

Оценка влияния формы струевыпрямителей на коэффициенты гидравлического сопротивления и однородности потока в канале круглого сечения

© С.Ю. Нечипорук, С.В. Гусев, К.Ю. Арефьев, В.С. Захаров

ФАУ ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, 111116, Российская Федерация

На основе методов численного математического моделирования проведено исследование влияния основных геометрических параметров выпрямительных устройств, таких как размеры пропускных отверстий, длины и формы составляющих элементов струевыпрямителей, приведенных в ГОСТ 8.586.1–2005, на коэффициенты гидравлического сопротивления и однородности потока. Валидация математической модели выполнена на основе экспериментальных данных, изложенных в ГОСТ 8.586.1–2005. Серия численных расчетов для определения значений коэффициентов гидравлического сопротивления и однородности проведена при заданных граничных условиях и степени неоднородности потока. Для каждого выпрямительного устройства установлены оптимальные геометрические параметры с точки зрения минимизации коэффициента гидравлического сопротивления и повышения коэффициента однородности потока. По результатам сравнения этих коэффициентов для представленных выпрямительных устройств было выбрано такое из них, которое способствует образованию однородного потока с наименьшими гидравлическими потерями.

Ключевые слова: струевыпрямитель, численное моделирование, хонейкомб, гидравлические потери, однородность потока

Введение. Для создания равномерного и однородного газового потока в большинстве случаев используют выпрямительные решетки и сетки. Определенную эффективность для достижения равномерного и однородного течения показали выпрямительные устройства, каналы которых имеют квадратное сечение — хонейкомбы [1–4]. Для анализа эффективности и оценки характеристик подобных устройств проводятся экспериментальные и численные исследования [5–8]. В нормативном документе [9] приведены рекомендации для выбора типа и некоторых геометрических параметров струевыпрямительных устройств (СУ) на основе приведенных экспериментальных данных. Однако указанные в [9] рекомендации геометрических параметров и их значений не всегда могут соответствовать требуемой степени неоднородности потока. Помимо этого, экстраполяция исследуемых коэффициентов может приводить к значительной погрешности в их определении. Указанные диапазоны критериальных чисел подобия также могут существенно ограничивать область применения экспериментальных данных. В рамках настоящей работы рассматриваемое число Рейнольдса выходит за пределы экспериментальных данных, обозначенных в [9], таким образом, возникает необходимость в исследовании поведения

коэффициентов сопротивления и однородности потока при рассматриваемых условиях.

В качестве одного из критериев, характеризующего эффективность выпрямительного устройства, применяют коэффициент гидравлического сопротивления ξ [9], рассчитываемый по формуле

$$\xi = \frac{\Delta\omega}{0,5 \rho \cdot \bar{w}^2}, \quad (1)$$

где $\Delta\omega$ — потеря полного давления в СУ или устройстве подготовки потока (УПП); ρ — плотность среды; w — продольная составляющая локальной скорости среды в измерительном трубопроводе.

В соответствии с [9] струевыпрямительное устройство — техническое устройство для выполнения одной из функций УПП (устранения закрутки потока). Однако отсутствие четких рекомендаций или критерия для оценки их эффективности с точки зрения создания однородности течения без закрутки не позволяет сделать выбор в пользу конкретного выпрямительного устройства. В работах [10, 11] в качестве такого критерия выступает коэффициент однородности потока ζ , равный отношению среднерасходной скорости w_{cp} в рассматриваемом сечении к максимальной скорости w_{max} , представленный в формуле

$$\zeta = \frac{w_{cp}}{w_{max}}. \quad (2)$$

Цель настоящей работы — сравнение эффективности ряда СУ на примере модельной задачи повышения однородности газового потока в цилиндрическом канале. Проведенное исследование позволило получить зависимости коэффициентов гидравлического сопротивления ξ и однородности потока ζ от характерных геометрических параметров для каждого выпрямительного устройства.

Выбор геометрических параметров модельного канала круглого сечения для ряда выпрямительных устройств. Были рассмотрены СУ трех типов, представленные на рис. 1. Это наиболее типовые СУ, объединяющие в себе большую часть характерных отличительных черт всего набора устройств, представленных в [9].

В качестве модельного тракта, в рамках которого исследованы характеристики и выявлены зависимости, было принято использовать цилиндрический канал (рис. 2).

Для того чтобы создать определенную степень неоднородности потока, газ в расчетную область подавался через два патрубка на границе I (см. рис. 2) в тангенциальном направлении относительной оси основного канала круглого сечения диаметром d .

