

DOI: 10.15514/ISPRAS-2022-34(5)-13



Турбулентные течения газа в каналах различных форм поперечного сечения с массоподводом

Б.Я. Бендерский, ORCID: 0000-0002-5482-3307 <bib@istu.ru>

А.А. Чернова, ORCID: 0000-0001-8579-6279 <alicaaa@gmail.com>

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7

Аннотация. Рассматриваются вопросы математического моделирования турбулентных течений в каналах со вдувом различных форм поперечного сечения. В результате серии вычислительных экспериментов с использованием инструментов пакета OpenFoam исследуются вопросы влияния формы канала на реализуемые особенности течений. Предложена математическая модель сопряженного теплообмена для рассматриваемых каналов. Сравнение результатов численного моделирования с известными экспериментальными данными показало корректность предложенных моделей, схем и алгоритмов. Исследованы топологические особенности структуры потока вязкого сжимаемого теплопроводного газа в каналах с массоподводом сложных форм, в том числе описаны особенности формируемых профилей скоростей в выходных сечениях каналов, приводятся результаты расчета коэффициента неравномерности скорости.

Ключевые слова: математическое моделирование; газовая динамика; прямолинейные каналы; массопровод; профиль скорости

Для цитирования: Бендерский Б.Я., Чернова А.А. Турбулентные течения газа в каналах различных форм поперечного сечения с массоподводом. Труды ИСП РАН, том 34, вып. 5, 2022 г., стр. 195-204. DOI: 10.15514/ISPRAS-2022-34(5)-13

Turbulent gas flows in channels of different cross-sectional shapes with mass flow

B.Ya. Benderskiy, ORCID: 0000-0002-5482-3307 <bib@istu.ru>

A.A. Chernova, ORCID: 0000-0001-8579-6279 <alicaaa@gmail.com>

Kalashnikov Izhevsk State Technical University
7, Studencheskaya st., Izhevsk, 426000, Russia

Abstract. The issues of mathematical modeling of turbulent flows in channels with blowing of different cross-sectional shapes are considered. As a result of a series of computational experiments using the OpenFoam tools, the influence of the channel shape on the realized features of flows is investigated. A mathematical model of conjugate heat transfer for the channels under consideration is proposed. Comparison of the results of numerical simulation with the known experimental data has shown the correctness of the proposed models, schemes and algorithms. The topological features of the structure of viscous compressible heat-conducting gas flow in the channels with mass flow of complex shapes have been studied, including the features of the velocity profiles formed in the outlet sections of the channels, the results of calculating the coefficient of non-uniformity of velocity have been described.

Keywords: mathematical modeling; gas dynamics; rectilinear channels; mass flow; velocity profile

For citation: Benderskiy B.Ya., Chernova A.A. Turbulent gas flows in channels of different cross-sectional shapes with mass flow. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 34, issue 5, 2022, pp. 195-204 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2022-34(5)-13

1. Введение

Каналы различных форм поперечного сечения широко используются в различных технических и природных системах. Поэтому внимание исследователей к вопросам организации течений жидкостей и газов в этих каналах не ослабевает.

Как правило канал представляет собой прямолинейный участок с произвольной формой поперечного сечения. В силу геометрических особенностей, а именно, явного преобладания линейных размеров (длины) над радиальными, наиболее часто исследования канальных течений проводятся в осесимметричной или плоской [1-3] постановках. В общем случае [2, 4-6] течения жидкостей и газов в таких каналах подробно исследованы как экспериментально, так и численно [7]. Отдельный интерес и потенциальную сложность для исследования представляют течения в проницаемых каналах и в каналах с подвижными границами вдува.

Проницаемость стенок канала, как и осуществление вдува с внутренних поверхностей каналов, согласно [4,5] приводит к формированию одиночных струек с поверхности массопровода, с одной стороны, и требует обязательного учета трехмерности реализуемых течений при их численном моделировании [6-9], с другой. При этом взаимодействие единичных струек вблизи поверхности вдува приводит к дополнительной турбулизации потока и изменению режима течения. Совокупность вышеприведенных особенностей течений в каналах с проницаемыми стенками обуславливает повышение сложности численного моделирования процессов внутренней аэрогазодинамики и приводит к увеличению числа факторов, оказывающих влияние на результат в физическом эксперименте. В силу этих причин особенности течений газа и жидкости в каналах с массоподводом остаются исследованными не полностью. Таким образом, работа посвящена математическому моделированию внутренней газодинамики в прямолинейных каналах сложной формы поперечного сечения с массоподводом.

