

Методика сравнительной оценки эффективности смесительных устройств в модельных каналах

© К.И. Новоселов, В.С. Захаров

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

Представленная методика проведения предварительной сравнительной оценки эффективности смесительных устройств (смесителей) основана на численном моделировании процессов смешения двух газов (с полностью одинаковыми теплофизическими свойствами) в тракте с установленным смесителем. Эффективность смесителей оценивается по двум критериям: качеству смешения ψ и относительным потерям полного давления Δp . Для демонстрации методики рассмотрены смесители трех типов с варьируемыми геометрическими размерами. Показана простота применения методики сравнительной оценки смесителей, выявлен ее недостаток — зависимость результатов оценки от способа разбиения входной границы для раздельной подачи газов.

Ключевые слова: математическое моделирование, смесительное устройство, сравнительная оценка, численное исследование

Введение. Одним из способов повышения эффективности рабочего процесса в воздушно-реактивных двигателях является интенсификация смешения топлива с воздухом путем установки смесительного устройства (смесителя). К настоящему моменту существует множество различных конфигураций смесителей [1–4], и на начальной стадии проектирования возникает необходимость их сравнения для выбора оптимального варианта.

Оценить эффективность смесителя возможно двумя способами. Первый способ — экспериментальный. Он самый достоверный, но в то же время и самый ресурсоемкий. Второй способ — численное моделирование рабочего процесса с построением математической модели, учитывающей двухфазность течения, дробление и испарение капель, горение. Однако подробное численное моделирование также ресурсоемко.

Теме оценки эффективности смесителей посвящено немало работ, например [5–8], в которых используются различные критерии оценки эффективности смесителей. Так, в работе [5] таким критерием служит диссипация энергии — энергия, затрачиваемая в единицу времени на преодоление трения частиц единицы массы жидкой среды для смешения ее компонентов. В работе [7] в качестве критерия используют мощность, необходимую для подачи смеси, а в работе [8] — коэффициент, учитывающий перепад давления и однородность перемешивания сред.

Цель настоящей работы — продемонстрировать применение методики, разработанной для проведения сравнительной оценки

эффективности смесителей разных типов, и провести анализ результатов ее применения.

Критериями сравнительной оценки эффективности смесителей в данной методике являются две величины: критерий качества смешения ψ и относительные потери полного давления Δp (способ их расчета приведен ниже).

Методика оценки эффективности смесителей. Методика основана на численном моделировании процессов смешения двух газов с полностью одинаковыми теплофизическими свойствами. Для этого исследуемые смесители устанавливались в проточный тракт (рис. 1), выполненный с круглым поперечным сечением. Раздельная подача газов осуществлялась разбиением входной границы на две части (на рисунке отмечены синим и серым цветами).

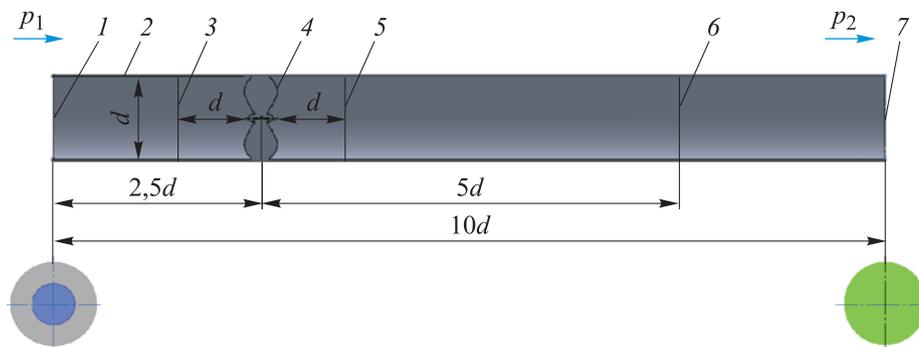


Рис. 1. Геометрия тракта:

1 — входная граница; 2 — стенка тракта; 3, 5 — контрольные сечения для определения потерь полного давления; 4 — смеситель; 6 — контрольное сечение для определения критерия качества смешения ψ ; 7 — выходная граница; d — диаметр сечения; p_1, p_2 — давление газа до и после смесителя

Граничным условием на входной границе является полное давление подаваемых в тракт газов, на выходной — статическое давление выходящего потока. В демонстрационных расчетах на входной границе (круглое сечение диаметром d) были взяты следующие значения критериев подобия Рейнольдса и Маха: $Re = 5,253 \cdot 10^6$; $M = 0,527$.