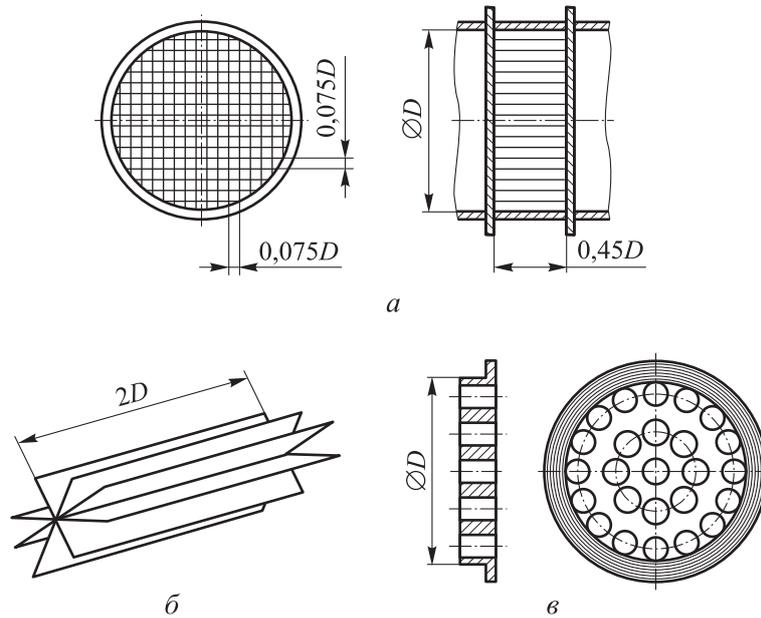


Рис. 1. Струевыпрямительные устройства разного типа:
a — струевыпрямитель «АМСА»; *б* — струевыпрямитель Etoile; *в* — устройство подготовки потока K-Lab NOVA

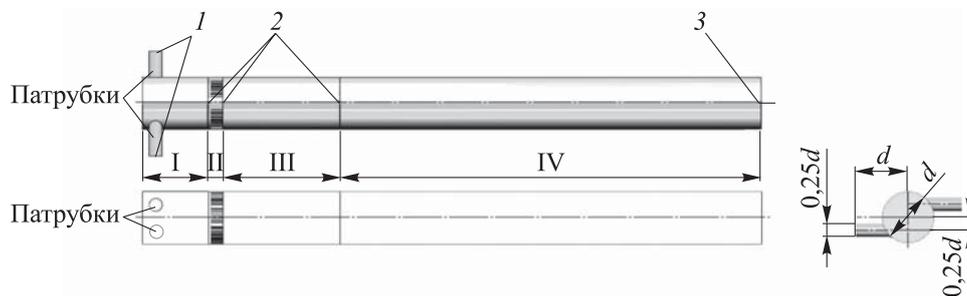


Рис. 2. Модельный канал круглого сечения:
 I–IV — области разбиения расчетной модели; 1–3 — границы областей разбиения

Весь канал был разделен на четыре области: I — область перед спрямляющим устройством, в которой происходило смешение двух потоков и образование вихревой неоднородной зоны, длина области I равнялась d ; II — область, в которой располагался струевыпрямитель, ее длина варьировалась в соответствии с рекомендациями, приведенными в [9]; III — первая контрольная область, ее первое сечение совпадает с выходной границей струевыпрямителя, второе — находится на расстоянии $2d$; IV — вторая контрольная область, замыкающая граница которой 2 (см. рис. 2) находится на расстоянии $8d$ от ее начальной плоскости. Значения длин контрольных областей выбирались исходя из предварительных расчетов СУ таким образом, чтобы

их суммарная длина равнялась $10d$. Размеры и расположение патрубков относительно основного канала, а также расположение контрольных сечений 3, в которых происходило измерение параметров для определения коэффициентов ζ и ξ , приведены на рис. 2.

Постановка задачи численного моделирования. Численные исследования влияния геометрических параметров СУ на коэффициенты ζ и ξ проводились с помощью программ моделирования газовой динамики совершенного вязкого теплопроводного газа. Основа численного метода — решение полной системы уравнений Навье — Стокса методом конечных объемов. Этот метод позволяет выполнить дискретизацию уравнений движения газа в консервативной форме. Дискретизация по пространству проводилась со вторым порядком точности. В качестве схемы для расчета потоков на границах ячеек использовалась схема AUSM+ [12]. Моделирование выполнялось в трехмерной постановке с локальным шагом по времени (число Куранта CFL = 4), модель турбулентности — Transition SST. На границе 1 (см. рис. 2) задавались следующие граничные условия: статическая температура 300К, скорость потока 100 м/с, направленная по нормали к поверхности входа. Число Рейнольдса равнялось $6,5 \cdot 10^4$, диаметр канала $d = 100$ мм. Шероховатость в данной постановке задачи не учитывалась. На границе 2 задавалось статическое давление, равное 10^5 Па. На остальных границах принимались условия гидравлически гладкой теплоизолированной стенки без проскальзывания потока. В качестве модели среды рассматривался газ с переменными теплофизическими и транспортными свойствами, зависящими от температуры. В расчетах значение температуры оставалось неизменным, однако функция $C_p(T)$ подразумевает реальные свойства газа. Расчеты велись до установления сходимости, определяемой равенством расходов в контрольных сечениях 1 и 2.

Для каждого из рассматриваемых СУ были выбраны характерные геометрические параметры и диапазон их варьирования, а также построены расчетные сетки.

Первым в рассмотренной серии СУ для спрямления потока выступает *струевыпрямительное устройство АМСА* (рис. 3, а), имеющее сотовую конструкцию с квадратными ячейками (рис. 3, б), параметры которых приведены (рис. 3, в). Исходя из рекомендаций, ребра должны быть как можно более тонкими, но обеспечивающими необходимую прочность конструкции. Были приняты: высота ячейки $H = 0,075d$, длина данного СУ $L = 0,45d$ для всего диапазона изменяемых параметров.