2. Математическая постановка

Пространственное турбулентное течение сжимаемого теплопроводного газа в каналах с массоподводом описывается системой уравнений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho E u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial q_j}{\partial x_j}; \quad (3)$$

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T; \quad (4)$$

$$p = \rho R T, \quad (5)$$

где ρ – плотность газа, p – давление, u_i – компоненты вектора скорости, T – температура, $q_j = \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}$ – тепловой поток, R – удельная газовая постоянная; μ – динамический коэффициент вязкости; λ – коэффициент теплопроводности среды, $E = c_v T + 0.5 u_i^2$ – полная удельная энергия среды, $\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$ – тензор вязких напряжений; $S_{ij} =$

$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ – тензор скоростей деформаций. Рассматривается квазистационарная постановка.

Поскольку в данной работе рассматриваются течения сжимаемого газа в каналах с массоподводом и сложной формой поперечного сечения, вследствие осуществления вдува газа с поверхностей массоподвода [5,10] возможно взаимодействие разнонаправленных струй газа, что обуславливает турбулизацию течений. Поэтому при моделировании внутренних канальных течений, даже при небольших скоростях вдува и числах Рейнольдса $10^3 \div 10^5$, необходимо учитывать турбулентность реализуемых течений. Таким образом, исходная система уравнений (1) – (5) согласно работе [11] осредняется по Фавру и Рейнольдсу, что позволяет учесть как турбулентные колебания, так и колебания плотности. Для замыкания полученной системы уравнений с учетом представленных в [12] результатов верификации моделей турбулентности применяется модель переноса компонент напряжения Рейнольдса в рамках модели Mentor SST [13-16]. Все константы модели рассчитаны в соответствии [11, 16-18] со значениями из стандартных моделей $k-\varepsilon$ и $k-\omega$ и представлены в [15, 19].

Рабочее тело – воздух ($M = 0.02896$ кг/моль, $c_p = 1004.4$ Дж/кгК, $\mu = 1.831 \cdot 10^{-5}$ кг/мс, $\lambda = 0.0261$ Вт/мК). Граничные условия приведены в табл. 1.

Табл. 1. Граничные условия
Table 1. Boundary conditions

| Граница | Граничное условие |
|--------------------|--|
| Граница вдува Г1 | $p_0 = 5 \div 100 \cdot 10^5 \text{ Па}, T_0 = 600 \text{ К}$ |
| Выход из канала Г2 | $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$ |
| Стенки каналов | $u_i = 0, \frac{\partial u_i}{\partial n} = 0, -\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial n} = -\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial n}, T_w = T_g$ |

Расчетные сетки построены с использованием утилит построения сеток blockMesh и topoSet пакета openFoam и содержат более 5 млн призматических элементов с контролем положения первой ячейки в пристеночном слое ($y^+ = 1 \div 10$), вопросы исследования сеточной сходимости рассмотрены в работе [15]. Сетки на границах сопряжения gas/solid являются согласованными.

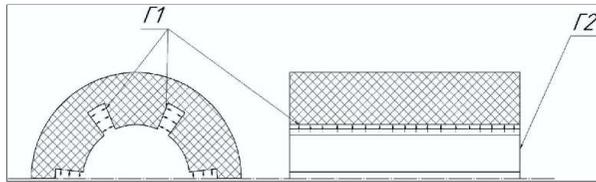


Рис. 1. Расчетная область
Fig. 1. Calculation area

Рассмотрим особенности течения газа в каналах с массоподводом различных форм поперечного сечения. Пример построения расчетной области для звездообразного канала приведен на рис. 1.

3. Анализ результатов численного моделирования

Течения газа в канале звездообразной формы характеризуется образованием парных вихрей (рис.2) в межщелевой части цилиндрического канала. Как показано в [20] к образованию парных вихревых структур приводит взаимодействие разнонаправленных струй газа, поступающих из лучей канала и с цилиндрической поверхности канала между собой.

