

Проектирование блоков генераторов синтетических струй и экспериментальные исследования нестационарного истечения струй с помощью PIV-метода

© В.Г. Белова, А.Ю. Макаров, В.П. Маслов, В.А. Степанов

ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, 111116, Россия

На основе пьезоэлектрической диафрагмы разработано три вида конструкций генераторов, создающих синтетические струи с разными частотами. Синтетические струи (струи с нулевым массовым расходом газа) являются перспективным средством активного управления течениями. С их помощью можно уменьшить газодинамические потери в переходных каналах авиационной силовой установки. Рассчитана резонансная частота, определены режимы работы генераторов синтетических струй. Экспериментально исследовано нестационарное поле скорости при истечении синтетической струи в затопленное пространство с помощью планарного метода измерения мгновенных полей вектора скорости — PIV (Particle Image Velocimetry) для всех видов конструкций генераторов синтетических струй и при разных частотах колебаний. Даны наглядные примеры образования синтетических струй при соответствующих резонансных частотах колебания полости в блоках генераторов. Использование компактных блоков генераторов синтетических струй в переходных каналах силовой установки позволит снизить потери полного давления и улучшить характеристики двигателя в целом.

Ключевые слова: синтетические струи, активное управление течением, PIV-метод, нестационарное течение

Введение. Управление течением с помощью синтетических струй [1, 2], создаваемых генератором синтетических струй (ГСС), представляет большой интерес в области внутренней аэродинамики современных авиадвигателей и является актуальным научным исследованием. Генератор состоит из замкнутой полости, соединенной отверстием с окружающей средой, через которое последовательно чередуются фазы вдува и отсоса газа в результате колебания исполнительного устройства. Вследствие того, что ГСС имеет нулевой расход газа по времени и является независимой системой, его широко используют в качестве практического устройства для управления отрывом потока [3, 4], увеличения тепло- и массообмена [5, 6], улучшения смешивания [7, 8], управления аэродинамической силой [9, 10] и подавления шума [11].

Синтетические струи в качестве управления потоком в переходных каналах [12, 13] и каналах воздухозаборников [14] перспективных авиационных силовых установок (СУ) применяются относительно-

но недавно. Для решения проблем отрыва потока в переходных каналах [15] используются пассивные и активные средства управления течением. К пассивным средствам относятся различного вида завихрители [16], установленные непосредственно внутри канала перед зоной отрыва потока, которые за счет мощных вихрей, создаваемых в пристеночной области, подмешивают к ней воздух с большим давлением, сокращая отрыв. Однако опасность попадания обломков завихрителей в турбину при их разрушении и отсутствие регулирования при работе на разных режимах существенно осложняют применение завихрителей в каналах СУ. Этих недостатков лишены активные средства управления, такие, как вдув и отсос воздуха [17, 18], но для их работы необходим расход рабочего тела. Поэтому в настоящее время синтетические струи исследуются как средство активного управления отрывом потока в переходных каналах.

Цель настоящей работы — разработка нескольких видов компактных конструкций ГСС для их дальнейшего применения в модельном переходном канале, проведение экспериментальных исследований блоков ГСС для определения работоспособности конструкции и основных параметров синтетических струй.

Разработка конструкций ГСС. При создании ГСС за основу можно взять различные исполнительные устройства, которые способны создать циклическое изменение объема внутренней полости, но не все они отличаются компактностью, являющейся одним из основных требований их применения в каналах СУ. В качестве двухстороннего накачивающего устройства нами была выбрана пьезоэлектрическая диафрагма (или мембрана) с небольшими габаритами и массой (рис. 1). При максимальном сжатии объема внутренней полости блока ГСС с кромок щели срывается пара разнонаправленных вихрей, затем при непрерывном колебании мембран формируется последовательность вихрей и на определенном расстоянии от щели образуется участок с максимальной интенсивностью.

На основе пьезоэлектрической диафрагмы (мембраны) спроектированы несколько видов конструкций ГСС (рис. 2). В одной из них мембрана состоит из тонкой металлической пластины диаметром 48 мм, к которой с одной стороны прикреплена пьезоэлектрическая керамика диаметром 25 мм. Вследствие обратного пьезоэлектрического эффекта при подаче напряжения на мембрану она начинает колебаться. Мембраны располагают лицевыми сторонами одна к другой, их колебания отличаются разностью фаз 180° для максимального сокращения объема внутренней полости, от чего зависит мощность выдуваемой струи [19]. Форма и расположение щелей для выхода синтетических струй из блоков ГСС существенно влияют на эффективность применения генератора [20], поэтому при разработке новых конструкций ГСС за

основу были взяты прямоугольные щели для выхода синтетических струй и два способа ориентации щелей в модельном переходном канале: продольная ориентация (рис. 2, а, б) с размером щели 0,5×35×2,5 мм (ширина×длина×высота) и поперечная — под углом 45° к потоку (рис. 2, в) с размером щели 0,5×35×10 мм [21].