Эффективность смесителей оценивалась по двум критериям. Первый критерий — качества смешения ψ , определяемый выражением

$$\psi = 1 - \frac{1}{A} \left(\frac{\iint \rho w \left(g_1 - \frac{G_1}{G} \right)^2 df}{G} \right); \quad A = \frac{F_1 F_2}{(F_1 + F_2)^2},$$

где A — нормирующий множитель, обеспечивающий изменение критерия в пределах от нуля до единицы; ρ — плотность потока;

w — скорость потока; g_1 — массовая доля первого газа; G_1 — массовый расход первого газа; G — суммарный массовый расход газов; df — элементарная площадь; F_1, F_2 — площади областей, через которые подаются первый и второй газы соответственно.

Равенство критерия ψ нулю соответствует полностью несмешанному потоку (на входе в тракт), а равенство единице — полностью смешанному потоку.

Второй критерий оценки — относительные потери полного давления Δp , рассчитываемые по формуле

$$\Delta p = \frac{p_1^* - p_2^*}{p_1^*},$$

где p_1^* , p_2^* — полное давление в контрольных сечениях до и после смесителя соответственно.

Следует отметить, что и конфигурация тракта, и разбиение входной границы в рамках данного метода могут приниматься любыми. Однако для конкретной практической задачи их необходимо брать такими, чтобы как можно лучше моделировать реальные условия.

Демонстрация применения методики оценки эффективности смесителей. Для численного исследования процессов смешения использовали программу ANSYS Fluent. В основе численного метода лежит метод конечных объемов. Для учета влияния турбулентности осредненные уравнения Навье — Стокса замыкаются двухпараметрической моделью турбулентности SST $k-\omega$ [9], в которой к стандартным уравнениям (количества движения, неразрывности и энергии) добавляются два дополнительных уравнения переноса: для кинетической энергии турбулентности и удельной скорости диссипации. Турбулентность на входной границе задается значениями интенсивности турбулентности и турбулентной вязкостью. Так как течение двухкомпонентное, помимо данных соотношений к системе уравнений добавляется одно уравнение переноса второго компонента.

Для применения методов численной газодинамики в расчетной области строили неструктурированную сетку [10] с использованием программы ANSYS Fluent.

В целях демонстрации методики были рассмотрены три типа смесителей: уголкового кольцевого смеситель, смеситель с плоскими лопатками, смеситель с профилированными лопатками. На рис. 2 приведена геометрия смесителей и поля распределения числа Маха при их обтекании.

Дополнительно исследовалось влияние не только типов, но и конкретных геометрических размеров на эффективность смешения компонентов. Для этого у каждого типа смесителей варьировались определенные геометрические размеры: у уголкового кольцевого

смесителя — ширина основания треугольника $(0,025 \dots 0,1)d$, где d — диаметр проточного тракта; у смесителя с плоской лопаткой — угол установки лопатки $(0 \dots 20^\circ)$; у смесителя с профилированной лопаткой — угол наклона задней (по потоку) части профиля $(3,95 \dots 15^\circ)$.

Разбиение входной границы для раздельной подачи компонентов осуществлялось двумя способами: «кольцо» и «полукруг» (рис. 3).