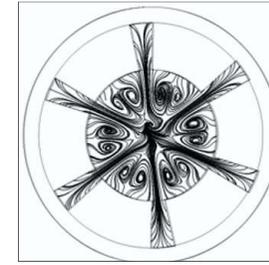


Рис. 2. Структура потока в выходном сечении проницаемого канала звездообразной формы
Fig. 2. Flow structure in the outlet section of the permeable star-shaped channel

На векторных картинах течения (рис. 3), в сечениях по лучам фиксируется формирование на входе в цилиндрическую часть канала области возвратных течений (рис. 3,а). Также наблюдается образование зон смешения потоков в поперечном сечении по лучам звезды (рис. 3,а) и вблизи цилиндрической стенки канала, в области между лучами (рис.3,б). Локальные особенности потока, фиксируемые на векторных картинах скоростей обусловлены формированием в канале сложного нетривиального трехмерного профиля скорости, проекции которого в сечениях по лучам и между лучами приведены на рис.4.

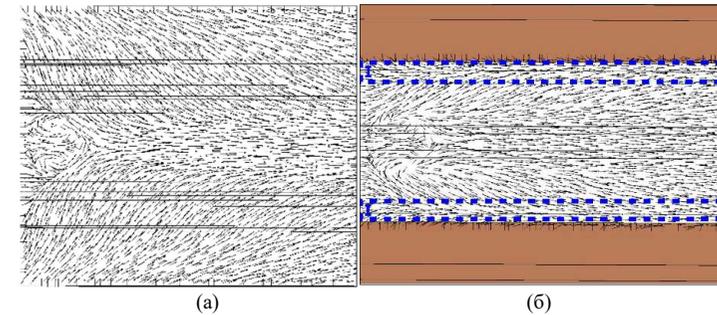


Рис. 3. Вектора скорости в продольных сечениях канала массоподвода звездообразной формы по лучам (а) и между лучами (б)
Fig. 3. Velocity vectors in longitudinal sections of the star-shaped channel along the beams (a) and between the beams (b)

В цилиндрической части канала (рис. 3 (б)) наблюдается формирование вблизи поверхности вдува слоя смешения, что сопряжено с преобладанием потока газа, поступающего из лучей, над потоком газа, поступающим с цилиндрической (канальной) поверхности. Трансформация профиля скорости по длине канала представлена на рис. 4, так области смешения разнонаправленных потоков газа локализуются вблизи лучей канала. Это приводит к неравномерности профиля продольной компоненты скорости в поперечном сечении канала по лучам и между лучами звездообразного канала. Профиль продольной составляющей скорости в сечении между лучами звезды характеризуется большей равномерностью (рис.4 (б)) чем аналогичный профиль в сечении по лучам, что связано как с выбором плоскости разреза (по плоскости симметрии парного вихря, рис. 3 (б)), так и с характером течения газа в цилиндрической части канала (рис. 2).

При движении вниз по потоку форма профиля скорости в цилиндрической части канала массоподвода приближается к косинусоидальной форме, что согласуется (рис. 5) с экспериментальными данными [19, 20]. Профиль продольной компоненты скорости в сечении по лучам (рис. 4) имеет три локальных экстремума, характеризующих формирование

в канале трех зон локального увеличения скорости. Выявлено и показано, что две зоны повышения скорости формируются потоком, поступающим из лучей, центральная область повышения скорости формируется в основном (цилиндрическом) канале за счет смешения потоков (зоны I на рис. 3).