Для данного струевыпрямителя было предложено рассмотреть изменение значений геометрических параметров S и H в следующих диапазонах:

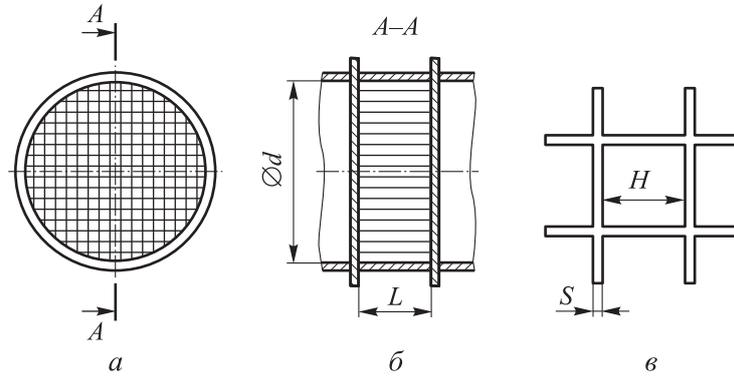


Рис. 3. Струевыпрямительное устройство АМСА:

a — общий вид; *b* — разрез в плоскости ячейки СУ; *в* — схема одного элемента (*L* — длина СУ; *S* — толщина ребра, разделяющего ячейки; *H* — высота ячейки, равная ее ширине)

толщина ребра S варьировалась от $0,0025d$ до $0,01d$ с шагом $0,0025d$;

высота ячейки H варьировалась от $0,0375d$ до $0,075d$, шаг на границах диапазона равнялся $0,0025D$ и $0,01d$ — ближе к середине диапазона. Такой шаг был назначен с целью исследования поведения зависимостей $\zeta(H)$ и $\xi(H)$ на границах рассматриваемого диапазона для H .

Для данной модели струевыпрямителя была построена расчетная сетка (рис. 4), состоящая в среднем из 11–14 млн полиэдрических ячеек со сгущением в пристеночной области. Число призматических слоев в пограничном слое задавалось равным 6. Минимальный размер ячейки варьировался в зависимости от ее толщины, находящейся в диапазоне $0,05 \dots 0,07$ мм. Нижнее число диапазона соответствует конфигурации с большими величинами параметров H и S , верхнее — с меньшими.

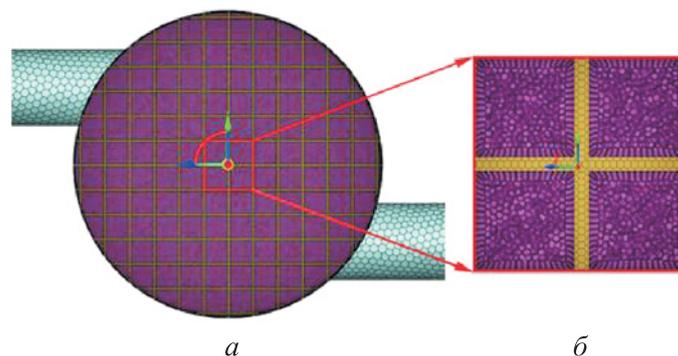


Рис. 4. Полиэдрическая сетка расчетной области СУ для модели АМСА:

a — сечение канала в области СУ; *б* — область сегмента ячеек (увеличена)

Вторым струевыпрямительным устройством в обсуждаемой линейке выступает модель *Etoile*, приведенная на рис. 1, б. Это СУ состоит из восьми радиальных лопастей, расположенных под равными углами. Их длина равна удвоенному диаметру канала. Согласно [9], лопасти рекомендуется изготавливать как можно более тонкими, но достаточно прочными.

Для данного струевыпрямителя было проведено исследование влияния количества установленных пластин N на коэффициенты ζ и ξ . Количество пластин варьировалось в диапазоне от 4 до 36 с шагом 2.

Расчетная сетка для рассматриваемого СУ (рис. 5) состоит примерно из 7–9 млн полиэдрических ячеек со сгущением в пристеночной области. Меньшее число ячеек соответствует наименьшему числу пластин (4), большее — наибольшему (36). Число призматических слоев в пограничном слое задавалось равным 6.

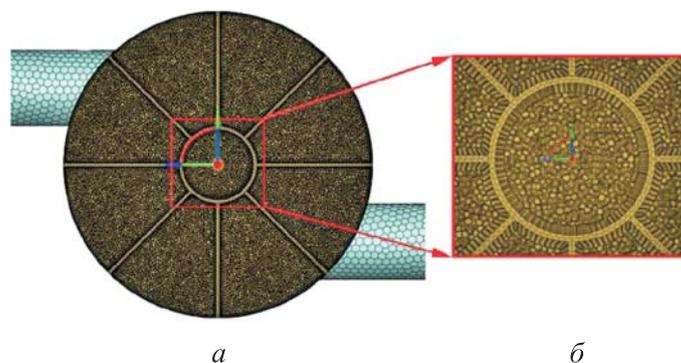


Рис. 5. Полиэдрическая сетка расчетной области модели *Etoile*:
a — сечение канала в области СУ; *б* — область сегмента ячеек (увеличена)

Заключительным выпрямительным устройством в рассматриваемой линейке выступает УПП *K-Lab NOVA*, состоящее из диска с 25 отверстиями (рис. 6). Согласно [9], толщина, наружный диаметр и лицевая поверхность фланца зависят от его типа и применения. Размеры отверстий являются функцией внутреннего диаметра трубопровода и числа Re . Толщина перфорированного диска L , согласно [9], должна находиться в пределах от $0,125d$ до $0,15d$. Рекомендации для значений диаметра меньших отверстий задаются в зависимости от значения числа Рейнольдса. Однако число Рейнольдса в исследуемой задаче выходит за границы, представленные в [9], в связи с чем возникает необходимость проведения серии расчетов с варьированием рассматриваемых геометрических параметров.

