

УДК: 697.92
DOI: 10.52409/20731523_2023_4_346
EDN: XOQLXY



Постановка задачи о течении в узле, состоящем из вытяжного отверстия и колена на 90°

Ю.Р. Кареева¹, А.М. Зиганшин¹, М.Б. Чухлова¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* При проектировании систем вентиляции в современных зданиях все чаще встречаются нетиповые схемы, включающие в себя большое количество фасонных элементов. При этом, выполнение аэродинамического расчета проводится с использованием коэффициентов местного сопротивления одиночных элементов, когда их взаимное влияние друг на друга не учитывается. *Целью* исследования является определение влияния настроек и моделей вычислительного комплекса на адекватность моделирования течения в узле, состоящем из последовательно расположенных вытяжного отверстия и колена. Для достижения поставленной цели решаются следующие *задачи*: определение влияния настроек численной модели на сходимость итерационного процесса; валидация значений коэффициентов местного сопротивления и очертаний вихревых зон, получаемых при использовании разных сочетаний моделей турбулентности и пристеночных функций, средней скорости в вытяжном канале, для конструктивных вариантов – «прямой», «длинный» и «короткий» канал.

Результаты. Определено влияние комбинации моделей турбулентности и пристеночных функций на адекватность полученного течения в узле, содержащем колено и вытяжное отверстие при разных скоростях, получены картины течений и очертания вихревых зон для рассматриваемых конфигураций узла, рассчитаны коэффициенты местных сопротивлений.

Выводы. Полученные результаты исследования говорят о том, что близко расположенные элементы оказывают значительное влияние на общее сопротивление узла. Этот факт необходимо учитывать при выполнении аэродинамического расчета систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

Ключевые слова: вентиляция, вытяжное отверстие, колено, вычислительная гидродинамика, вихревые зоны, коэффициент местного сопротивления

Для цитирования: Кареева Ю.Р., Зиганшин А.М., Чухлова М.Б. Постановка задачи о течении в узле, состоящем из вытяжного отверстия и колена на 90° // Известия КГАСУ, 2023, № 4(66), с. 346-356, DOI: 10.52409/20731523_2023_4_346, EDN: XOQLXY

Statement of the problem of the flow in a node consisting of an exhaust hole and a 90° elbow

Yu.R. Kareeva¹, A.M. Ziganshin¹, M.B. Chukhlova¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* When designing ventilation systems in modern buildings, atypical schemes that include a large number of shaped elements are increasingly used. At the same time, the aerodynamic calculation is carried out using the local drag coefficients of single elements, when their mutual influence on each other is not taken into account. The purpose of

the study is to determine the influence of the settings and models of the computer modelling software on the adequacy of modeling the flow in a node consisting of a sequentially located exhaust opening and elbow. To achieve this goal, the following tasks are solved: determining the influence of the numerical model settings on the convergence of the iterative process; validation of the local drag coefficients values and outlines of the vortex zones obtained using different combinations of turbulence models and wall functions, average velocities in the exhaust channel, for design options - "straight", "long" and "short" channel.

Results. The influence of the combination of turbulence models and wall functions on the adequacy of the resulting flow in a node containing an elbow and an exhaust opening at different velocities was determined, flow patterns and outlines of the vortex zones were obtained for the considered node configurations, and local drag coefficients were calculated.

Conclusions. The results of the study indicate that closely spaced elements have a significant impact on the overall resistance of the node. This fact must be taken into account when performing aerodynamic calculations of ventilation and air conditioning systems.

Keywords: ventilation, exhaust opening, elbow, computational fluid dynamics, vortex zones, local drag coefficient

For citation: Kareeva Yu.R., Ziganshin A.M., Chukhlova M.B. Statement of the problem of the flow in a node consisting of an exhaust hole and a 90° elbow // News KSUAE, 2023, № 4(66), p.346- 356, DOI: 10.52409/20731523_2023_4_346, EDN: XOQLXY

1. Введение

В современном строительстве все больше нетиповых архитектурных и конструктивных решений, что приводит и к нетиповым схемам инженерных систем. В частности, такие системы, в том числе и системы вентиляции сильно разветвлены и включают в себя большое количество фасонных элементов. Для систем вентиляции, стандартные «острые» фасонные элементы являются основными источниками потерь давления в сети воздуховодов, которые возникают из-за существенной деформации потока в них, а также из-за образования вихревых зон при срыве потока с острых кромок таких элементов. Это приводит к завышенным затратам электроэнергии на приводы установок как систем вентиляции [1], так и газоходов теплоэнергетических систем [2]. Имеется большое разнообразие фасонных элементов, их конструктивных исполнений и комбинаций. Приточные и вытяжные решетки, установленные в помещениях, могут быть присоединены к воздуховодам не только непосредственно или через камеры статического давления, но и с использованием нескольких фасонных элементов. Ясно, что, в таком случае близко расположенные фасонные элементы оказывают влияние друг на друга. Однако вопросу взаимного влияния фасонных элементов как с точки зрения суммарного сопротивления таких узлов, так и с точки зрения особенностей течений и вихреобразования в них уделяется мало внимания. В специальной справочной литературе есть лишь отрывочные сведения, которые для некоторых сочетаний фасонных элементов, например двух последовательно расположенных друг за другом колен, указывают на существенно увеличенное сопротивление при небольших расстояниях между ними [3]. В то время как обычно существующие экспериментальные, численные и аналитические исследования, обычно рассматривают течение воздуха в различных фасонных элементах, расположенных изолированно друг от друга (одиночных), с выдерживанием между ними достаточных по длине прямых участков. Кроме того в практике проектирования вообще взаимное влияние на сопротивление фасонных элементов не учитывают, а данные об очертаниях вихревых зон и их зависимостей от расстояния между отдельными фасонными элементами в узле имеются только для спаренных колен [4,5]. Поэтому актуальным является расширение конфигураций часто используемых на практике вариантов сочетаний фасонных элементов, как для исследования закономерностей течений в них, так и для повышения точности аэродинамических расчетов систем вентиляции путем корректировки данных о сопротивлении узлов из близкорасположенных фасонных элементов, в частности вытяжных отверстий и следующих за ними коленами на 90°.