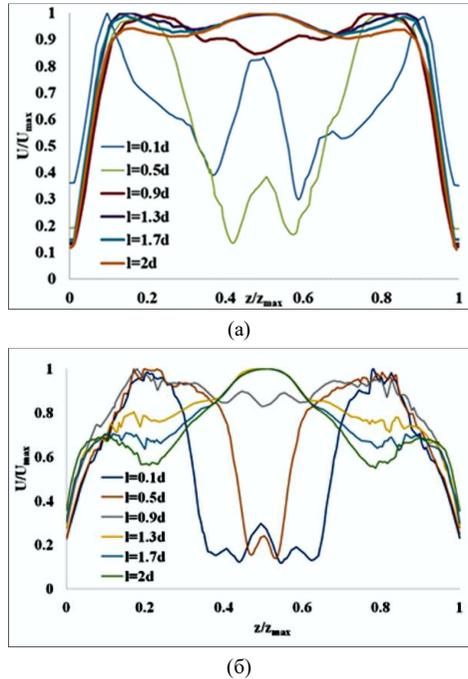


Рис. 4. Перестройка профиля скорости в поперечных сечениях звездообразного канала с массоподводом: (а) между лучами; (б) в сечении по лучам
Fig. 4. Velocity profile rearrangement in cross sections of star channel with mass flow: (a) between the beams; (b) in the cross section along the beams

Из рис. 4 видно, что при движении по потоку наблюдается выравнивание пространственного поля скорости с одной стороны и увеличение модуля скорости в плоскости лучей, с другой. В частности, выравнивание поля скорости сопровождается повышением его равномерности при отсутствии отрывных течений. В целом, анализ топологических особенностей потока газа в звездообразном канале позволяет однозначно определить связь между количеством, формой, расположением компенсаторов и пространственной локализацией парных вихревых структур в цилиндрическом проницаемом канале.

Представленные на рис. 5 расчетные профили продольной компоненты скорости удовлетворительно совпадают (качественно и количественно) с экспериментальными профилями [21, 22]. Необходимо отметить, что согласно [22] экспериментальная погрешность измерения скорости составляет 8%, а максимальное расхождение расчетных данных с результатами эксперимента составляет 12.5%.

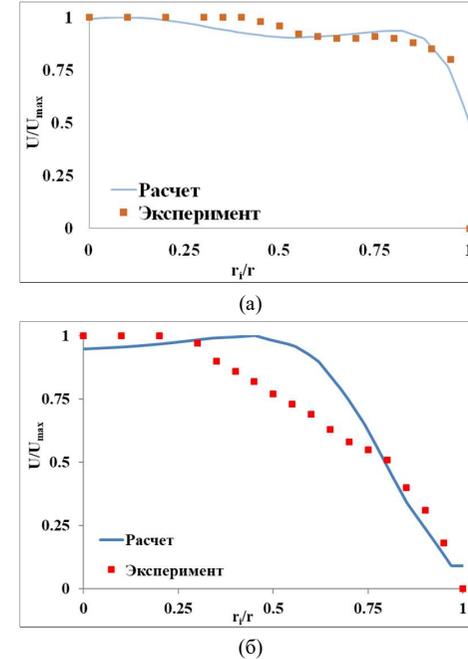


Рис. 5. Сравнение расчетного и экспериментального профиля продольной компоненты скорости в поперечных сечениях звездообразного канала со вдувом по длине канала (а) $L/d = 1.5$; (б) $L/d = 2.3$
Fig. 5. Comparison of the calculated and experimental profiles of the longitudinal velocity component in the cross sections of a star-shaped channel with a blow along the length of the channel (a) $L/d = 1.5$; (b) $L/d = 2.3$

Рассмотрим особенности стационарного течения газа в каналах с массоподводом различных конфигураций (рис. 6).

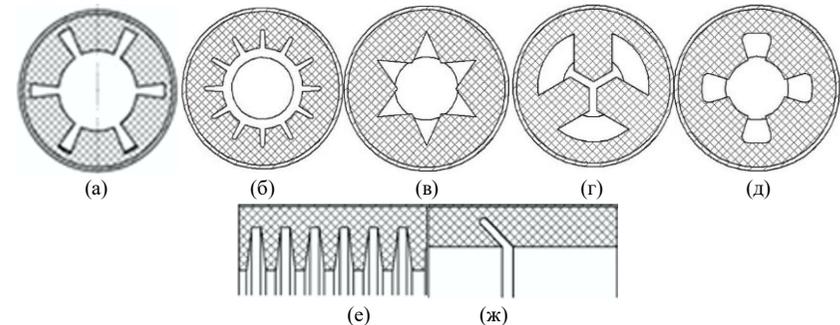


Рис. 6. Форма поперечного сечения канала массоподвода: шестилучевой канал (а), двенадцатилучевой канал (б), шестилучевой звездообразный канал (в), трехлопастной канал (г), четырехлопастной канал (д), пилообразный канал (е) и канал с проточкой (ж)
Fig. 6. Cross-sectional shape of the mass channel: six-beam channel (a), twelve-beam channel (b), six-beam star channel (c), three-blade channel (d), four-blade channel (e), saw-tooth channel (f) and channel with a slot (g)