Для данного УПП значение толщины перфорированного диска L варьировалось в диапазоне $0,05...0,15d$ с шагом $0,0125d$. Диаметры отверстий ΔD варьировались в диапазоне $0,9...1,1 D$

с шагом $0,05D$, где базовое значение диаметра выбиралось согласно [9]: для центрального отверстия $D = 0,18629d$, 8 отверстий диаметром $D = 0,163d$, центры которых расположены на окружности диаметром $0,5d$, 16 отверстий диаметром $D = 0,1203d$ с центрами на окружности диаметром $0,85d$.

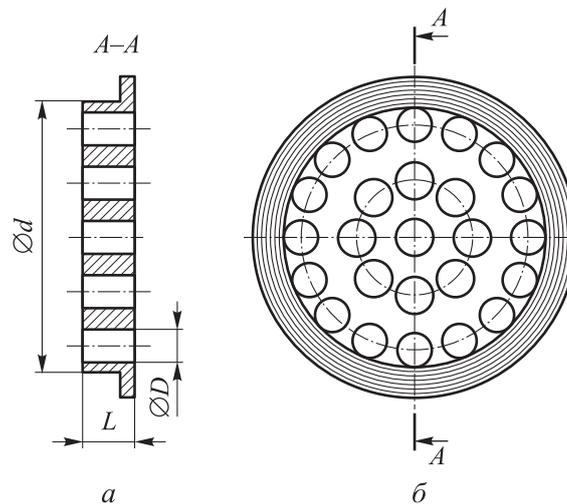


Рис. 6. УПП К-Lab NOVA:
a — общий вид; *б* — разрез в плоскости *SU*

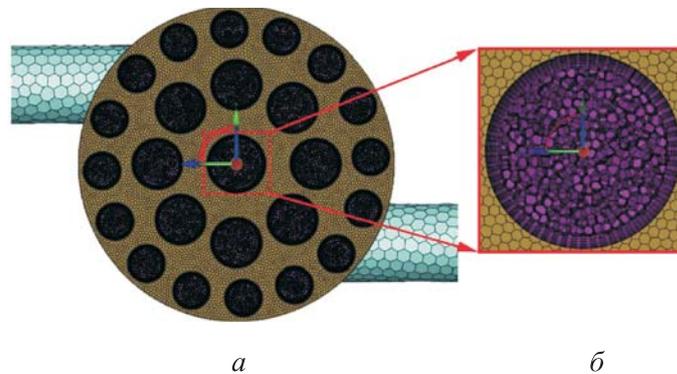


Рис. 7. Полиэдрическая сетка расчетной области в сечении выпрямительного устройства (*a*) и область сегмента центрального отверстия (*б*) (увеличена)

Пример расчетной сетки для данного УПП приведен на рис. 7. Общее число полиэдрических ячеек составляло ≈ 9 млн со сгущением в пристеночной области. Число призматических слоев в пограничном слое задавалось равным 6.

Результаты численного моделирования. Зависимости коэффициентов ζ и ξ от характерных геометрических параметров СУ АМСА приведены на рис. 8 и 9 соответственно. Параметры на входном граничном условии оставались неизменными. Исходя из рекомендаций, приведенных в [9], коэффициент ξ может быть равен 0,25. На основе полученных данных и анализа зависимостей можно сделать вывод о том, что при увеличении толщины ячейки H коэффициенты гидравлического сопротивления и степени однородности потока уменьшаются, причем эти зависимости близки к линейным. При увеличении толщины перегородки S наблюдается рост коэффициентов ζ и ξ .

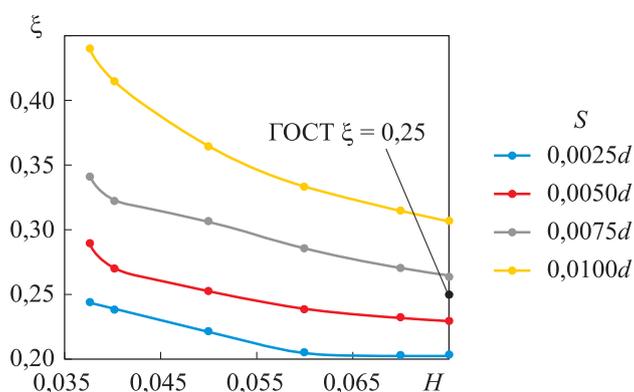


Рис. 8. Зависимость коэффициента ξ от параметров S и H

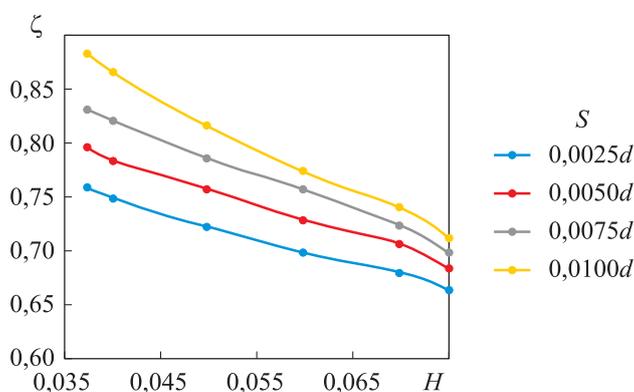


Рис. 9. Зависимость коэффициента ζ от параметров S и H

При сравнении с экспериментальными значениями установлено, что заявленный коэффициент $\xi = 0,25$ обеспечивается при характерных размерах параметров $S \approx 0,00625d$ и $H = 0,075d$ (значение H выбрано из [9] как $0,075d$) и при $S = 0,005d$ и $H = 0,05d$ (взято произвольное значение H из рассматриваемого диапазона), коэффициент ζ равняется 0,684 и 0,757 соответственно. Приведенные данные подтверждают корректность используемой математической модели для

описания течения подобного класса без потери точности вычислений параметров потока. Линии тока в расчетной области вблизи СУ приведены на рис. 10.