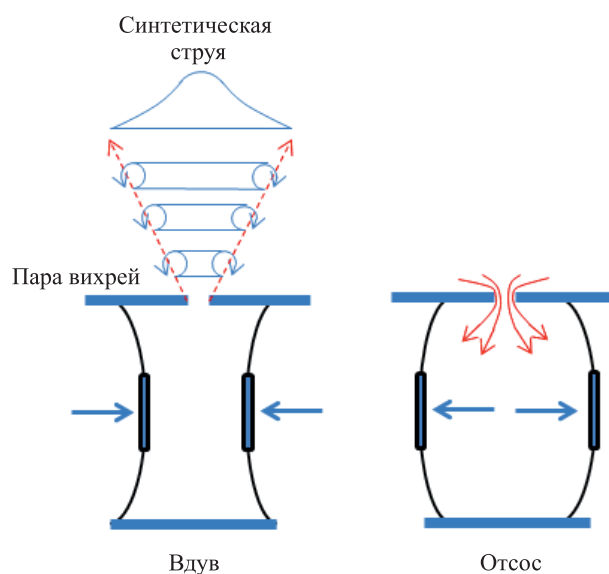


Рис. 1. Принцип работы генератора синтетических струй

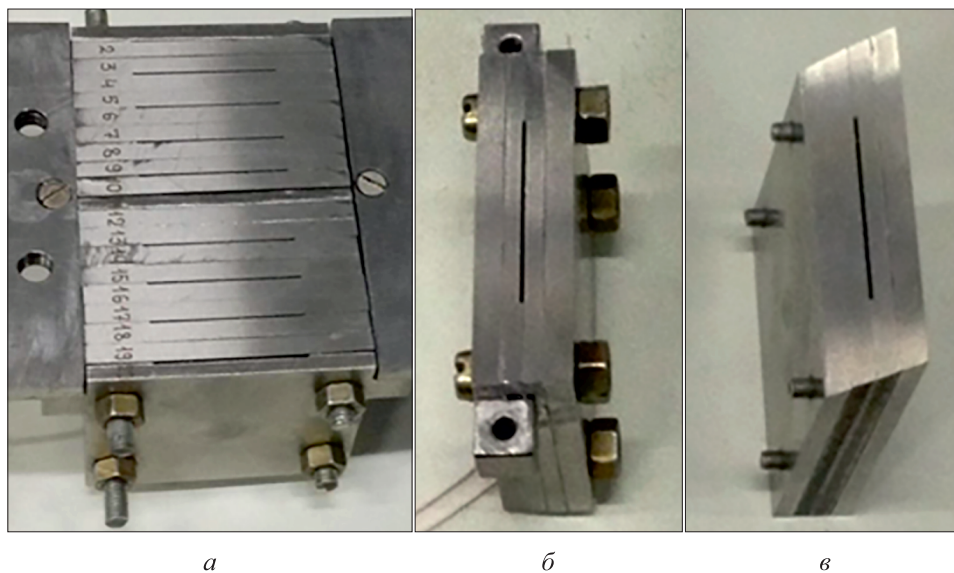


Рис. 2. Общий вид блока генератора синтетических струй с 10 щелями (а) и вид его изолированных блоков под углом 90° (б) и 45° (в) к потоку

В блоке ГСС (см. рис. 2, а) истечение струй из щелей происходит противофазно. На щели, расположенные по краям конструкции, приходится по одной мембране, а на остальные — по две (см. рис. 2, б, в).

Для спроектированных блоков ГСС рассчитаны основные параметры: резонансная частота f , число Рейнольдса Re , число Стокса St , обратное число Струхала $\frac{1}{Sr}$ (таблица).