Выявлено, что при одинаковых расходах газа с поверхностей массоприхода в каналах исследуемых конфигураций реализуются локальные особенности структуры потока,

характерные строго для данного типа поперечного сечения канала с проницаемыми стенками. Так, для каналов с различными видами радиальных отводов/прорезей (рис. 7, а-в) в цилиндрической части канала фиксируется зона смешения, размеры которой определяются как количеством прорезей, так и газодинамическими характеристиками потока. Для лепестковых форм каналов массоподвода (рис. 7 (в-г)) характерно образование сложных пространственных конфигураций зон смешения в лепестковых трактах канала. Пилообразный (рис.7, е) канал, как и канал с кольцевой проточкой (рис. 7 (ж)) характеризуются сложной пространственной структурой течения в области резкого изменения геометрии (в области проточек/пропилов). Структура потока в поперечном сечении на выходе из канала массоподвода, для рассматриваемых конфигураций трактов, представлена на рис. 8.

Выявлено, что при малом числе отводов в областях взаимодействия канального и щелевых потоков образуются парные вихревые структуры, прослеживающиеся вдоль всего канала до выходного сечения. Увеличение числа отводов/пропиллов приводит к изменению структуры потока в канале, а именно к отсутствию парных вихревых структур.

Переход от трапецевидной формы пропилов к треугольной (рис.7, а, в) приводит к изменению профиля продольной составляющей скорости на выходе из канала как в сечениях по лучам, так и между лучами (рис. 8, кривые 1 и 3). Анализ полученных профилей скорости позволяет сделать вывод об увеличении зоны смешения. В сечении по лучам в канальной части наблюдается трансформация профиля скорости от косинусоидального к параболическому (рис. 8, кривые 1 и 3).

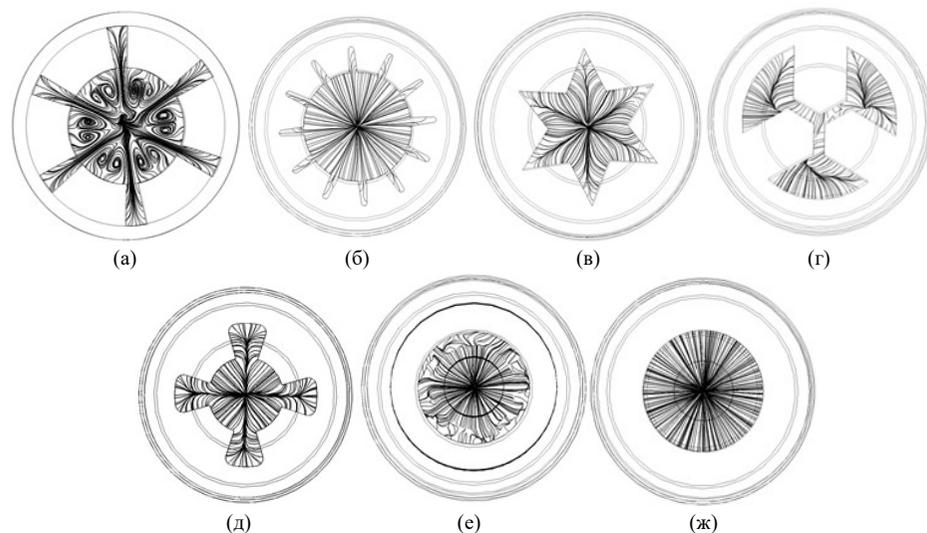


Рис. 7. Линии тока в шестилучевом канале (а), двенадцатилучевом канале (б), шестилучевом звездчатом канале (в), трехлопастном канале (г), четырехлопастном канале (д), пилообразном канале (е) и в канале с проточкой (ж)

