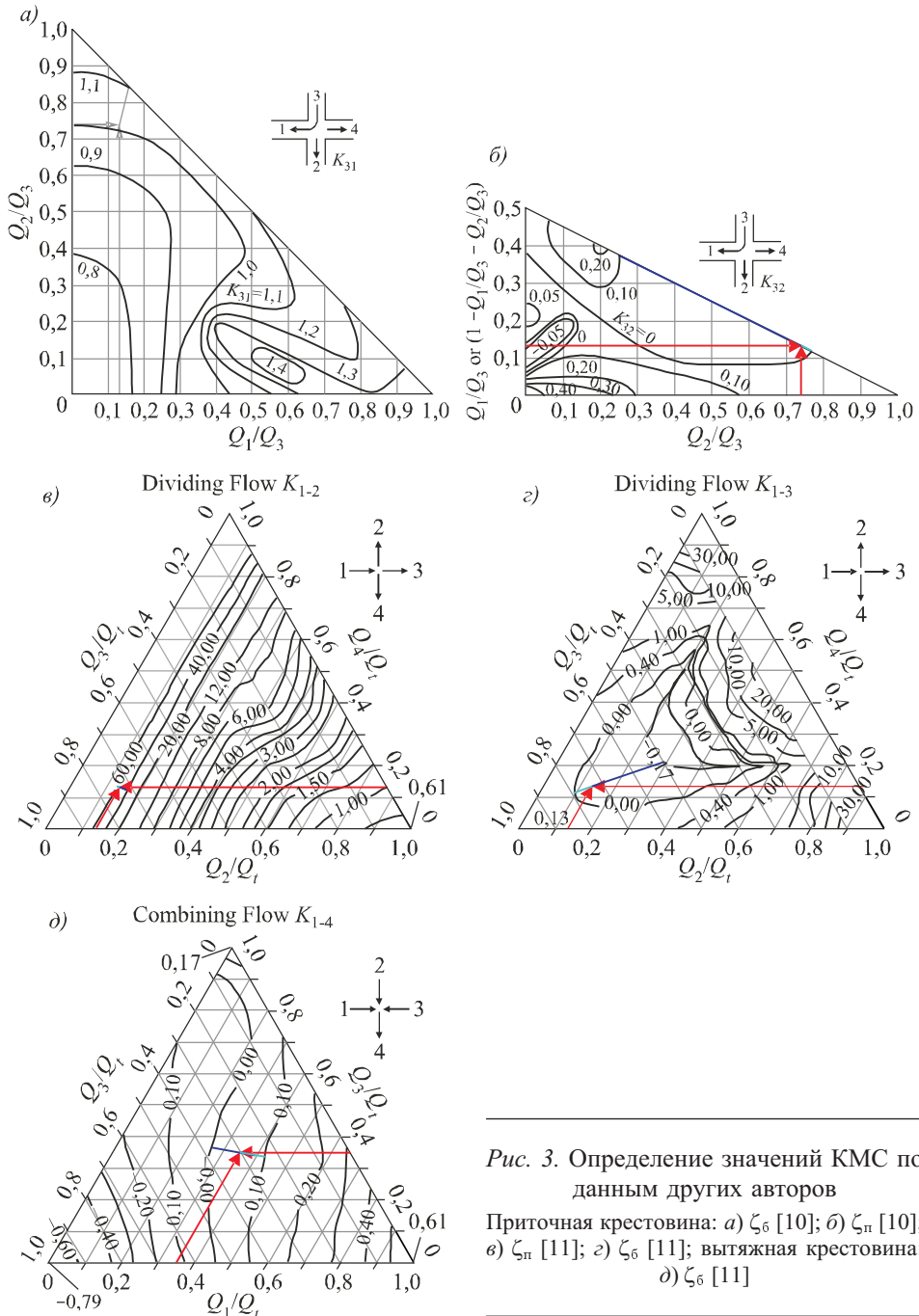


Рис. 3. Определение значений КМС по данным других авторов  
 Приточная крестовина: а)  $\zeta_6$  [10]; б)  $\zeta_{\pi}$  [10];  
 в)  $\zeta_{\pi}$  [11]; г)  $\zeta_6$  [11]; вытяжная крестовина:  
 д)  $\zeta_6$  [11]

По результатам численного решения задач построены очертания вихревых зон (ВЗ) для вытяжной (рис. 4, а) и приточной (рис. 4, б) крестовин.