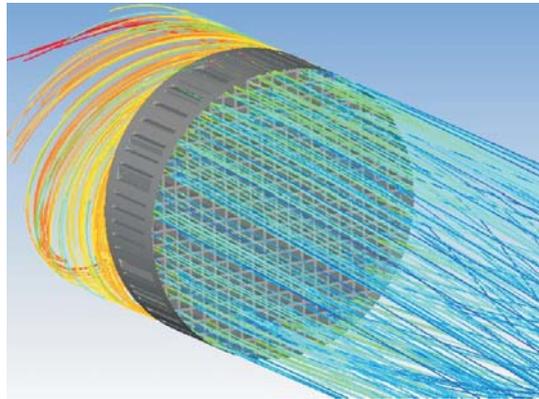


Рис. 10. Линии тока в области СУ АМСА

Полученные зависимости коэффициентов ζ и ξ от геометрического параметра N для струевыпрямителя Etoile приведены на рис. 11, *a* и *б* соответственно. Зависимость ξ от N имеет выраженный экстремум, находящийся в районе 8 и 26 пластин. Зависимость ξ от N имеет убывающий характер на отрезке при $N = 8 \dots 26$. Подобное поведение может быть обусловлено снижением интенсивности основного вихря в потоке. Таким образом, несмотря на растущую суммарную площадь поверхности пластин, итоговое значение коэффициента ξ снижается. При $N = 8$ значение ξ совпадает с рекомендованным в [9] ($\xi = 0,25$) с точностью 1,2 %. При $N = 26$ достигается наименьшее значение — $\xi = 0,213$.

Зависимость ζ от N имеет возрастающий характер на всем рассматриваемом диапазоне, за исключением отрезка при $N = 20 \dots 28$. Увеличение числа пластин способствует образованию более однородного потока, при $N = 36$ коэффициент $\zeta \approx 0,93$. Линии тока в расчетной области вблизи СУ приведены на рис. 13.

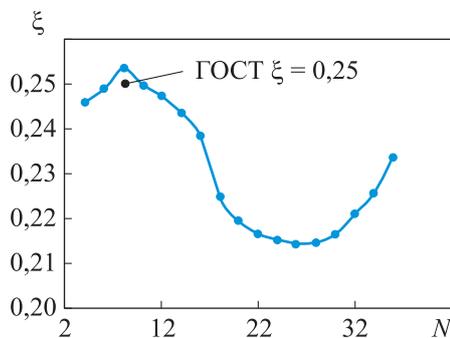


Рис. 11. Зависимость коэффициента ξ от числа пластин N

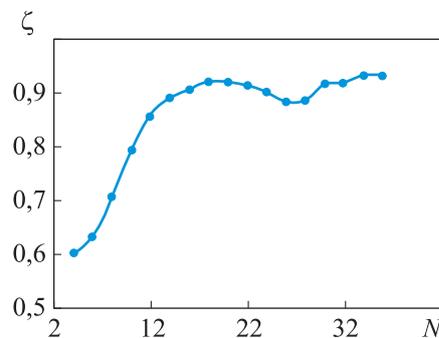


Рис. 12. Зависимость коэффициента ζ от числа пластин N

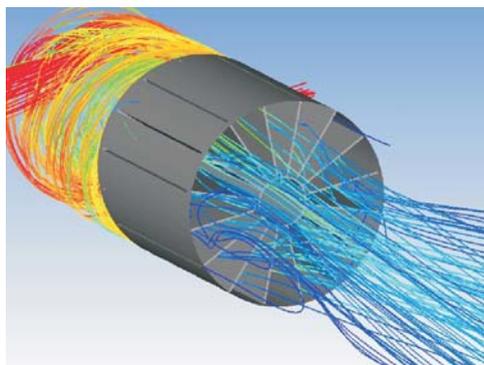


Рис. 13. Линии тока в области СУ Etoile

Полученные зависимости коэффициентов ξ и ζ от геометрических параметров L и d для УПП К-Lab NOVA приведены на рис. 14, 15 соответственно. Зависимости коэффициентов ξ и ζ от L монотонно возрастают, что можно интерпретировать как увеличение гидравлических потерь, связанных с расширением поверхности взаимодействия потока с УПП.