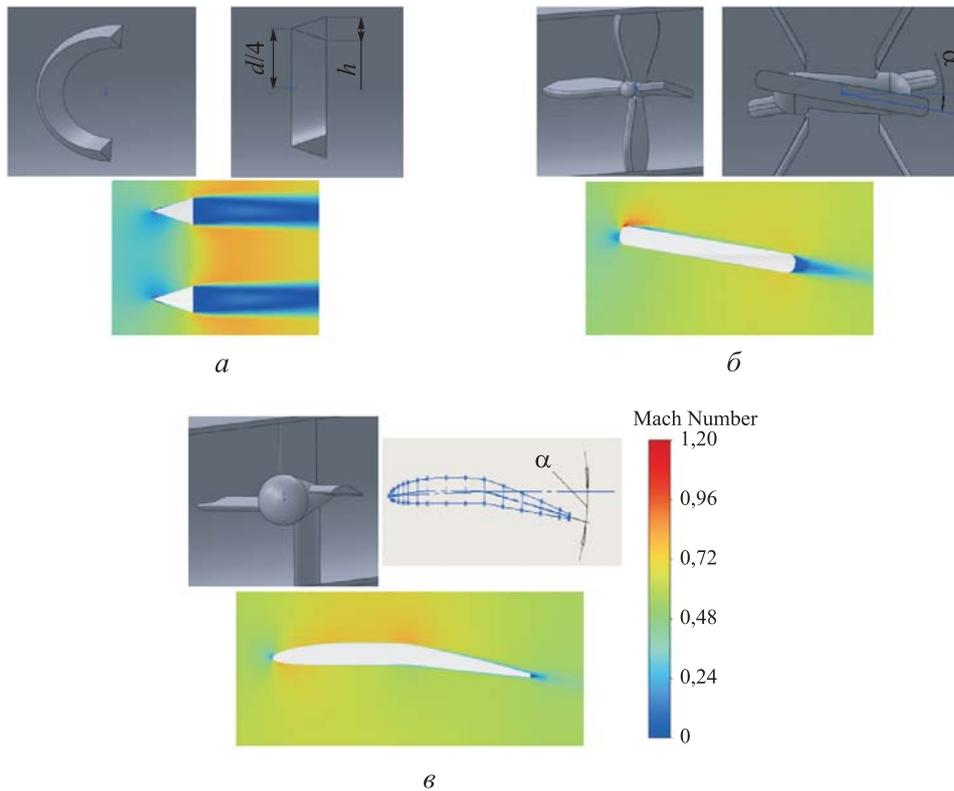


Рис. 2. Типы смесителей:

a — уголкового кольцевой смеситель; *б* — смеситель с плоской лопаткой;
в — смеситель с профилированными лопатками

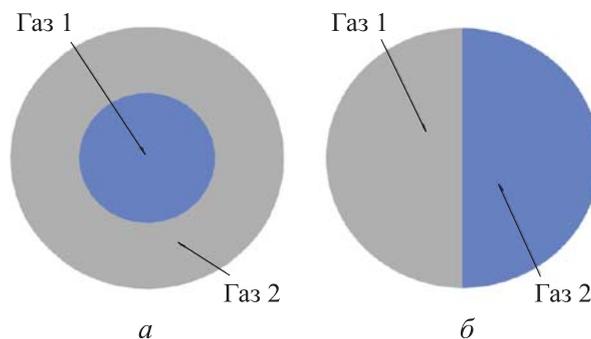


Рис. 3. Способы дробления входной границы для подачи компонентов (способы подачи компонентов):

a — «кольцо»; *б* — «полукруг»

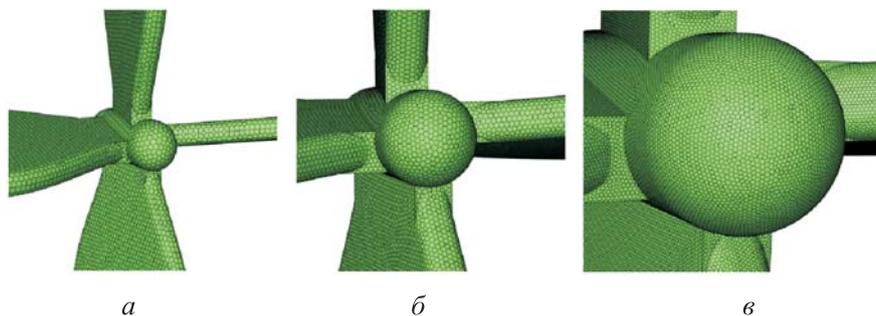


Рис. 4. Фрагменты расчетных сеток с количеством ячеек $\sim 4 \cdot 10^5$ (а), $\sim 2 \cdot 10^6$ (б), $\sim 13 \cdot 10^7$ (в)

На результаты численного решения смешения двух компонентов существенное влияние оказывает густота расчетной сетки. Чтобы подобрать оптимальный объем сетки, для смесителя с плоскими лопатками с углом установки лопатки 10° при способе подачи «кольцо» было проведено исследование зависимости критериев ψ и Δp от ее густоты. Количество ячеек в сетке варьировалось от $\sim 1 \cdot 10^5$ до $\sim 1 \cdot 10^8$ ячеек. Примеры рассматриваемых сеток приведены на рис. 4.

Результаты исследования сеточной сходимости критериев оценки ψ и Δp приведены на рис. 5. Из графика видно, что при количестве ячеек $\sim 10 \cdot 10^6$ значения критериев начинают слабо и немонотонно изменяться, что свидетельствует об отсутствии влияния дальнейшего сгущения на результат расчета. Для всех дальнейших расчетов использовались расчетные сетки с количеством ячеек $\sim 10 \cdot 10^6$.