Полученные результаты можно разделить на две группы качественно схожих очертаний ВЗ. Для вытяжной крестовины в первой группе два сочетания моделей – *SKE SWF* и *SKE EWT*, при использовании которых вихревая зона имеет длину около  $1,3b$ . Во второй группе – результаты моделирования с помощью сочетаний *KW SST* и *RSM SWF*, при использовании которых

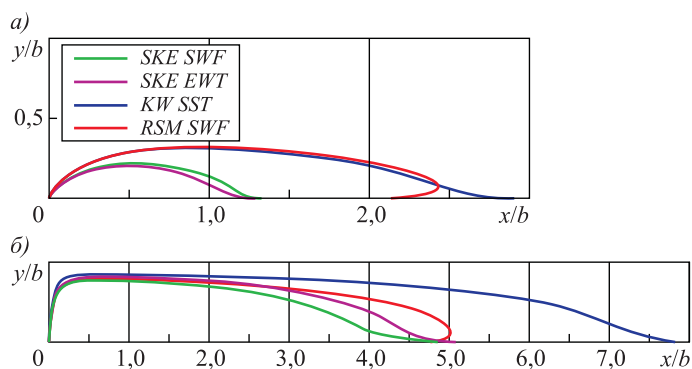


Рис. 4. Очертания вихревых зон при использовании разных моделей

размеры ВЗ существенно больше как в глубину, так и в длину (около  $2,5b$ ). Для приточной крестовины в одну группу попали сочетания *SKE SWF*, *SKE EWT* и *RSM SWF* с длиной ВЗ около  $4,5b$ , а с использованием модели *KW SST* длина ВЗ получилась около  $7,7b$ . Нужно отметить, что очертания, полученные в сочетании *RSM SWF*, отличаются от остальных обратным углом наклона касательной в точке замыкания ВЗ на стенке, а модель *KW SST* – существенно большими размерами. Это обстоятельство и результаты, полученные при определении КМС, позволяют с большой долей вероятности сделать вывод о наиболее применимом в данном случае сочетании модели турбулентности «стандартная»  $k$ - $\epsilon$  и расширенного пристеночного моделирования.

**Заключение.** Для решения задачи о течении в вентиляционных фасонных элементах в виде приточной и вытяжной крестовин и дальнейшей разработки их усовершенствованных энергоэффективных профилированных конструкций необходима подробная настройка компьютерной модели с проверкой получаемых результатов с известными данными. Параметры, которые должны проверяться, это значения КМС и очертания вихревых зон. По этим параметрам в удовлетворительном согласии с известными данными и между собой находятся результаты, полученные при использовании сочетания стандартной  $k$ - $\epsilon$  модели турбулентности и расширенного пристеночного моделирования, но нужно отметить некоторое отличие для отдельных случаев. Поэтому дальнейшее развитие исследований будет заключаться в моделировании течения через крестовины при широком изменении расходов воздуха, с определением зависимостей для КМС и очертаний вихревых зон и сравнения с данными других авторов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gao R. et al. Biomimetic duct tee for reducing the local resistance of a ventilation and air-conditioning system // *Build. Environ.* 2018. Vol. 129. P. 130–141.
2. Зиганшин А.М., Беляева Е.Э., Соколов В.А. Снижение потерь давления при профилировании острого отвода и отвода с нишей // *Изв. вузов. Строительство.* 2017. № 1. С. 108–116.
3. Gao R. et al. 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.

4. Зиганшин А.М., Бадыкова Л.Н. Численное моделирование течения в профилированном вентиляционном тройнике на слияние // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 6. С. 41–48.
5. Солодова Е.Э. Особенности численного моделирования течений в Z-образных отводах систем вентиляции и кондиционирования зданий и сооружений // Изв. Казан. гос. архитектурно-строит. ун-та. 2021. Т. 55, № 1. С. 71–84.
6. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
7. Посохин В.Н., Зиганшин А.М., Мударисов Д.И. О протяженности зон влияния возмущающих элементов трубопроводных систем // Изв. КазГАСУ. 2014. Т. 28, № 2. С. 121–126.
8. Левин С.П. Смещение потоков в крестообразных соединениях трубопроводов // Труды ЛТИ им. С.М. Кирова. 1954. № 5. С. 80–95.
9. Левин С.П. Новый метод теоретического определения гидравлических сопротивлений при смешении потока в трубопроводах // Труды ЛТИ им. С.М. Кирова. 1955. № 6. С. 119–140.
10. Miller D.S. Internal flow systems // Cranfield U.K., BHRA. 1990. No. 2 nd. Ed., 1990. 396 p.
11. Sharp Z.B. et al. Energy losses in cross junctions // J. Hydraul. Eng. 2010. Vol. 136, No. 1. P. 50–55.