На сегодняшний день для исследования течений жидкости в сложных случаях широко используется численный эксперимент с использованием программных комплексов реализующих методы вычислительной гидродинамики (ВГД, CFD). Однако, одним из важных условий является корректная установка граничных условий, моделей турбулентности и т.д. – нахождения их определенного сочетания – разработка численной модели, такой чтобы получаемые результаты соответствовали достоверно известным. Этот этап обычно называют валидацией численной (компьютерной) модели.

Известны исследования, посвященные валидации численной модели течения в фасонных элементах систем вентиляции, в которых, в качестве моделей турбулентности чаще всего используются двухпараметрические модели - «стандартная $k-\epsilon$ » или «стандартная» или SST $k-\omega$ [6]. Кроме этого в некоторых случаях используется модель с пятью параметрами – модель Рейнольдсовых напряжений (Reynolds Stress Model, RSM), которая считается более подробно учитывающей сложные особенности течения возникающие при отрывах, вращательном движении и при изменении кривизны поверхности в направлении потока [7].

В исследованиях [8,9] представлены результаты исследования течения в канале с приточным торцевым отверстием присоединенным к магистральному воздуховоду посредством колена на 90° . Валидация решения показала, что более точные результаты получаются при использовании «стандартной» $k-\epsilon$, а при использовании модели RSM задача расходится. Определено, что при исследованных относительных расстояниях между отводом и приточным отверстием (l/b , где b - ширина канала) изменяющихся от 2,5 до 8 значение коэффициента местного сопротивления (КМС) узла наблюдается выше, чем сумма одиночных КМС колена и приточного отверстия с решеткой. При изменении расстояния между фасонными элементами КМС узла также меняется. Аналогично показана зависимость и относительной осевой скорости от расстояния между элементами.

В то же время аналогичная ситуация по определению взаимного влияния отверстия и колена, но для случая вытяжной системы не рассматривалась. В этом случае будет интересно определять зависимость от расстояния между элементами, как для КМС, так и для очертаний вихревых зон. Такие исследования имеют большой потенциал при усовершенствовании фасонных элементов систем вентиляции с целью снижения их аэродинамического сопротивления. Сейчас большое внимание уделяется снижению энергопотребления, в том числе системами вентиляции. При этом основные потери давления в сети воздухопроводов приходится на местные потери, то есть потери, связанные с аэродинамическим несовершенством узлов резкого изменения и деформации потоков. Имеется большое количество исследований по снижению сопротивления фасонных элементов, которые можно условно разделить на две группы. К первой группе можно отнести способы, связанные с включением в конструкцию различных разделяющих экранов и направляющих лопаток. При использовании таких лопаток в разных конструкциях тройников авторам удалось снизить сопротивление проходу жидкости через тройник на величины от 30 до 40% на вытяжных [10–12] и от 4 до 80% на приточном [13] тройниках. Для отводов подобное усовершенствование приводит к снижению КМС на величину около 25% [14]. Ко второй группе можно отнести все виды изменения формы стенок фасонных элементов, здесь имеется ряд исследований по оптимизации формы внутренней и наружной дуг образующих отвод перебором разных вариантов, по сетке нанесенной рядом со стандартными дугами окружности [15]. Кроме этого можно выделить исследования основанные на использовании форм из природы – биомиметика. Например в работе [6] для скривления стенок вентиляционного тройника используется форма ответвления от ствола растения, а в [16] для этого уже используется очертания береговой линии реки в месте присоединения притока к основному руслу. Для отвода аналогичное биомиметическое исследование [17] предлагает использовать для усовершенствования стенок отвода – форму гортани человека. Такие способы приводят к снижению сопротивления до 30% и зависят от конструктивных характеристик и расхода воздуха проходящего через фасонный элемент в случае тройника. Еще одним примером совершенствования формы стенок элементов является использование топологической

оптимизации, когда с использованием оптимизационных алгоритмов и заранее наложенных ограничений на изменение формы, проводится численное моделирование и поиск такой формы стенок, при которой наблюдается минимальное аэродинамическое сопротивление. В [18] таким образом находятся формы отводов и тройников, в [19] – отводов на 180° и крестовин, в [20] – отводов на 90° . При этом все приведенные выше способы усовершенствования конструкции, приводят к существенному усложнению их изготовления – внедрение дополнительных элементов в виде лопаток и экранов или создание сложных форм стенок или увеличения их габаритов. Этим недостатком практически лишен способ снижения сопротивления путем профилирования стенок фасонных элементов по очертаниям вихревых зон [21].