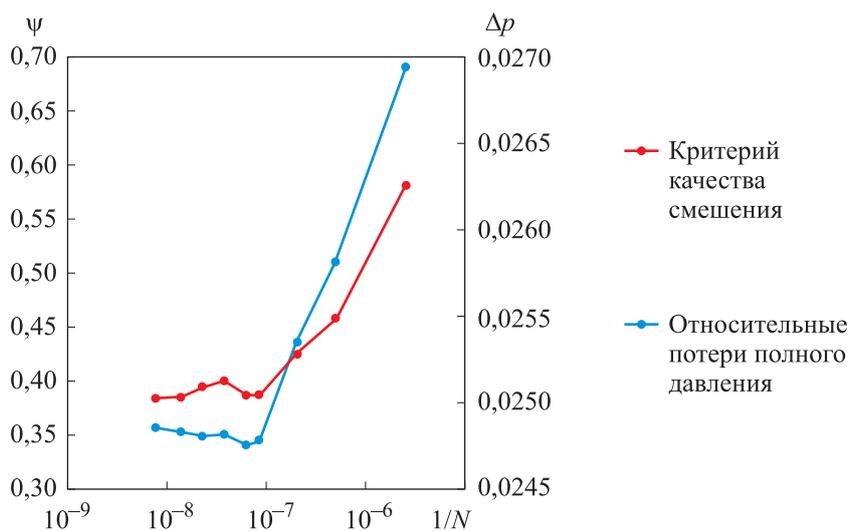


Рис. 5. Результаты исследования сеточной сходимости (N — количество ячеек в расчетной сетке)

Перед моделированием смешения с конфигурациями смесителей, был рассмотрен пустой тракт без смесителя (рис. 6). При такой постановке смешение газов было обусловлено только их диффузией. В данном случае было получено следующее значение критерия качества смешения в контрольном сечении: $\psi = 0,071$.

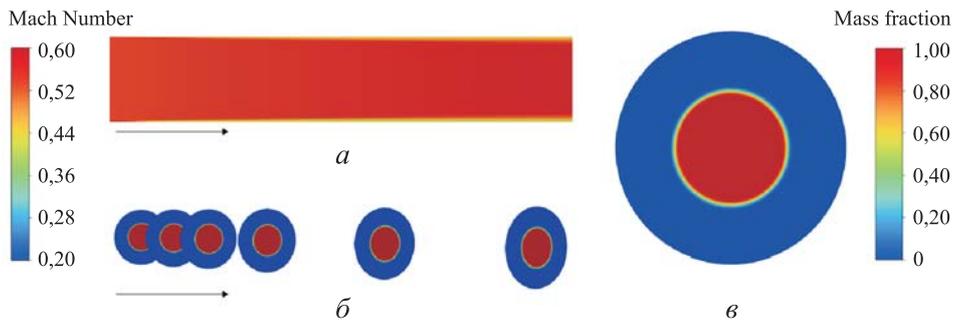


Рис. 6. Результаты численного моделирования тракта без смесителя (стрелками указано направление потока):

a — распределение числа Маха по длине тракта; *б* — распределение массовой доли первого газа по длине в сечениях тракта; *в* — распределение массовой доли первого газа в контрольном сечении тракта

Результаты численного моделирования рассматриваемых конфигураций смесителей представлены на рис. 7 и 8: на рис. 7 — в виде зависимости критерия качества смешения ψ от относительных потерь полного давления на смесителе Δp для разных способов подачи, а на рис. 8 — в виде полей распределения массовой доли первого газа в контрольном сечении, где вычислялся критерий ψ .

Из графиков видно, что при способе подачи «кольцо» смеситель с профилированными лопатками обеспечивает хороший уровень смешения при значительно меньших потерях полного давления, чем два других типа (см. рис. 7). При больших потерях полного давления уголкового кольцевой и смеситель с плоскими лопатками обеспечивают лучшее смешение, при этом до определенных значений потерь полного давления уголкового кольцевой смеситель эффективнее смесителя с плоскими лопатками.

На графике для способа подачи «кольцо» видно, что кривая смесителя с плоскими лопатками изменяется не монотонно (рис. 7, *a*). Такой эффект вызван отрывом потока от лопатки при угле ее установки, равным 10° . На всех лопатках с большим углом также наблюдается отрыв потока.