**Зиганшин Арслан Маликович**, д-р техн. наук, доц.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

**Каримуллин Тимур Леонардович**, студ.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

**Ягфаров Эмиль Исмагилович**, студ.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 26.07.2021

**Ziganshin Arslan Malikovich**, DSc, Ass. Professor

Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

**Karimullin Timur Leonardovich**, Student

Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

**Yagfarov Emil' Ismagilovich**, Student

Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

## **SETTING A NUMERICAL SOLUTION TO THE PROBLEM OF AIR FLOW IN VENTILATION CROSS JUNCTIONS**

The development of new energy-efficient designs of the duct fittings is best carried out with the help of computer modeling, when at the first place it is necessary to set up the numerical solution – its verification and validation. The given work presents the results of the air flow numerical model setting in the supply and exhaust cross junctions, with verification of widely used models of turbulence and near-wall functions. The most appropriate combinations have been found, but in some cases a number of differences from experimental studies can be observed.

**Key words:** cross junctions, numerical study, resistance, vortex zone.

### **REFERENCES**

1. Gao R. et al. Biomimetic duct tee for reducing the local resistance of a ventilation and air-conditioning system. Build. Environ. 2018. Vol. 129. Pp. 130–141.

2. *Ziganshin A.M., Belyaeva E.E., Sokolov V.A.* Snizheniye poter' davleniya pri profilirovaniy ostrogo otvoda i otvoda s nishey [Pressure losses reduction with profiling of sharp elbow and elbow with dead-end]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 1. Pp. 108–116. (in Russian)
3. *Gao R. et al.* A novel low-resistance tee of ventilation and air conditioning duct based on energy dissipation control. *Appl. Therm. Eng.* 2018. Vol. 132. Pp. 790–800.
4. *Ziganshin A.M., Badykova L.N.* Chislennoye modelirovaniye techeniya v profilirovannom ventilyatsionnom troynike na sliyaniye [Numerical investigation of flow in profiled ventilation tee at junction]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 6. Pp. 41–48. (in Russian)
5. *Solodova E.E.* Osobennosti chislenogo modelirovaniya techeniy v Z-obraznykh otvodakh sistem ventilyatsii i konditsionirovaniya zdaniy i sooruzheniy [Features of flows numerical modelling in Z-shaped elbows of ventilation and air conditioning systems of buildings and structures]. *Izvestiya KGASU* [News of KSUAE]. 2021. Vol. 55, No. 1. Pp. 71–84. (in Russian)
6. *Idel'chik I.E.* Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Hydraulic Resistance Handbook]. Moscow, Mashinostroeniye, 1992. 672 p. (in Russian)
7. *Posohin V.N., Ziganshin A.M., Mudarisov D.I.* O protyazhennosti zon vliyaniya vozmushchayushchikh elementov truboprovodnykh sistem [The influence zones of disturbing elements in pipeline systems]. *Izvestiya KGASU* [News of KSUAE]. 2014. Vol. 28, No. 2. Pp. 121–126. (in Russian)
8. *Levin S.R.* Smesheniye potokov v krestoobraznykh soedineniyakh truboprovodov [Mixing of streams in cross-shaped connections of pipelines]. *Trudy LTI im. S.M. Kirova* [Works of LTI named after S.M. Kirov]. 1954. No. 5. Pp. 80–95. (in Russian)
9. *Levin S.R.* Novyy metod teoreticheskogo opredeleniya gidravlicheskikh soprotivleniy pri smeshenii potoka v truboprovodakh [New method of theoretical determination of hydraulic resistance during mixing of flow in pipelines]. *Trudy LTI im. S.M. Kirova* [Works of LTI named after S.M. Kirov]. 1955. No. 6. Pp. 119–140. (in Russian)
10. *Miller D.S.* Internal flow systems. Cranfield, U.K., BHRA. 1990. No. 2 nd. Ed., 1990. 396 p.
11. *Sharp Z.B. et al.* Energy losses in cross junctions. *J. Hydraul. Eng.* 2010. Vol. 136, No. 1. Pp. 50–55.