Наиболее оптимальным способом исследования, нахождения очертаний вихревых зон (ВЗ) и разработки усовершенствованных конструкций фасонных элементов является использование программных комплексов *CFD*. При этом важным этапом является исследование влияния используемых в вычислительном комплексе настроек и моделей для получения наиболее физически адекватных результатов. Для этого нужно решить задачу как в условиях без колена («прямой» канал, $l/b = \infty$), с минимальным влиянием колена («длинный» канал, $l/b = 20$), с сильным влиянием колена («короткий» канал, $l/b = 2$).

Целью исследования является определение влияния настроек и моделей вычислительного комплекса на адекватность моделирования течения в узле, состоящем из последовательно расположенных вытяжного отверстия и колена.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- определение влияния настроек численной модели на сходимость итерационного процесса;

- валидация значений КМС и очертаний вихревых зон, получаемых при использовании разных сочетаний моделей турбулентности и пристеночных функций, средней скорости в вытяжном канале для указанных выше конструктивных вариантов – «прямой», «длинный» и «короткий» канал.

2. Материалы и методы

Рассматривается узел вентиляционной системы, состоящий из колена и вытяжного отверстия, расположенного на двух расстояниях друг от друга $EF = 2\text{ м}$ ($l/b = 20$) – «длинный» канал и $EF = 0,2\text{ м}$ ($l/b = 2$) «короткий» канал (рис. 1).

Модель и расчетная сетка строится в препроцессоре Gambit. Размеры области представлены на рисунке 1. Ширина канала $b = 0,1\text{ м}$. Размеры расчетной области: $L = 2\text{ м}$, $H = 1\text{ м}$, длина канала после колена $L_1 = 2\text{ м}$, выбрана достаточной для восстановления деформации течения после колена и корректного определения КМС и очертания вихревой зоны.

Граничные условия для представленных на рисунке 1 конструкций:

- **AB** – «velocity inlet» - скорость постоянная и направлена по нормали к границе: $v_0 = 10$ и 50 м/с , $k = 1$, $\varepsilon = 1$

- **AG, GE, DC, CB** – «wall» - (непроницаемые стенки): $v = 0$, $dv_n/dn = 0$; (dn - нормаль к границе).

- **OH, HI, IK, KM, MN** – «pressure inlet» (свободная граница), gauge total pressure - избыточное давление $\Delta p = 0\text{ Па}$, $k = 0$, $\varepsilon = 0$

Основываясь на ранее проведенных исследованиях по вытяжным отверстиям разной конфигурации [22–24] были использованы модель турбулентности Reynolds Stress в комбинации с пристеночными функциями Standard Wall Function и Enhanced Wall Treatment. Для получения наиболее адекватных результатов необходимо в процессе решения добиться достаточного разрешения расчетной сетки, то есть исследовать задачу на сеточную зависимость.

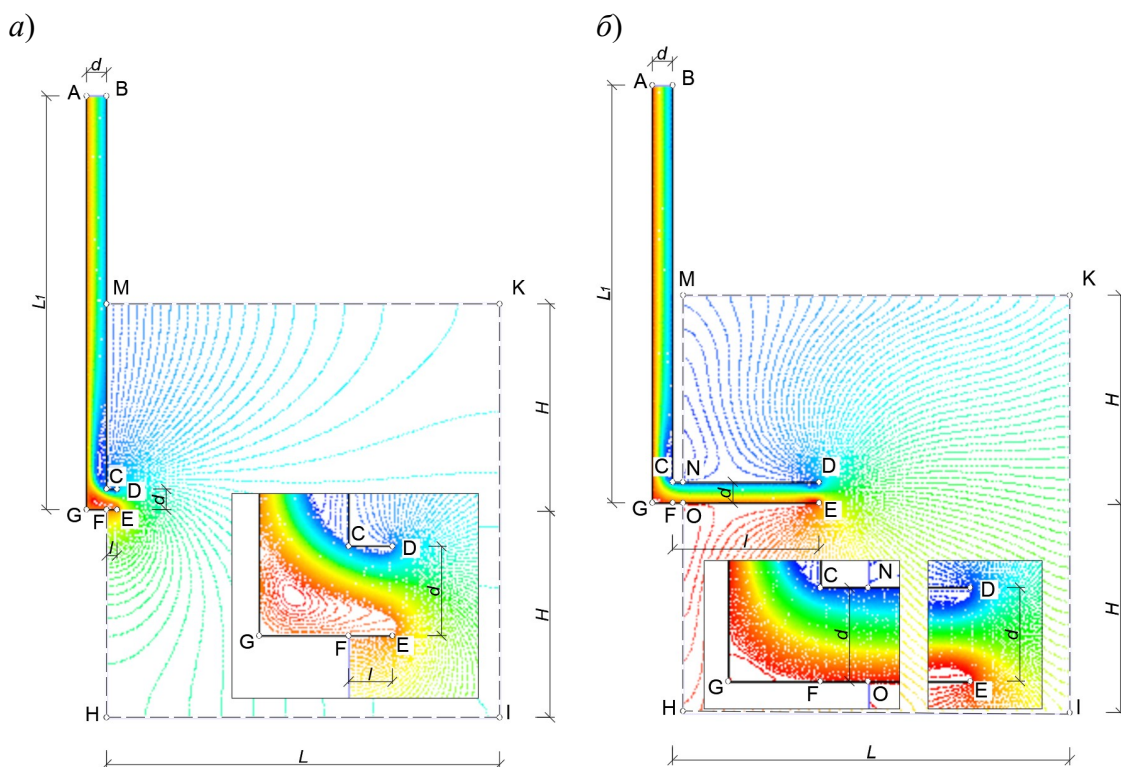


Рис. 1. Геометрия исследуемой задачи и характерные линии тока: а) случай «короткий» канал; б) случай «длинный» канал. (иллюстрация авторов)