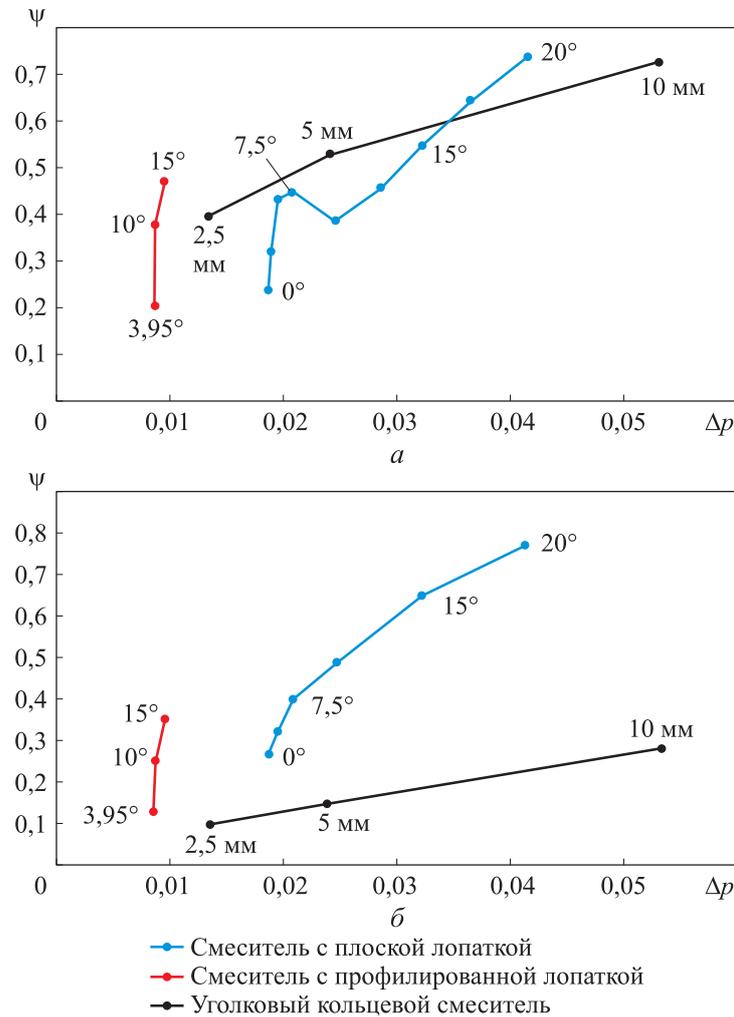


Рис. 7. Зависимость ψ от Δp при способах подачи «кольцо» (а) и «полукруг» (б)

На рис. 9 приведены поля распределения массовой доли по тракту и в контрольном сечении для безотрывного обтекания при угле установки 7,5° (рис. 9, а) и обтекания с отрывом потока при угле установки 10° (рис. 9, б).

При наличии отрыва газ из ядра потока хуже распределяется по сечению. Это вызвано тем, что отрывы на лопатках, возникающие у стенки тракта, не дают газу из ядра потока, выталкиваемому центральным телом, перетечь к стенкам.

При способе подачи «полукруг» смеситель с профилированными лопатками также обеспечивает хороший (хотя и меньший, чем при другом способе) уровень смешения при значительно меньших потерях полного давления. Смеситель с плоскими лопатками в данном случае демонстрирует гораздо лучшие показатели смешения, чем угловой кольцевой при таких же потерях.