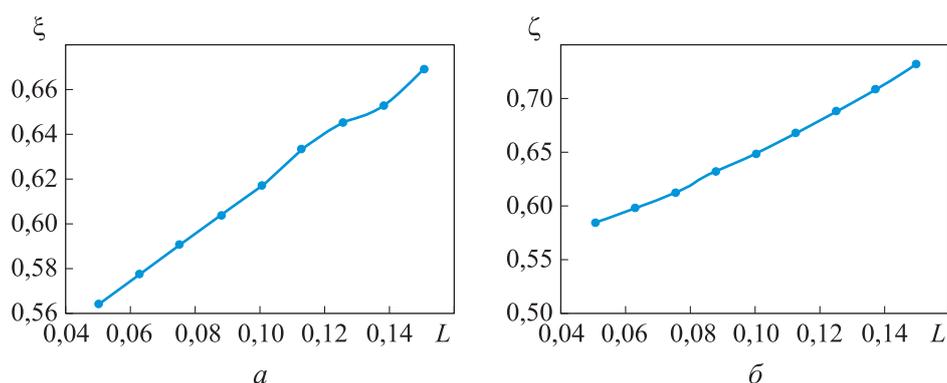


Рис. 14. Зависимость коэффициентов ξ (а) и ζ (б) от толщины диска L

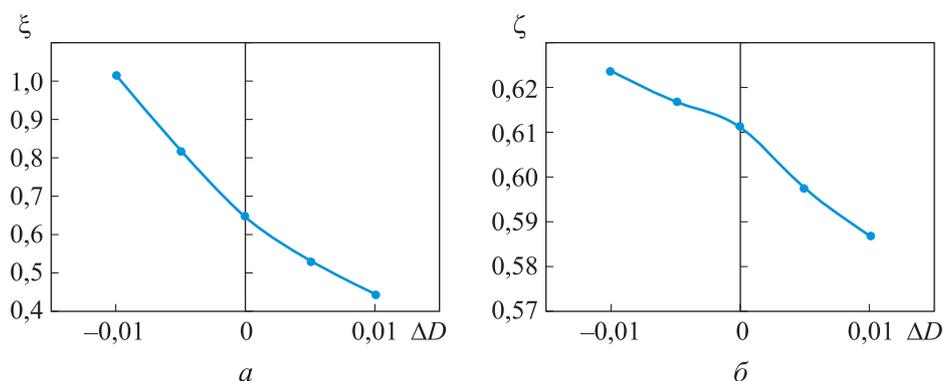


Рис. 15. Зависимость коэффициентов ξ (а) и ζ (б) от изменения диаметра d

При варьировании геометрического параметра d зависимости $\xi(d)$ и $\zeta(d)$ имеют убывающий характер, а при уменьшении диаметра отверстий коэффициент гидравлических потерь и коэффициент однородности потока возрастают. Линии тока в расчетной области вблизи струевыпрямителя приведены на рис. 16.

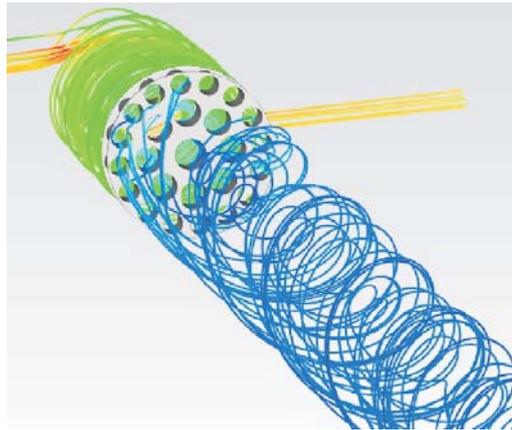


Рис. 16. Линии тока в области УПП K-Lab NOVA

Сводный график зависимостей коэффициента ζ от ξ для всей линейки рассматриваемых СУ приведен на рис. 17. Исходя из приведенных данных, можно утверждать, что наилучшим из рассмотренной линейки выпрямительных устройств с точки зрения минимизации гидравлических потерь и организации однородного течения выступает струевыпрямитель Etoile. Наиболее оптимальное значение коэффициентов ζ и ξ в рассматриваемом диапазоне варьирования геометрических параметров достигается при числе пластин N , равном 26 и 32.

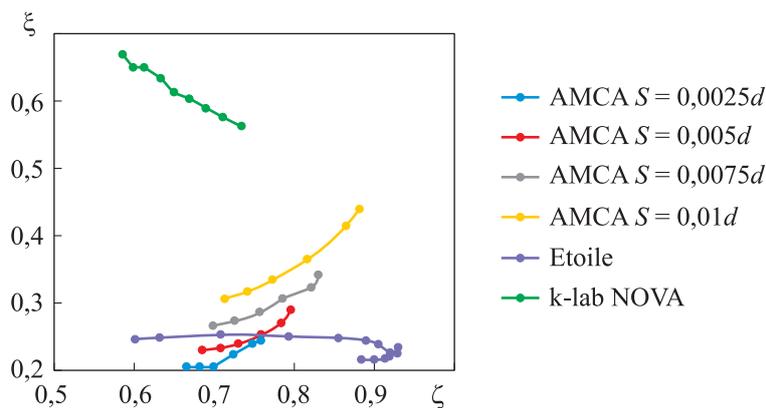


Рис. 17. Сводный график зависимостей коэффициента ξ от ζ

Следует отметить, что при варьировании числа пластин изменение коэффициента гидравлического сопротивления потока незначительно, в то время как коэффициент гидравлического сопротивления изменяется более чем на 30 % на границах рассматриваемого диапазона. Наименее функциональным СУ в рассматриваемой линейке оказалось устройство подготовки потока K-Lab NOVA. В рассматриваемом диапазоне варьируемых параметров данное СУ обладает наибольшим коэффициентом сопротивления потока, одновременно обеспечивая его наихудшую равномерность.

Для повышения эффективности использования СУ разных типов возможна их последовательная установка. Например, при наличии значительной неоднородности потока и вихревых зон в начале зоны спрямления может располагаться УПП K-Lab NOVA с последующим расположением СУ типа АМСА. Возможность комбинирования различных СУ и их эффективность будут рассмотрены в следующих работах.