Основные параметры блоков ГСС

Блок	f , Гц	Re	St	$1/Sr$
С 10 щелями под углом 90° к потоку	1110,6	1562,5	4,2	90,0
С единичной щелью под углом 90° к потоку	1110,6	1562,5	4,2	90,0
С единичной щелью под углом 45° к потоку	555,3	1562,5	2,9	180,1

При расчете резонансной частоты использовалось соотношение, фактически представляющее собой уравнение для расчета параметров резонатора Гельмгольца [22]:

$$f = \frac{v_{зв}}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V_0 L}}, \tag{1}$$

где f — резонансная частота, Гц; $v_{зв}$ — скорость звука в воздухе, $v_{зв} = 340$ м/с; S — площадь щели, м²; L — длина отверстия (глубина щели), м; V_0 — объем резонатора, м³.

Были учтены также режимы работы ГСС с точки зрения создания вихревых структур. Установлено [23], что синтетические струи начинают образовываться при условии, когда выполняется соотношение

$$\frac{1}{Sr} = \frac{v_{с.с}}{fh} = \frac{(v_{с.с}h)v^{-1}}{(fh^2)v^{-1}} = \frac{Re}{St^2} \gg 1, \tag{2}$$

где $v_{с.с}$ — скорость струи на выходе из щели, м/с; h — характерный размер (ширина щели), м; ν — кинематическая вязкость воздуха, м²/с.

Зависимость числа Re от числа St является критерием формирования синтетических струй. Получено, что критерий формирования синтетических струй для спроектированных блоков ГСС выполняется (см. таблицу). В формуле (2) значение скорости струи на выходе из щели было выбрано из минимально возможного — 25 м/с.

Экспериментальные исследования ГСС. Исследовано нестационарное поле скорости при истечении синтетических струй в за-

топленное пространство с помощью планарного метода измерения мгновенных полей вектора скорости — PIV (Particle Image Velocimetry) [24]. В настоящее время это наиболее перспективный метод, поскольку он основан на бесконтактном измерении мгновенных компонент скорости. Нами измерены две компоненты скорости (v_y , v_z). Принцип работы PIV-метода заключается в измерении смещения частиц-маркеров в плоскости лазерного ножа между двумя последовательными кадрами изображения частиц-маркеров, которые представляют собой капли аэрозоля размером 1 мкм. Запыление потока каплями осуществлялось штатным генератором, с помощью которого равномерно засеивался окружающий воздух вблизи входного сечения модели. Таким образом, частицы-маркеры двигались со скоростью синтетической струи, образующейся через некоторое время после подачи напряжения на мембраны.

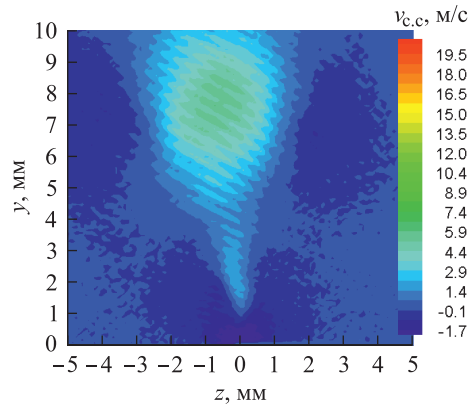
Получены поля скорости синтетической струи для изолированных блоков ГСС под углами 90° (см. рис. 2, б) и 45° (см. рис. 2, в) к потоку и для блока ГСС с 10 щелями под углом 90° к потоку (см. рис. 2, а) при истечении в затопленное пространство при трех значениях частоты колебаний мембран — 300, 600, 900 Гц. Пространственное разрешение метода PIV для блока с 10 щелями (см. рис. 2, а) составило 0,7 мм, для изолированных блоков — 0,1 мм (см. рис. 2, б, в). Максимальная амплитуда напряжения, которая подавалась на мембраны, составила 50...70 В. Характерная скорость синтетической струи на выходе из ГСС под углом 90° к потоку на некотором расстоянии от щели составила 18...20 м/с при частоте колебаний 900 Гц (рис. 3).

Получена характерная скорость синтетической струи при частоте 600 Гц на некотором расстоянии от выходной щели ГСС, которая составила 13...15 м/с (рис. 4). Экспериментальные исследования, проведенные для изолированных блоков ГСС, подтверждают предварительные расчетные значения резонансной частоты колебаний (см. таблицу), при которой образуются синтетические струи.