Fig.7. Stream lines in the six-beam channel (a), twelve-beam channel (b), six-beam star channel (c), three-bladed channel (d), four-bladed channel (e), sawtooth channel (f) and channel with a slot (g)

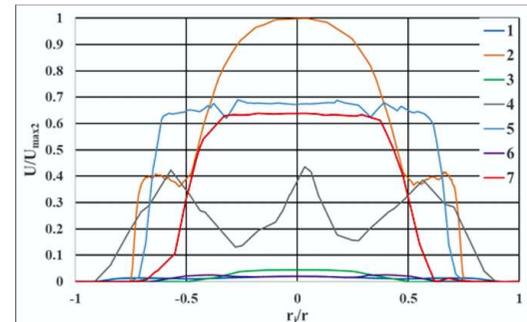


Рис. 8. Профиль продольной компоненты скорости на выходе из канала массоподвода где: 1 - шестилучевой канал; 2 - двенадцатилучевой канал; 3 - шестилучевой звездчатый канал; 4 - трехлопастной канал; 5 - четырехлопастной канал; 6 - пилообразный канал; 7 - канал с проточкой
Fig.8. Profile of the longitudinal velocity component at the outlet of the mass-fed channel where: 1 - six-beam channel; 2 - twelve-beam channel; 3 - six-beam star channel; 4 - three-bladed channel; 5 - four-bladed channel; 6 - sawtooth channel; 7 - channel with a slot

Необходимо отметить, что при одинаковом массовом расходе газа с поверхности массоподвода переход от трапецевидной формы компенсатора к треугольной приводит (рис. 8, кривые 1,3) к увеличению локальных максимальных значений продольной составляющей скорости на 54%. При этом, максимальные значения модуля скорости на выходе из канала достигаются в проницаемом канале цилиндрическо-щелевой формы с двенадцатью лучами (рис. 8, кривая 2). Использование четырехлопастного канала (рис. 8, кривая 5) и канала с проточкой (рис. 8, кривая 7) приводит к формированию более равномерного и наполненного профиля скорости в выходном сечении канала, максимальное значение продольной составляющей скорости составляет 67% от аналогичного значения для двенадцатищелевого канала (кривая 2, рис. 8).

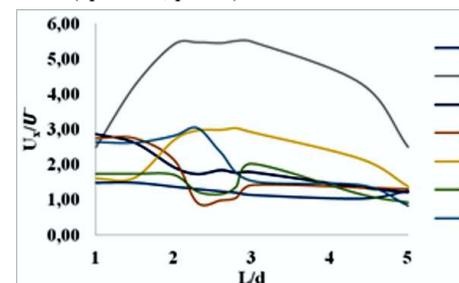


Рис. 9. Распределение коэффициента неравномерности по длине канала, где: 1 - шестилучевой канал; 2 - двенадцатилучевой канал; 3 - шестилучевой звездчатый канал; 4 - трехлопастной канал; 5 - четырехлопастной канал; 6 - пилообразный канал; 7 - канал с проточкой.

Fig.9. Distribution of the nonuniformity coefficient along the length of the channel, where: 1 - six-beam channel; 2 - twelve-beam channel; 3 - six-beam star channel; 4 - three-bladed channel; 5 - four-bladed channel; 6 - sawtooth channel; 7 - channel with a slot.

Влияние формы канала на изменение профиля скорости по длине канала удобно оценивать в рамках гидравлического подхода с использованием коэффициента неравномерности скорости u_x/\bar{u} (рис. 9). Выявлено, что максимальная неравномерность профиля скорости в выходном сечении канала ($u_x/\bar{u} = 2.8$) характерна для двенадцатищелевого канала (рис. 9, кривая 2), а наименьшую неравномерность профиля скорости в выходном сечении канала

($u_x/\bar{u} \approx 1$) можно обеспечить за счет применения трехлепесткового канала и канала с кольцевой проточкой (рис. 9, кривые 3, 7).