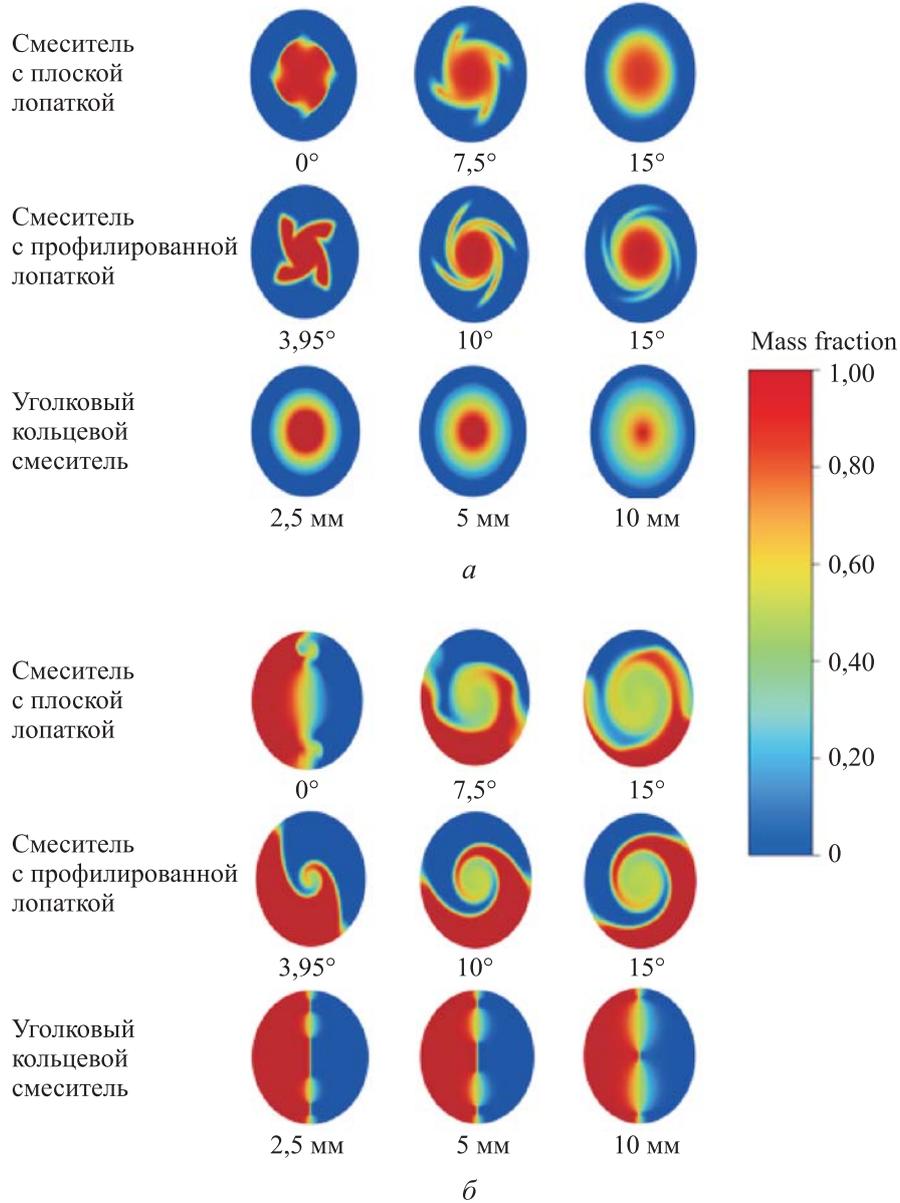


Рис. 8. Распределение массовой доли первого газа в контрольном сечении при способах подачи «кольцо» (*a*) и «полукруг» (*б*)

В данном случае у смесителя с плоскими лопатками также присутствует отрыв, но на графике его влияние незаметно. Это можно объяснить симметричным разбиением входной границы для подачи компонентов. Отрывные зоны в таком случае также воздействуют на поток, но компенсируют друг друга и не оказывают сильного влияния на итоговое смешение газов.

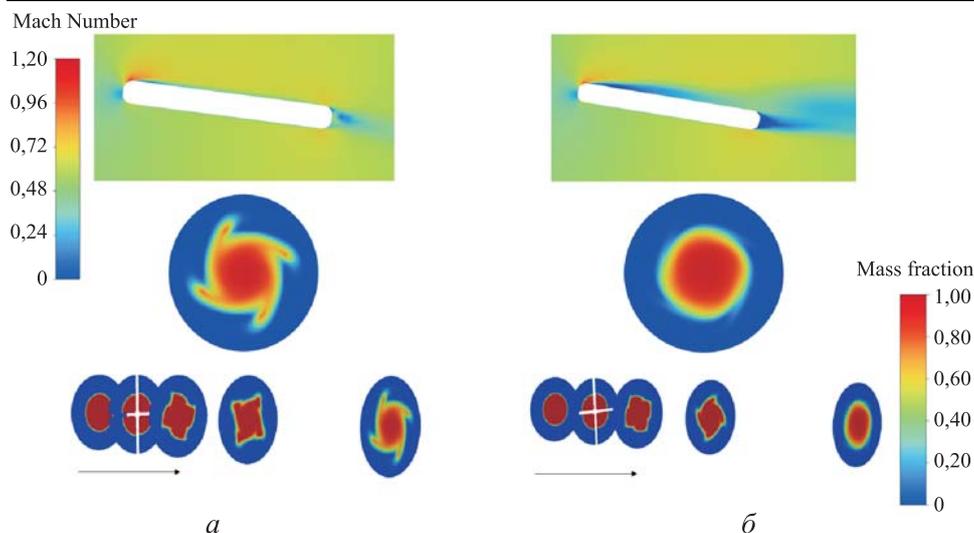


Рис. 9. Поля распределения числа Маха и массовой доли первого газа при обтекании лопатки (стрелки указывают направление потока): *а* — безотрывном (угол установки $7,5^\circ$); *б* — с отрывом потока (угол установки 10°)

Данный случай демонстрирует проблему предлагаемой методики — зависимость результатов оценки от разделения входной границы для подачи компонентов. Поэтому для конкретной практической задачи разбиение входной границы следует проводить так, чтобы как можно точнее имитировать систему подачи топлива, реализованную в рассматриваемой задаче.