Fig. 1 Geometry of the problem under study and characteristic flow streamlines: a) case of a “short” channel; b) case of “long” channel (illustration by the authors)

На первом этапе было выполнено измельчение сетки на всей области исследуемой геометрии. Далее область измельчения уменьшалась. Наибольшее внимание было уделено измельчению сетки в канале и вдоль его твердых стенках, поскольку в этой области происходит максимальное изменение скорости: от 0 на стенке до максимального значения в ядре струи, развиваются вихревые зоны. Стратегия адаптации расчетной сетки по этапам представлена ниже в таблице 1 и на рисунке 2.

Таблица 1

Стратегия адаптации расчетной сетки по этапам

№ адапт.	Область адаптации		Характеристики расчетной сетки		
	$(x_0; y_0)$	$(x_1; y_1)$	Размер макс. ячейки	Размер мин. ячейки	Количество ячеек
1	(0; -2)	(2; 2)	$6.25 \cdot 10^{-4}$	$6.25 \cdot 10^{-4}$	6248
2	(0; -2)	(2; 2)	$1.5625 \cdot 10^{-4}$	$1.5625 \cdot 10^{-4}$	24992
3	(0; -2)	(2; 2)	$3.90625 \cdot 10^{-5}$	$3.90625 \cdot 10^{-5}$	99968
4	(0; 0)	(0,1; 2)	$3.90625 \cdot 10^{-5}$	$9.765625 \cdot 10^{-6}$	240512
	(0,1; -0,6)	(2,4; 0,7)			
5	(0; 0)	(0,1; 2)	$3.90625 \cdot 10^{-5}$	$2.441406 \cdot 10^{-6}$	692096
	(0,1; -0,5)	(2,3; 0,6)			
6	(0; 0)	(0,1; 2)	$3.90625 \cdot 10^{-5}$	$6.103516 \cdot 10^{-7}$	2105216
	(0,1; -0,4)	(2,2; 0,5)			
7	Слой в 20 ячеек вдоль твердых границ		$3.90625 \cdot 10^{-5}$	$1.525879 \cdot 10^{-7}$	2621426
8	Слой в 10 ячеек вдоль твердых границ		$3.90625 \cdot 10^{-5}$	$3.814697 \cdot 10^{-8}$	3136361
9	Слой в 8 ячеек вдоль твердых границ		$3.90625 \cdot 10^{-5}$	$9.536743 \cdot 10^{-9}$	3753950
10	Слой в 6 ячеек вдоль твердых границ		$3.90625 \cdot 10^{-5}$	$2.384186 \cdot 10^{-9}$	4165601
11	Слой в 4 ячейки вдоль твердых границ		$3.90625 \cdot 10^{-5}$	$5.960464 \cdot 10^{-10}$	4577246

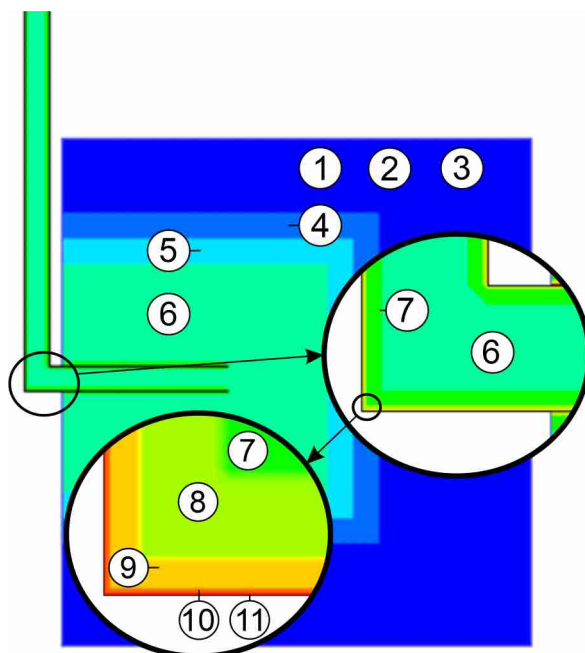


Рис. 2. Этапы адаптации расчетной сетки (иллюстрация авторов)
 Fig.2 Stages of computational mesh adaptation (illustration by the authors)

3. Результаты и обсуждение

При численном моделировании в ходе итерационного процесса для численной модели – сочетание модели турбулентности *RSM* с расширенным пристеночным моделированием *EWT* (*RSM EWT*), получено расхождение невязок для «короткого» канала и сильную нестабильность (осцилляции невязок) для «длинного» канала (таблица 2). На рисунке показан график невязок (рис. 3а) и линии тока течения (рис. 3б) для случая $l/b=20$. Невязка по уравнению неразрывности (continuity) в данном случае не стабильна, но ее значение колеблется на достаточно низком уровне, в пределах от 10^{-6} до 10^{-4} . Причиной нестабильности является изменение потока на левой свободной границе. В отличие от других вариантов задач, где через левую границу происходит втекание воздуха, здесь присутствует как втекание воздуха, так и вытекание. Но эта нестабильная область находится на достаточно большом удалении от области вытяжного отверстия и поэтому можно предполагать несущественное влияние на исследуемый процесс втекания воздуха. Нужно отметить, что сочетание моделей *RSM EWT* даже для «длинного» канала при более низкой скорости приводит к расхождению итерационного процесса.