4. Заключение

В работе исследованы вопросы влияния формы поперечного сечения канала со вдувом на реализуемые в канале профили продольной составляющей скорости. Выявлено, что коэффициент неравномерности скорости в выходном сечении канала имеет максимальные значения для двенадцатилучевого канала, а минимальные значения реализуются в каналах с трехлепестковой формой поперечного сечения и в канале с кольцевой проточкой. Учет неравномерности распределения продольной составляющей скорости на выходе из каналов необходим для последующего расчета процессов теплообмена в элементы конструкции энергетических установок с такими каналами. Кроме того, показаны особенности структуры потока в каналах с различной формой поперечного сечения, в частности, отмечены вихревые структуры вблизи поверхности вдува и зоны локального смещения потоков в каналах с радиальными проточками. Следует заметить, что выявленные вихревые структуры переносятся вниз по потоку и взаимодействуют с поверхностями элементов конструкции.

Список литературы / References

- [1] Липанов А.М., Бобрышев В.П. и др. Численный эксперимент в теории РДТТ. Екатеринбург, УИФ Наука, 1994 г., 301 стр. / Lipanov A.M., Bobryshev V.P. et al. Numerical Experiment in SFRE theory. Ekaterinburg, UIF Nauka, 1994, 301 p. (in Russian).
- [2] Алиев А.В., Мищенко О.В. Математическое моделирование в технике. Ижевский институт компьютерных исследований, 2012 г., 476 стр. / Aliev A.V., Mischenkova O.V. Mathematical Modeling in Engineering. Izhevsk Institute of Computer Research, 2012, 476 p. (in Russian).
- [3] Ахмадеев В.Ф., Сидоров А.Ф. и др. О трех методах расчета дозвуковых течений в осесимметричных каналах сложной формы. Моделирование в механике. Новосибирск, ИТПМ, том 4 (21), вып. 4, 1990 г., стр. 15-25 / Akhmadeev V. F., Sidorov A.F. et al. On three methods of calculation of subsonic flows in axisymmetric channels of complex shape. Modelling in Mechanics. Novosibirsk, ITAM, vol. 4 (21), 1990, pp. 15-25 (in Russian)
- [4] Волков К.Н. Нестационарное турбулентное течение газозвеси в канале при наличии вдува в условиях вынужденных колебаний давления. Прикладная механика и техническая физика, том 54, вып. 2, 2013 г., стр. 65-80 / Volkov K.N. Unsteady turbulent flow of gas suspension in the channel in the presence of blowing under forced pressure oscillations. Applied Mechanics and Technical Physics, vol. 54, issue 2, 2013, pp. 65-80 (in Russian).
- [5] Kong F., Schetz Y.A. Turbulent boundary layer over solid and porous surface with small roughness. In Papers of the 19th Aerospace Sciences Meeting (1981), published online 2012. DOI: 10.2514/6.1981-418.
- [6] Волков К.Н., Емельянов В.Н. Газовые течения с массоподводом в каналах и трактах энергоустановок. М., Физматлит, 2011 г., 464 стр. / Volkov K.N., Emelyanov V.N. Gas flows with mass transfer in channels and paths of power plants. Moscow, Fizmatlit, 2011, 464 p. (in Russian).
- [7] Шумихин А.А., Королева М.Р. и др. Использование схемы WENO для моделирования турбулентного течения в канале с обратным уступом. Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки, том 27, вып. 3, 2017 г., стр. 460-469 / A.A. Shumikhin, M.R. Koroleva et al. Application of WENO scheme for simulation of turbulent flow in a channel with backward-facing step. The Bulletin of Udmurt University. Mathematics. Mechanics. Computer Science, vol. 27, issue 3, 2017, pp. 460-469 (in Russian).
- [8] Mansour N.N., Kim J., Moin P. Reynolds-stress and dissipation rate budgets in a turbulent channel flow. Journal of Fluid Mechanics, vol. 194, 1988, pp. 15-44.
- [9] Волков К.Н., Емельянов В.Н. Математические модели трехмерных турбулентных течений в каналах со вдувом. Математическое моделирование, том 16, вып. 10, 2004 г., стр. 41-63 / K.N. Volkov, V.N. Emelyanov. Mathematical models of three-dimensional turbulent flows in the ducts with fluid injection. Mathematical Modeling, vol. 16, issue 10, 2004, pp. 41-63 (in Russian).