Заключение. В ходе выполнения данного исследования были получены следующие результаты.

- На основании проведенного численного моделирования течения в канале круглого сечения для СУ трех типов были получены зависимости коэффициентов ζ и ξ от геометрических параметров устройств.

- В результате представленного сравнения трех выпрямительных устройств — АМСА, Etoile и K-Lab NOVA — струевыпрямитель Etoile показал наилучшие свойства: при наименьшем коэффициенте сопротивления обеспечивается один из наибольших коэффициентов однородности потока.

- Установлено, что при наличии 26 пластин у СУ Etoile обеспечивается близкий к максимальному ($\zeta = 0,93$) коэффициент однородности потока $\zeta = 0,882$ и наименьший коэффициент гидравлического сопротивления $\xi = 0,213$.

- Выявлено, что УПП K-Lab NOVA при тех же значениях степени однородности потока ζ обладает наибольшим коэффициентом гидравлического сопротивления ξ среди рассматриваемых устройств.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дербунович Г.И., Лаврухина С.П., Михайлова Н.П., Репик Е.У., Соседко С.П. Гидравлическое сопротивление хонейкомба. *Ученые записки ЦАГИ*, 1993, т. 24, № 2, с. 107–113.
- [2] Александров И.Б., Куркин Е.И., Лукьянов О.Е., Садыкова В.О., Шахов В.Г. Численное моделирование формирования потока в круглой трубе за хонейкомбом. *Известие Самарского научного центра Российской академии наук*, 2016, т. 18, № 4, с. 115–119.
- [3] Дербунович Г.И., Земская А.С., Репик Е.У., Соседко Ю.П. Гидравлическое сопротивление перфорированных решеток. *Ученые записки ЦАГИ*, 1984, т. 15, № 2, с. 114–118.

- [4] Михайлова Н.П., Репик Е.У., Соседко Ю.П. Сочетание хонейкомба с сеткой для подавления турбулентности потока. *Ученые записки ЦАГИ*, 1998, т. 29, № 1–2, с. 86–94.
- [5] Богданов В.В., Казарян А.А. Измерение пульсаций давления в ячейках хонейкомба с помощью тонкопленочных датчиков. *Учебные записки ЦАГИ*, 1992, т. 23, № 2, с. 85–89.
- [6] Yujun Li, Zhiyong Zhao, Chuang Liu, Qi Liu, Lishuai Sun, Junbiao Wang. A novel method to eliminate the bending-induced collapse of hexagonal honeycomb. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, vol. 36, no. 10, pp. 262–274.
- [7] Hangyu Lv., Shanshan Shi, Bingzhi Chen, Jiaxin Ma. Low-velocity impact response of composite sandwich structure with grid–honeycomb hybrid core. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, vol. 246, pp. 26–39.
- [8] Kulkarni V., Sahoo N., Chavan S. Simulation of honeycomb–screen combinations for turbulence management in a subsonic wind tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, vol. 99, no. 1, pp. 37–45.
- [9] ГОСТ 8.586.1–2005. *Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств*. Москва, 2005, 51 с.
- [10] Зарянкин А.Е., Григорьев Е.Ю., Водениктов А.Д. Разработка и исследование новой серии струевыпрямителей для стабилизации течений рабочей среды в сложных трубопроводах. *Электроэнергетика глазами молодежи*, 2015, т. 2, с. 396–401.
- [11] Балабина Т.Ю., Дерюгин Ю.Н. Применение открытопористых структур как ламинаризатора потока в канале. Численная оценка влияния конструкции на однородность течения. *Шестнадцатая Международная конференция «Дифференциальные уравнения и их приложения в математическом моделировании»*. Саранск 17–20 августа 2023 г. Изд-во СВМО, 2023, с. 25–30.
- [12] Liou M.S., Steffen C.J. A new flux splitting scheme. *J. Computational Physics*, 1993, vol. 107, no. 1, pp. 23–39.

Статья поступила в редакцию 05.06.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Нечипорук С.Ю., Гусев С.В., Арефьев К.Ю., Захаров В.С. Оценка влияния формы струевыпрямителей на коэффициенты гидравлического сопротивления и однородности потока в канале круглого сечения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 8. EDN OIYHDE

Нечипорук Сергей Юрьевич — Федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», инженер сектора 012-04 «Расчетно-теоретических и обликковых испытаний».
e-mail: sergey.nechiporuchok@gmail.com

Гусев Сергей Владимирович — Федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», науч. сотрудник сектора 012-04 «Расчетно-теоретических и обликковых испытаний».

Арефьев Константин Юрьевич — д-р техн. наук, Федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», директор исследовательского центра «Аэрокосмические двигатели и химмотология».

Захаров Вячеслав Сергеевич — Федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», начальник сектора 012-04 «Расчетно-теоретических и обликковых испытаний».

Assessment of the jet rectifier shape influence on the hydraulic resistance and flow homogeneity coefficients in a circular channel

© S.Yu. Nechiporuk, S.V. Gusev, K.Yu. Arefyev, V.S. Zakharov

Central Institute of Aviation Motors, CIAM,
Moscow, 111116, Russian Federation

The paper presents results of studying the jet rectifier main geometric parameters influence on the jet hydraulic resistance ζ and homogeneity ζ coefficients. Those jet parameters included dimensions of the through holes, and lengths and shapes of the jet rectifier constituent elements considered in GOST 8.586.1–2005. The study was performed using the numerical simulation methods. The mathematical model was assessed by applying the experimental data presented in GOST 8.586.1–2005. A series of numerical computations to determine the ζ and ζ values were conducted under the specified boundary conditions and the flow non-uniformity degree. For each jet rectifier, the optimal geometric parameters were determined in terms of minimizing the hydraulic resistance coefficient and increasing the flow uniformity coefficient. Based on the results of comparing the ζ and ζ coefficients for the presented jet rectifiers, a jet rectifier was selected that ensured formation of a uniform flow with the lowest hydraulic losses.