Таблица 2

Результаты итерационного процесса

$v_0, \text{ м/с}$	$l/b=2$		$l/b=20$	
	RSM SWF	RSM EWT	RSM SWF	RSM EWT
10	сходится	расходится (на 0 адаптации)	сходится	расходится
50	сходится	расходится (на 7 адаптации)	сходится	не стабильная

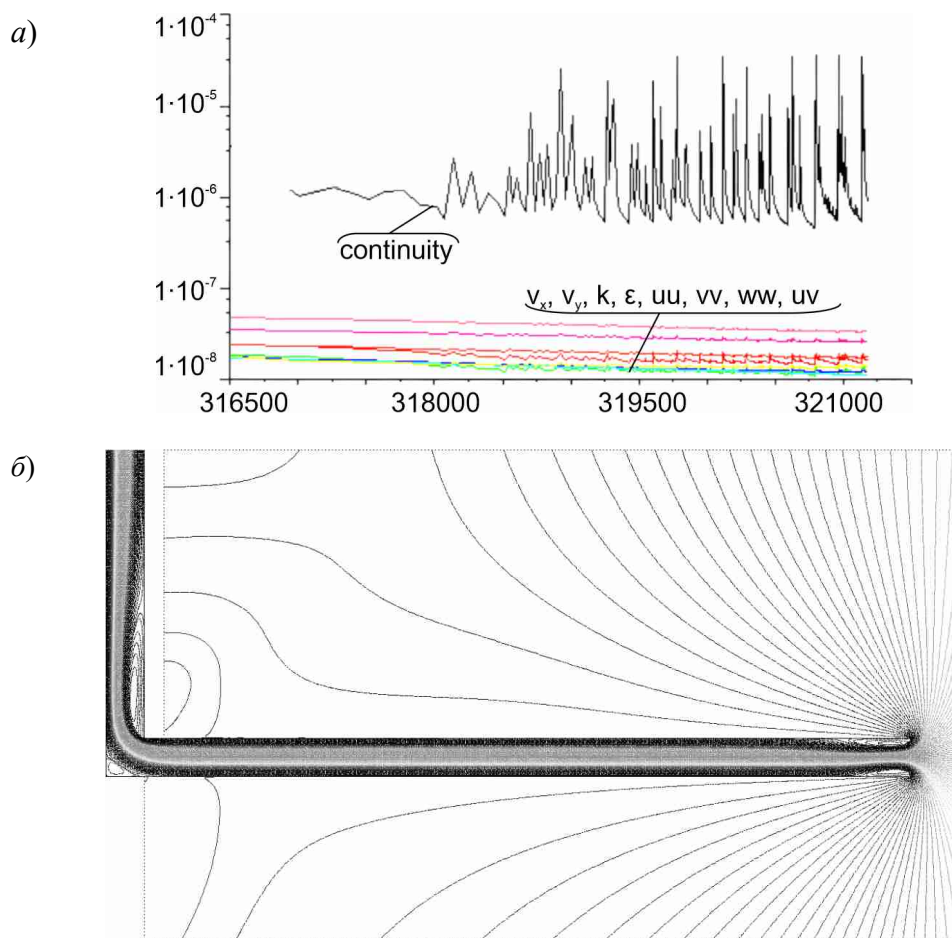


Рис.3 Иллюстрация нестабильного итерационного процесса для случая *RSM EWT*, $l/b=20$, $v_0 = 50$ м/с: а) невязки по уравнениям; б) линии тока (иллюстрация авторов)
 Fig.3 Illustration of an unstable iterative process for the *RSM case*, $l/b=20$, $v_0 = 50$ м/с: а) discrepancies in the equations; б) flow streamlines (illustration by the authors)

Для рассмотренных вариантов определены очертания четырех образующихся вихревых зон (ВЗ) (рис.4): ВЗ 1 – вихревая зона у всасывающего отверстия у верхней кромки канала, ВЗ 2 – вихревая зона в колене при срыве с острой кромки, ВЗ 3 – вихревая зона во внутреннем углу колена, ВЗ 4 – вихревая зона у всасывающего отверстия у нижней кромки канала. Очертания вихревых зон представлены в безразмерных координатах, отнесенных к ширине вытяжного канала b .

В случае, когда длина канала между двумя элементами достаточно большая ($l/b=20$) можно предполагать, что их взаимное влияние несущественное. Очертания ВЗ для задачи *RSM EWT* и $v_0 = 50$ м/с, очень близки к известным данным об очертаниях ВЗ на входе в плоские вытяжные каналы без колена, найденные численно [23], а также ВЗ в одиночном колене, найденные экспериментально [25] и аналитически [26]. Это подтверждает несущественность их взаимного влияния в этом случае. Нужно отметить, что при использовании модели *RSM SWF*, дающей стабильное решение при любых скоростях, длины вихревых зон ВЗ 1 и ВЗ 4 получаются различными (разница в длинах ВЗ достигает до 100%), хотя при такой длине канала от вытяжного отверстия до колена и учитывая, что колено находится вверх по потоку, эти вихревые зоны должны быть одинаковыми. Поэтому при данных настройках сочетания моделей *RSM SWF* можно сделать вывод о неадекватности моделирования течения на входе в вытяжное отверстие и необходимости дальнейшего исследования этого сочетания. При этом очертания ВЗ 3 в этом случае, возникающей после поворота, достаточно хорошо совпадает с известными экспериментальными и теоретическими результатами.