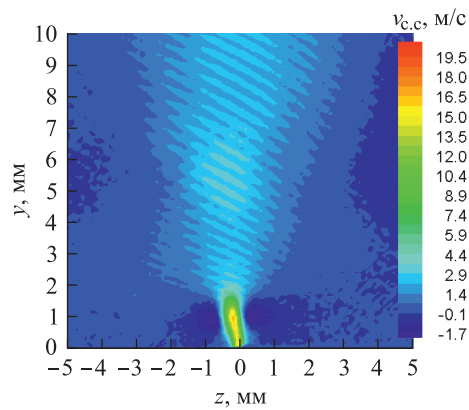
При истечении из блока ГСС с 10 щелями крайне неравномерное поле скорости (рис. 5), по-видимому, объясняется интерференцией струй. Максимальные значения скорости на расстоянии 20...40 мм от поверхности блока не превышают 1,5...2,0 м/с.

Недостаточно большая амплитуда скорости на выходе из блока ГСС может быть связана с неоптимальным выбором собственной резонансной частоты мембран, а также с малой мощностью генератора напряжения. Помимо этого, при подаче напряжения на мембраны с разностью фаз 180° довольно проблематично добиться одновременной реакции двух мембран, которые «работают» на одну щель, вследствие исходных незначительных отличий в пьезоэлектрическом элементе на металлической пластине. Это приводит к взаимному га-

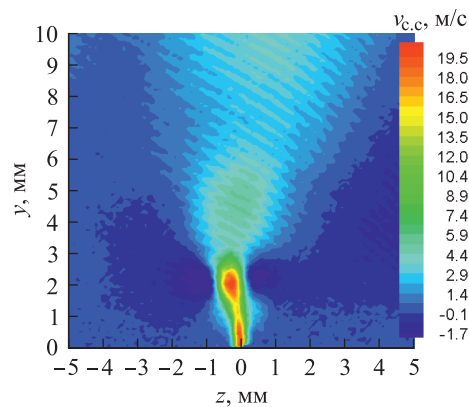
шению мембран, ввиду чего невозможно добиться максимального сжатия объема внутренней полости и, как результат, максимальной скорости струи, выдуваемой из блока ГСС.



а

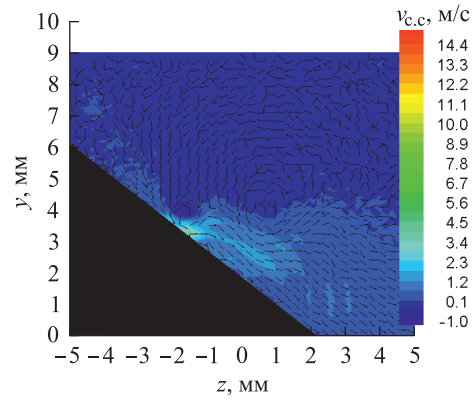


б

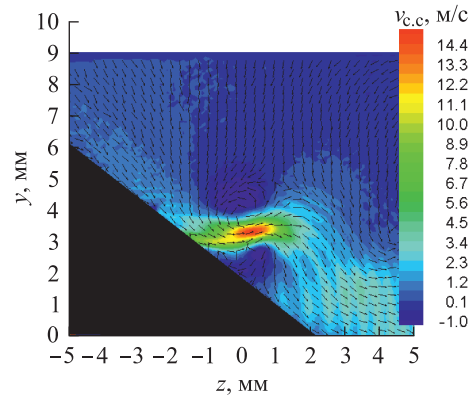


в

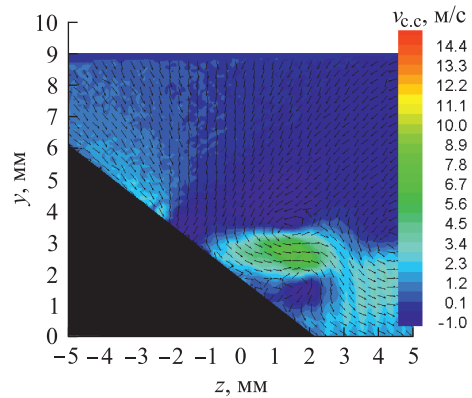
Рис. 3. Поля вектора скорости синтетических струй на выходе щели из изолированного блока ГСС под углом 90° к потоку в затопленное пространство при частоте колебаний 300 Гц (а), 600 Гц (б), 900 Гц (в)



а



б



в

Рис. 4. Поля вектора скорости синтетических струй на выходе щели из изолированного блока ГСС под углом 45° к потоку в затопленное пространство при частоте колебаний 300 Гц (а), 600 Гц (б), 900 Гц (в)