Keywords: jet rectifier, numerical simulation, honeycomb, hydraulic losses, flow uniformity

REFERENCES

- [1] Derbunovich G.I., Lavrukhina S.P., Mikhaylova N.P., Repik E.U., Sosedko S.P. Gidravlichesкое soprotivlenie khoneykomba [Honeycomb hydraulic resistance]. *Uchenye zapiski TsAGI — TsAGI Science Journal*, 1993, vol. 24, no. 2, pp. 107–113.
- [2] Aleksandrov I.B., Kurkin E.I., Lukyanov O.E., Sadykova V.O., Shakhov V.G. Chislennoe modelirovanie formirovaniya potoka v krugloy trube za khoneykombom [Computational simulation of the flow formation in the circular pipe after the honeycomb]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk — Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 115–119.
- [3] Derbunovich G.I., Zemskaya A.S., Repik E.U., Sosedko Yu.P. Gidravlichesкое soprotivlenie perforirovannykh reshetok [Hydraulic resistance of the perforated meshes]. *Uchenye zapiski TsAGI — TsAGI Science Journal*, 1984, vol. 15, no. 2, pp. 114–118.
- [4] Mikhaylova N.P., Repik E.U., Sosedko Yu.P. Sochetanie khoneykomba s setkoy dlya podavleniya turbulentnosti potoka [Honeycomb combination with a mesh to suppress flow turbulence]. *Uchenye zapiski TsAGI — TsAGI Science Journal*, 1998, vol. 29, no. 1–2, pp. 86–94.
- [5] Bogdanov V.V., Kazaryan A.A. Izmerenie pulsatsiy davleniya v yacheykakh khoneykomba s pomoshchyu tonkopenochnykh datchikov [Measurement of pressure pulsations in the honeycomb cells using the thin-film sensors]. *Uchenye zapiski TsAGI — TsAGI Science Journal*, 1992, vol. 23, no. 2, pp. 85–89.
- [6] Yujun Li, Zhiyong Zhao, Chuang Liu, Qi Liu, Lishuai Sun, Junbiao Wang. A novel method to eliminate the bending-induced collapse of hexagonal honeycomb. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, vol. 36, no. 10, pp. 262–274.

- [7] Hangyu Lv., Shanshan Shi, Bingzhi Chen, Jiaxin Ma. Low-velocity impact response of composite sandwich structure with grid–honeycomb hybrid core. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, vol. 246, pp. 26–39.
- [8] Kulkarni V., Sahoo N., Chavan S. Simulation of honeycomb–screen combinations for turbulence management in a subsonic wind tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, vol. 99, no. 1, pp. 37–45.
- [9] GOST 8.586.1–2005. *Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkostey i gazov s pomoshchyu standartnykh suzhayushchikh ustroystv* [Measurement of liquids and gases flow rate and quantity by means of orifice instruments]. Moscow, 2005, 51 p.
- [10] Zaryankin A.E., Grigoriev E.Yu., Vodeniktov A.D. Razrabotka i issledovanie novoy serii struevypryamiteley dlya stabilizatsii techeniy rabochey sredy v slozhnykh triboprovodakh [Development and investigation of a new series of streetapella to stabilize the flow of a working environment in complex pipelines]. *Elektroenergetika glazami molodezhi — Electric Power Industry through the Eyes of Youth*, 2015, vol. 2, pp. 396–401.
- [11] Balabina T.Yu., Deryugin Yu.N. Primenenie otkrytoporistykh struktur kak laminizatora potoka v kanale. Chislennaya otsenka vliyaniya konstruktssii na odnorodnosti techeniya [Application of the open-pore structures as a flow laminarizer in a channel. Numerical assessment of the design influence on the flow homogeneity]. *Shestnadsataya Mezhdunarodnaya konferentsiya: Differentsialnye uravneniya i ikh prilozheniya v matematicheskom modelirovanii* [Sixteenth International Conference: Differential Equations and Their Applications in the Mathematical Simulation]. Saransk, August 17–20, 2023. SVMO Publ., 2023, pp. 25–30.
- [12] Liou M.S., Steffen C.J. A new flux splitting scheme. *J. Computational Physics*, 1993, vol. 107, no. 1, pp. 23–39.

Nechiporuk S.Yu., Engineer, Sector 012-04 “Computational, Theoretical and Formation Testing”, Central Institute of Aviation Motors, CIAM.
e-mail: sergey.nechiporuchok@gmail.com

Gusev S.V., Researcher, Sector 012-04 “Computational, Theoretical and Formation Testing”, Central Institute of Aviation Motors, CIAM.

Arefyev K.Yu., Dr. Sc. (Eng.), Director of the Research Center “Aerospace Engines and Chemotology”, Central Institute of Aviation Motors, CIAM.

Zakharov V.S., Head of Sector 012-04 “Computational, Theoretical and Formation Testing”, Central Institute of Aviation Motors, CIAM.