- [10] Benderskiy B.Y., Chernova A.A. Features of heat transfer in a pre-nozzle volume of a solid-propellant rocket motor with charges of complex shapes. Thermophysics and Aeromechanics, vol. 25, issue 2, 2018, pp. 265-272.
- [11] Koroleva M.R., Mishchenkova O.V. et al. A Theoretical research of the internal gas dynamics processes of measurements of hot air curtain with cross-flow fan. MM Science Journal, June, 2020, pp. 3966-3972.
- [12] Raeder T., Tenenev V., Chernova A., Koroleva M. Multilevel simulation of direct operated safety valve. In Proc. of the Ivannikov Ispras Open Conference (ISPRAS), 2018, pp. 109-115.
- [13] Редер Т., Тенев В.А. и др. Численное моделирование газодинамики предохранительного клапана. Интеллектуальные системы в производстве, том 15, вып. 4, 2017 г., с. 4-11 / Raeder T., Tenenev V.A. et al. Numerical modeling of the gas dynamics of the safety valve. Intelligent Systems in Manufacturing, vol. 15, issue 4, 2017, pp. 4-11 (in Russian).
- [14] Raeder T., Mishchenkova O.V. et al. Nonlinear processes in safety systems for substances with parameters close to a critical state. Russian Journal of Nonlinear Dynamics, vol. 17, issue 1, 2021, pp. 119-138.
- [15] Chernova A.A. Validation of rans turbulence models for the conjugate heat exchange problem. Russian Journal of Nonlinear Dynamics, vol. 18, issue 1, 2022, pp. 61-82.
- [16] Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. Proc. of the Fourth International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2003, pp. 625-632.
- [17] Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. AIAA Journal, vol. 32, issue 8, 1994, pp. 1598-1605.
- [18] Isaev S., Popov I. et al. Abnormal enhancement of separated turbulent air flow and heat transfer in inclined single-row oval-trench dimples at the narrow channel wall. Acta Astronautica, vol. 163, 2019, pp. 202-207.
- [19] Benderskiy B., Chernova A., Frankovský P. Numerical simulation of intrachamber processes in the power plant. Applied Sciences, vol. 11, issue 11, 2021, article no. 4990.
- [20] Benderskiy B.Y., Chernova A.A. Formation of vortex structures in channels with mass injection and their interaction with surfaces in solid-fuel rocket engines. Thermophysics and Aeromechanics, vol. 22, issue 2, 2015, pp. 185-190.
- [21] Савельев С.К., Емельянов В.Н., Бендерский Б.Я. Экспериментальные методы исследования газодинамики РДТТ. СПб., Недра, 2007 г., 267 стр. / Savelyev S.K., Emelyanov V.N., Benderskiy B.Ya. Experimental methods for studying the gas dynamics of solid propellant rocket engines. SPb, Nedra, 2007, 267p. (in Russian).
- [22] Benderskiy B. Ya., Tenenev V.A. Experimental and numerical investigation of flows in complex shaped axisymmetric channels with mass injection. Fluid dynamics, vol. 36, issue 2, 2001, pp. 336-340.

Информация об авторах / Information about authors

Борис Яковлевич БЕНДЕРСКИЙ – доктор технических наук, профессор кафедры Тепловые двигатели и установки. Сфера научных интересов: механика, процессы сопряженного теплообмена, двигатели летательных аппаратов, двигатели внутреннего сгорания, промышленный дизайн.

Boris Yakovlevich BENDERSKIY – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Thermal Engines and Installations. Research interests: mechanics, coupled heat exchange processes, aircraft engines, internal combustion engines, industrial design.

Алена Алексеевна ЧЕРНОВА – кандидат технических наук, доцент кафедры Тепловые двигатели и установки. Сфера научных интересов: газодинамика, гидродинамика, конвективный теплообмен, теплопередача, математическое моделирование.

Alena Alekseevna CHERNOVA – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Thermal Engines and Installations. Research interests: gas dynamics, hydrodynamics, convective heat exchange, heat transfer, mathematical modeling.