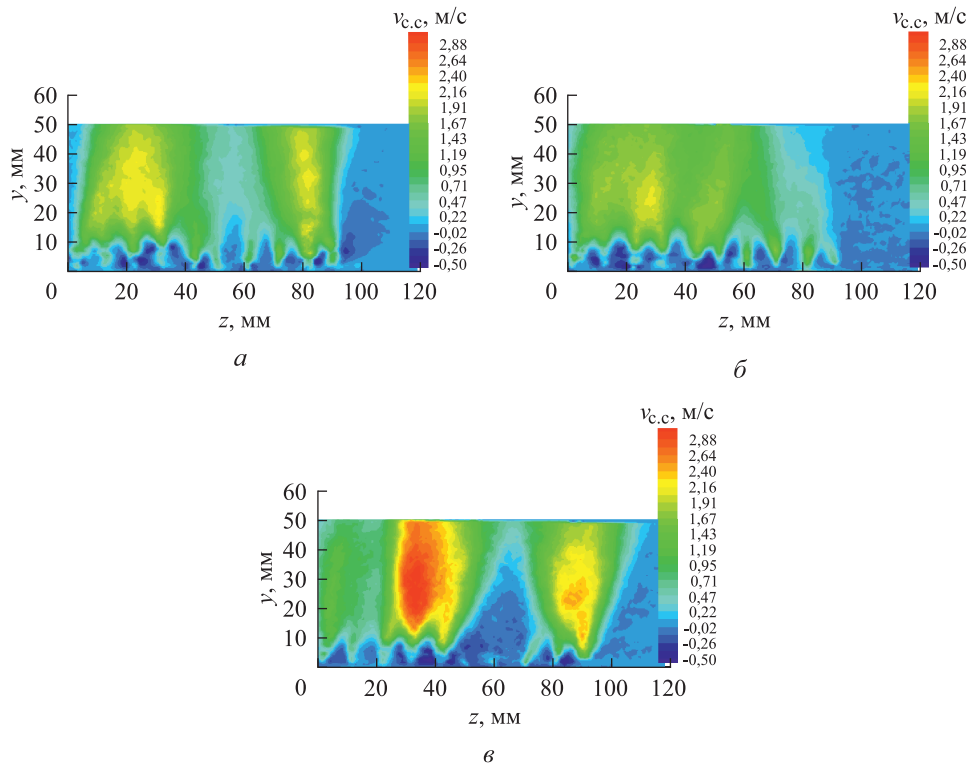


Рис. 5. Поля вектора скорости синтетических струй на выходе из блока ГСС с 10 щелями в затопленное пространство при частотах колебаний 300 Гц (а), 600 Гц (б), 900 Гц (в)

Заключение. Разработаны три вида работоспособных конструкций ГСС на основе пьезоэлектрической диафрагмы (мембраны), предназначенные для дальнейшего применения в модельном переходном канале в целях уменьшения газодинамических потерь. Проведены экспериментальные исследования блоков ГСС с помощью планарного PIV-метода измерений мгновенных полей вектора скорости при частотах колебаний мембран 300, 600, 900 Гц.

Выявлено, что синтетические струи образуются при соответствующих резонирующих частотах колебаний полости в блоках ГСС. Для блока с вдувом под углом 45° к потоку частота колебаний, при которой образуются синтетические струи, составляет 600 Гц, максимальная скорость струи 15 м/с, для блока под углом 90° к потоку — 900 Гц и 20 м/с соответственно. Значения частот, при которых получают синтетические струи, достаточно хорошо согласуются с предварительными расчетными данными для этих блоков. Для блока с 10 щелями максимальная скорость составила 1,5...2 м/с при частоте 600 Гц.

Для управления течением в переходных каналах с помощью синтетических струй необходима скорость несколько больше, чем полу-