Заключение. В данной работе представлена методика сравнительной оценки смесителей, менее ресурсоемкая, чем эксперимент и подробное численное моделирование. Благодаря учету потерь полного давления и критерия качества смешения она позволяет для допустимых потерь давления определить наиболее эффективную конфигурацию смесителя из сравниваемых.

Продемонстрировано применение методики при сравнении трех типов смесителей с варьируемыми геометрическими параметрами. Для всех конфигураций получены используемые в методике критерии оценки — относительные потери полного давления и критерий качества смешения. Комбинация двух этих параметров позволяет при сопоставлении судить об эффективности смесителей и выбрать лучший вариант для конкретной задачи.

Отмечен недостаток представленной методики — зависимость результатов оценки от разбиения входной границы для раздельной подачи компонентов. Следовательно, необходимо подбирать способ разбиения этой границы таким образом, чтобы он наиболее полно имитировал систему подачи топлива, реализованную в практической задаче, связанной с выбором смесителя.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Fan Yuxin, Mou Junjie, Tao Hua, Liu Tianchi, Chen Zhongliang, inventor; Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing Power Machinery Institute, assignee. *A kind of the combination flameholder and its working method of adjustable cavity whirlpool plot structure*. China patent CN 109780572 A, 2019, May 21.
- [2] Ren Jiawan, Liang Junlong, Li Guangxi, Zhou Jie, Fu Lili, Xu Junmin, Chen Kaita, Yang Zhenpeng, inventor; Xian Aerospace Propulsion Institute, assignee. *Combustion chamber stabilizer of ramjet engine and flame stabilizing method*. China patent CN 109631084 B. 2020, Nov 6.
- [3] Вахрушев А.С., Дмитриев Е.В., Зосимов С.А., Николаев А.А., Носков Г.П., Серманов В.Н. *Способ стабилизации процесса горения топлива в камере сгорания и камера сгорания прямоточного воздушно-реактивного двигателя летательного аппарата*. Пат. № 2454607 Российская Федерация, 2012, бюл. № 18, 9 с.
- [4] Tan Jianguo, Lu liang, Chen Chunhao, Zhang Dongdong, Li Hao, Wang Hao, Liu Yao, Yao Xiao, inventor; National University of Defense Technology, assignee. *Flame stabilizing device of ramjet engine*. China patent CN 109113895 B, 2019, Aug 27.
- [5] Чаусов Ф.Ф. Отечественные статические смесители для непрерывного смешивания жидкостей. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2009, № 3, с. 11–14.
- [6] Лаптев А.Г., Фарахов Т.М., Дударовская О.Г. Сравнительная оценка энергоэффективности статических насадочных проточных смесителей. *Вестник Казанского государственного энергетического университета*, 2016, № 1, с. 68–83.
- [7] Фарахов Т.М., Лаптев А.Г. Оценка эффективности статических смесителей насадочного типа. *Вестник Казанского государственного энергетического университета*, 2011, № 4, с. 20–24.
- [8] Гулимовский И.А., Кузнецов А.Г. Критерий оценки качества работы газового статического смесителя. *Промышленная энергетика*, 2018, № 9, с. 37–44.
- [9] Menter F.R. *Improved Two-Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows*. NASA TM 103975, 1992.
- [10] Волков К.Н., Дерюгин Ю.Н., Емельянов В.Н., Козелков А.С., Тетерина И.В. *Разностные схемы в задачах газовой динамики на неструктурированных сетках*. Москва, Физматлит, 2014, 627 с.

Статья поступила в редакцию 17.03.025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Новоселов К.И., Захаров В.С. Методика сравнительной оценки эффективности смесительных устройств в модельных каналах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 10. EDN TGHJCK

Новоселов Кирилл Иванович — техник отдела «Аэрокосмические двигатели» ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», студент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: kinovoselov@mail.ru

Захаров Вячеслав Сергеевич — начальник сектора теоретических и обликowych исследований отдела «Аэрокосмические двигатели» ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова». Область научных интересов: рабочие процессы в прямоточных воздушно-реактивных и ракетных двигателях; методы и средства испытаний реактивных двигателей; численные методы газовой динамики; методы моделирования турбулентных течений и горения; аэродинамика высокоскоростного полёта. e-mail: vszakharov@ciam.ru

Methodology for comparative assessment of the mixer efficiency in the model channels

© K.I. Novoselov, V.S. Zakharov

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

The paper presents a methodology for preliminary comparative assessment of the mixer (mixing device) efficiency. It is based on numerical simulation of mixing the two gases (with identical thermal properties) in a flow path with a mixer installed. Mixer efficiency is assessed by two criteria: mixing quality ψ and relative total pressure loss Δp . The paper considers three types of mixers with the variable geometric dimensions to demonstrate the methodology. It shows simplicity of applying the mixer comparative assessment methodology, and identifies also its drawback, i.e. dependence of the results on the method of partitioning the inlet boundary for a separate gas supply.