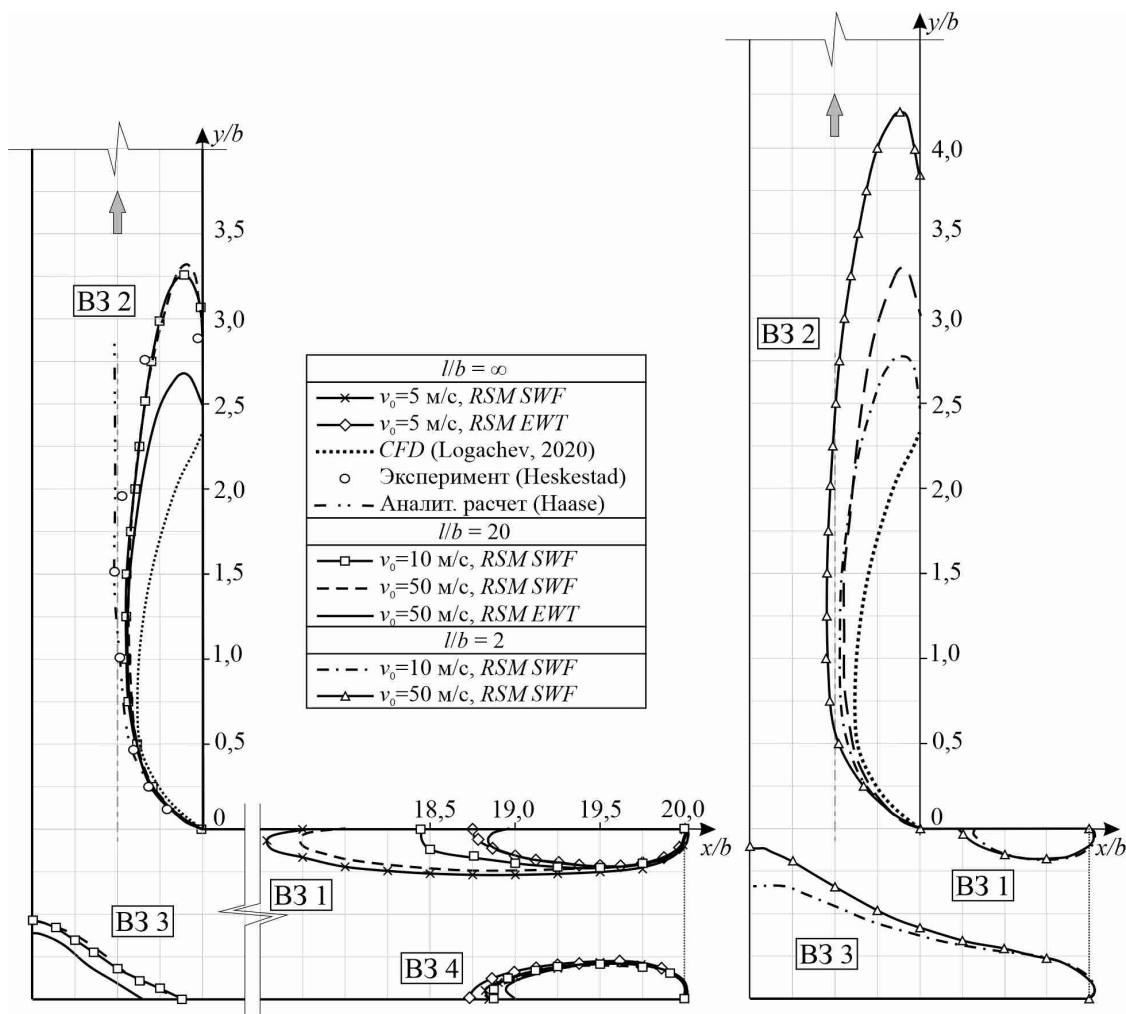


Рис. 4. Очертания вихревых зон по результатам данного исследования, численного исследования (Logachev, 2020 [23]), экспериментального (Heskestad [25]), аналитического (Haase [26]). (иллюстрация авторов)

Fig. 4 Outlines of vortex zones based on the results of this study, numerical study (Logachev, 2020 [23]), experimental study (Heskestad [25]), analytical study (Haase [26]) (illustration by the authors)

Для задачи с минимальным расстоянием от вытяжного отверстия до колена ($l/b=2$), видно, что скорость в канале также существенно влияет на течение и формирование ВЗ 2 после поворота. Вихревые зоны ВЗ 3 и ВЗ 4 сливаются в одну.

Для определения КМС ζ была выбрана схема, предложенная в статье [8]:

$$\zeta = \frac{P_1 - P_2 - \Delta P_{\text{тр}}}{(\rho v^2 / 2)}$$

где $P_1 = 0$ избыточное давление в сечении DE, P_2 – давление в сечении удаленном от фасонного элемента, в области где закончилась деформация потока, $\Delta P_{\text{тр}}$ – потери давления на трение.

В таблице представлены значения КМС узла, полученные в результате численного решения (*CFD*) для рассматриваемых вариантов задач, а также известные экспериментальные значения как для отдельных элементов – вытяжного отверстия ($\zeta_{\text{во}}$), колена ($\zeta_{\text{к}}$), так и для узла ($\Sigma\zeta$), которое подсчитывалось как сумма отдельных элементов в случае «длинного» канала или как КМС всего узла – для «короткого» канала.