Keywords: *mathematical simulation, mixer, comparative assessment, numerical study*

REFERENCES

- [1] Fan Yuxin, Mou Junjie, Tao Hua, Liu Tianchi, Chen Zhongliang, inventor. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing Power Machinery Institute, assignee. *A kind of the combination flameholder and its working method of adjustable cavity whirlpool plot structure*. China patent CN 109780572 A, 2019, May 21.
- [2] Ren Jiawan, Liang Junlong, Li Guangxi, Zhou Jie, Fu Lili, Xu Junmin, Chen Kaita, Yang Zhenpeng, inventor. Xian Aerospace Propulsion Institute, assignee. *Combustion chamber stabilizer of ramjet engine and flame stabilizing method*. China patent CN 109631084 B, 2020, Nov 6.
- [3] Vakhrushev A.S., Dmitriev E.V., Zosimov S.A, Nikolaev A.A., Noskov G.P., Sermanov V.N. *Sposob stabilizatsii protsessa goreniya topliva v kamere sgoraniya i kamera sgoraniya pryamotochnogo vozdušno-reaktivnogo dvigatelya letatel'nogo apparata* [Method for stabilization of fuel combustion processes in combustion chamber, and combustion chamber of the aircraft ramjet engine]. Pat. no. 2454607 Russian Federation, 2012, bull. no. 18, 9 p.
- [4] Tan Jianguo, Lu Liang, Chen Chunhao, Zhang Dongdong, Li Hao, Wang Hao, Liu Yao, Yao Xiao, inventor. National University of Defense Technology, assignee. *Flame stabilizing device of ramjet engine*. China patent CN 109113895 B, 2019, Aug 27.
- [5] Chaysov F.F. *Otechestvennye staticheskie smesiteli dlya nepreryvnogo smeshivaniya zhidkostey* [Domestic static mixers for continuous mixing of liquids]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie — Chemical and Petroleum Engineering*, 2009, no. 3, pp. 11–14.
- [6] Laptev A.G., Farakhov T.M., Dudarovskaya O.G. *Sravnitel'naya otsenka energoeffektivnosti staticheskikh nasadochnykh protochnykh smesiteley* [Comparative assessment of energy efficiency static packing line mixer]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta — Kazan State Power Engineering University Bulletin*, 2016, no. 1, pp. 68–83.
- [7] Farakhov T.M., Laptev A.G. *Otsenka effektivnosti staticheskikh smesiteley nasadochnogo tipa* [Estimation of the efficiency of static mixers packed type]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta — Kazan State Power Engineering University Bulletin*, 2011, no. 4, pp. 20–24.

- [8] Gulimovskiy I.A, Kuznetsov A.G. Kriteriy otsenki kachestva raboty gazovogo staticheskogo smesitelya [Criterion for assessing the quality of operation of a gas static mixer]. *Promyshlennaya energetika*, 2018, no. 9, pp. 37–44.
- [9] Menter F.R. *Improved Two-Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows*. NASA TM 103975, 1992.
- [10] Volkov K.N., Deryugin Yu.N., Emelyanov V.N., Kozelkov A.S., Teterina I.V. *Raznostnye skhemy v zadachyakh gazovoy dinamiki na nestrukturirovannykh setkakh* [Difference schemes in gas dynamics problems on the unstructured grids]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2014, 627 p.

Novoselov K.I., Technician, Department of Aerospace Engines, Central Institute of Aviation Motors (CIAM); Student, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: kinovoselov@mail.ru

Zakharov V.S., Head of the Theoretical and Design Research Sector, Department of Aerospace Engines, Central Institute of Aviation Motors (CIAM). Scientific interests: working processes in ramjet and rocket engines; methods and means of testing jet engines; numerical methods of gas dynamics; methods for simulating turbulent flows and combustion; aerodynamics of the high-velocity flight. e-mail: vszakharov@ciam.ru