Известно, что КМС для вытяжного свободно расположенного отверстия равен 1, видно (табл. 3), что для случаев как «прямого», так и «длинного» каналов КМС отличается от 1 не более чем на 7,5%. Это показывает адекватность моделирования с использованием обоих сочетаний моделей. При этом значение КМС для колена заметно различается.

Таблица 3

Значения КМС для разных вариантов рассчитанных и известных ранее

Источник, варианты конструкции		$\zeta_{\text{во}}$	$\zeta_{\text{к}}$	$\Sigma\zeta$
Эксперимент [3]		1	0,79	1,79
CFD отдельные элементы [21,23]		1	1,05	2,05
$l/b = \infty$	<i>RSM EWT</i>	1,023	-	-
	<i>RSM SWF</i>	1,075	-	-
«длинный» канал	CFD $l/b = 20$, $v_0 = 50$ м/с, <i>RSM EWT</i>	1,03	1,05	2,08
	CFD $l/b = 20$, $v_0 = 10$ м/с, <i>RSM SWF</i>	1,06	1,48	2,54
	CFD $l/b = 20$, $v_0 = 50$ м/с, <i>RSM SWF</i>	1,05	1,32	2,37
«короткий» канал	CFD $l/b = 2$, $v_0 = 10$ м/с, <i>RSM SWF</i>	-	-	3,52
	CFD $l/b = 2$, $v_0 = 50$ м/с, <i>RSM SWF</i>	-	-	3,5

При использовании модели *RSM EWT* результат совпадает с численным исследованием [21], а при использовании *RSM SWF* отличие составляет от 25% и 40% для разных значений скорости. Для «короткого» канала возможно определить значение только КМС узла. Видно, что значение в этом случае в 1,95 раза превышает значение суммы КМС [3]. Это еще раз показывает существенное влияние расстояния между близко расположенными фасонными элементами на общее сопротивление узла. Это необходимо учитывать при выполнении аэродинамического расчета воздухопроводов систем вентиляции и кондиционирования воздуха, и показывает необходимость исследования этого влияния и нахождения зависимостей КМС от расстояния между элементами.

4. Заключение

1. Для вентиляционного узла, содержащего колена и вытяжное отверстие построен ряд численных моделей и исследованы комбинации использования модели турбулентности *RSM* и двух способов пристеночного моделирования – *SWF* и *EWT*, при разных скоростях воздуха в канале и двух экстремальных расстояниях между элементами – $l/b=2$ («короткий» канал) и $l/b=20$ («длинный» канал).

2. Найден очертания вихревых зон – четырех для варианта «длинный» канал, трех для варианта «короткий» канал. При сравнении с известными данными об очертаниях ВЗ для отдельно расположенных вытяжного отверстия и колена, наилучшее совпадение показало сочетание *RSM EWT*, но в то же время эта модель нестабильна для конструкции с экстремально «коротким» каналом.

3. Для всех исследованных вариантов определены значения коэффициентов местных сопротивлений. Здесь также в случае «длинного» канала наилучшее соглашение с известными данными о КМС отдельного вытяжного отверстия и колена показало сочетание *RSM EWT*. Для «короткого» канала выявлено существенное отличие КМС узла от удвоенного КМС отдельных элементов, что показывает необходимость учета влияния расстояния между фасонными элементами при $l/b < 20$.

Далее необходимо продолжить исследования настроек численной модели для возможности получения стабильного итерационного процесса, а также адекватных результатов решения, с использованием которой провести исследования узла, состоящего из вытяжного отверстия и колена с целью построения зависимости КМС узла и очертаний вихревых зон в нем от расстояния входящих в него отдельных элементов.

Список литературы / References

1. LaRose A., Cogan J. Annual Energy Outlook. [Электронный ресурс]. 2019. Р. 83. URL: <https://www.eia.gov/pressroom/releases/press453.php>.
2. Замалиева А.Т., Зиганшин М.Г. Повышение энергетической и экологической эффективности систем газоочистки на ТЭС // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. т. 330, № 9. С. 143–153. DOI: 10.18799/24131830/2019/9/2263. [Zamalieva A.T., Ziganshin M.G. Increasing the energy and environmental efficiency of gas purification systems at thermal power plants // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo-Resources Engineering. 2019. v.330. №9. P. 143-153. DOI: 10.18799/24131830/2019/9/2263.]
3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.:

- Машиностроение, 1992. 672 с. [Idelchik, I.E. Handbook of hydraulic resistance. 3rd edition revised and enlarged. Moscow. 1992. 672 p.]
4. Зиганшин А.М., Озеров А.О., Солодова Е.Э. Численное исследование течения в П-образном отводе и снижение его сопротивления // Известия ВУЗов. Строительство. 2019. Т. 721, № 1. С. 82–93. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-721-1-82-93. [Ziganshin A.M., Ozerov A.O., Solodova E.E. Numerical study of flow in a U-shaped bend and reduction of its resistance // News of higher educational institutions. Construction. 2019. V. 721, № 1. P. 82–93. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-721-1-82-93.]
 5. Ziganshin A., Solodova E., Logachev K. Numerical simulation of a z-shaped ventilation elbow and reduction of its resistance // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. T. 890. P. 012146. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012146.
 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. T. 129. P. 130–141. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.11.023.
 7. Gao R., Fang Z., Li A., Liu K., Yang Z., Cong B. Numerical simulation and experimental study on resistance reduction optimization of the cambered surface of elbows under adjacent influence // Procedia Engineering. Elsevier B.V., 2017. T. 205. P. 3985–3992. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.864.
 8. Kareeva J., Ziganshin A., Narsova K. Verification and Validation of Numerical Model of Flow in Supply Opening with Elbow Unit // Lecture Notes in Civil Engineering. Switzerland: Springer Nature, 2023. P. 343–352. DOI: 10.1007/978-3-031-14623-7_30.
 9. Зиганшин А.М., Тихонов К.С., Кареева Ю.Р. Численное определение характеристик течения через приточную решетку, расположенную за отводом. // Материалы XXI Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика РААСН В. Н. Богословского «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды». Волгоград: ВГМУ, 2023. С. 119–125. [Ziganshin A.M., Tikhonov K.S., Kareeva Yu.R. Numerical determination of flow characteristics through the supply hole located behind the elbow // Materials of the XXI International Scientific Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of RAASN Academician V. N. Bogoslovsky "Indoor air and environment quality ", Volgograd: VGMU, 2023. P.119-125]
 10. Zhang W., Li A. Resistance reduction via guide vane in dividing manifold systems with parallel pipe arrays (DMS-PPA) based on analysis of energy dissipation // Building and Environment. Elsevier Ltd, 2018. T. 139. P. 189–198. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.04.010.
 11. 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 / под ред. Li A., Olofsson T., Kosonen R. 2022. T. 356. P. 02056. DOI: 10.1051/e3sconf/202235602056.
 12. Shopayeva A., Safiullin R. CFD-modeling of flow in confluence nodes of ventilation units of multi-storey buildings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. T. 890. P. 012157. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012157.
 13. 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. Elsevier Ltd, 2018. T. 132. P. 345–356. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.02.006.
 14. Yin Y., Li A., Wen X., Zhang J., Zhang X., Guo J., Li J., Zhang W., Che J. Resistance reduction of an elbow with a guide vane based on the field synergy principle and viscous dissipation analysis // Journal of Building Engineering. 2022. T. 54. P. 104649. DOI: 10.1016/j.jobeb.2022.104649.
 15. Gao R., Fang Z., Li A., Liu K., Yang Z., Cong B. Numerical Simulation and Experimental Study of the Drag Reduction of 90° Elbows for Ventilation and Air Conditioning Tubes in An Arc Form // Procedia Engineering. Elsevier B.V., 2017. T. 205. P. 3978–3984. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.859.
 16. Gao R., Zhang H., Li A., Liu K., Yu S., Deng B., Wen S., Li A., Zhang H., Du W., Deng B. A novel low-resistance duct tee emulating a river course // Building and Environment. Elsevier, 2018. T. 144, № June. P. 295–304. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.08.034.
 17. 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. Т. 203. P. 108102. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108102.
18. Zhou M., Lian H., Sigmund O., Aage N. Shape morphing and topology optimization of fluid channels by explicit boundary tracking // *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2018. Т. 88, № 6. P. 296–313. DOI: 10.1002/flid.4667.
 19. Dilgen C.B., Dilgen S.B., Fuhrman D.R., Sigmund O., Lazarov B.S. Topology optimization of turbulent flows // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Elsevier B.V., 2018. Т. 331. P. 363–393. DOI: 10.1016/j.cma.2017.11.029.
 20. Malanichev I., Akhmadiev F. Pressure loss reduction in ventilation ducts by shape optimization of the removable profiled components // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Т. 890. P. 012154. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012154.
 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. т. 697, № 1. С. 108–116. [Ziganshin, A.M., Belyaeva, E.E., Sokolov, V.A. Reduced pressure loss when profiling sharp and recessed elbows // *News of higher educational institutions. Construction*. 2017. v.697, № 1. P. 108-116.]
 22. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Averkova O.A., Logachev A.K. A survey of separated airflow patterns at inlet of circular exhaust hoods // *Energy and Buildings*. Elsevier B.V., 2018. Т. 173, № 6. P. 58–70. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.05.036.
 23. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Averkova O.A. A study of separated flows at inlets of flanged slotted hoods // *Journal of Building Engineering*. 2020. Т. 29. P. 101159. DOI: 10.1016/j.job.2019.101159.
 24. Kareeva J., Gabdrifkov R., Chukhlova M. Selection of model for the numerical study of the convective jet problem // *E3S Web of Conferences* / под ред. Vdovin E. 2021. Т. 274. P. 08013. DOI: 10.1051/e3sconf/202127408013.
 25. Heskestad G. Two-Dimensional Miter-Bend Flow // *Journal of Basic Engineering*. 1971. Т. 93, № 3. P. 433–443. DOI: 10.1115/1.3425271.
 26. Naase D. Strömung in einem 90°-Knie // *Ingenieur-Archiv*. 1954. Т. 22, № 4. P. 282–292. DOI: 10.1007/BF00536548.

Информация об авторах

Кареева Юлия Рустэмовна, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: kareeva@kgasu.ru

Зиганшин Арслан Маликович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: amziganshin@kgasu.ru

Чухлова Мария Борисовна, специалист отдела ИАС НИР, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: mariachukhlova@gmail.com

Information about the authors

Yulia R. Kareeva, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

E-mail: kareeva@kgasu.ru

Arslan M. Ziganshin, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: amziganshin@kgasu.ru

Mariya B. Chukhlova, specialist of department IAS of scientific research, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

E-mail: mariachukhlova@gmail.com