ченная для блоков ГСС методом PIV. Поэтому в дальнейшем требуется усовершенствовать конструкции ГСС, улучшив качество изготовления мембран и их герметичность в блоке. Необходимо также скорректировать фазы колебания мембран, чтобы исключить их взаимное гашение. Все это позволит увеличить скорость синтетических струй на выходе из блоков ГСС.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 15-08-01996).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Luo Zh.-B., Xia Zh.-X., Xie Y.-G. Jet Vectoring Control Using a Novel Synthetic Jet Actuator. *Journal of Aeronautics*, 2007, vol. 20, pp. 193–201. URL: [https://doi.org/10.1016/S1000-9361\(07\)60032-6](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(07)60032-6)
- [2] Okada K., Oyama A., Fujii K., Miyaji K. Computational Study on Effect of Synthetic Jet Design Parameters. *International J. Aerospace Engineering*, 2010, vol. 2010, art. ID 364859. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2010/364859>
- [3] Zhang P.F., Wang J.J., Feng L.H. Review of zero-net-mass-flux jet and its application in separation flow control. *Sci. China. Ser. E. Technol. Sci.*, 2008, vol. 51 (9), pp. 1315–1359.
- [4] Lengani D., Simoni D., Ubaldi M., Zunino P., Bertini F. Application of a synthetic jet to control boundary layer separation under ultrahigh-lift turbine pressure distribution. *Flow Turbul. Combust.*, 2011, vol. 87 (4), pp. 597–616.
- [5] Gu Y.S., Li B.B., Cheng K.M. Cross Flow Transfer Characteristics of a New Beveled Synthetic Jet Actuator and its Applications to Boundary Layer Control. *Acta Aeronaut et Astronaut Sin*, 2010, vol. 31 (2), pp. 231–238.
- [6] Zhang J.Z., Gao S., Tan X.M. Convective Heat Transfer on a Flat Plate Subjected to Normally Synthetic Jet and Horizontally Forced Flow. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2013, vol. 57 (1), pp. 321–351.
- [7] Tang X.M., Nie M.M., Zhang J.Z., Shan Y. Numerical Investigation on Enhancing Mixing by Synthetic Jets. *J. Eng. Thermophys.*, 2011, vol. 32, pp. 299–302.
- [8] Xia Q.F., Zhong S. A PLIF and PIV Study of Liquid Mixing Enhanced by a Lateral Synthetic Jet Pair. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2012, vol. 37, pp. 64–73.
- [9] Glezer A. Some aspects of aerodynamic flow control using synthetic-jet actuation. *Philos. Trans. R. Soc. A. Math. Phys. Eng. Sci.*, 1940, 2011, vol. 369, pp. 1476–1570.
- [10] Xu X.P., Zhu X.P., Zhou Z., Fan R.J. Application of active flow control technique for gust load alleviation. *China J. Aeronaut.*, 2011, vol. 24 (4), pp. 410–416.
- [11] Yang D.G., Wu J.F., Luo X.F. Investigation on suppression effect of zero-net-mass-flux jet on aerodynamic noise inside open cavities. *Acta Aeronaut et Astronaut Sin*, 2011, vol. 32 (6), pp. 1007–1021.
- [12] Любимов Д.А. Исследование влияния струй с нулевым массовым расходом на течение в криволинейном диффузоре. *Теплофизика высоких температур*, 2011, т. 49, № 4, с. 557–567.
- [13] Любимов Д.А., Потехина И.В. Применение RANS/ILES-метода для анализа эффективности управления отрывными течениями в диффузорах с помощью синтетических струй. *Механика жидкости и газа*, 2015, № 4, с. 144–154.
- [14] Любимов Д.А., Соловьева А.А., Федоренко Ф.Э. Применение RANS/ILES метода для исследования газодинамического управления течением в ВЗ

легкого сверхзвукового делового самолета. Тез. докл. 17-й междуна- р. школы-семинара «Модели и методы аэродинамики». Евпатория, 4–11 июня 2017 г. Москва; Жуковский, ЦАГИ им. профессора Н.Е. Жу- ковского, 2017, с. 102–103.

- [15] Кашкин Ю.Ф., Коновалов А.Е., Крашенинников С.Ю., Любимов Д.А., Пудовиков Д.Е., Степанов В.А. Экспериментальное и расчетное исследование особенностей течения с отрывом потока в дозвуковых диффу- зорах. *Известия РАН. Механика жидкости и газа*, 2009, № 4. с. 91–99.
- [16] Lee S., Loth E., Babinsky H. Normal Shock Boundary Layer Control with Various Vortex Generator Geometries. *Computers & Fluids*, 2011, vol. 49, no. 1, pp. 233–246.
- [17] Debiasi M., Herberg M.R., Yan Z., Dhanabalan S.S., Tsai H.M., Dhanabalan S. Control of Flow Separation in S-Ducts via Flow Injection and Suction. *ARC. Aerospace Sciences Meetings. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (Reno, Nevada, 7–10 January 2008). AIAA Paper no. 2008-74. URL: <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2008-74>
- [18] Florea R., Bertuccioli L., Tillman T.G. Flow-Control-Enabled Aggressive Turbine Transition Ducts and Engine System Analysis. *3rd AIAA Flow Control Conference* (San Francisco, California, 5–8 June 2006). Paper no. 2006-3512. URL: <http://doi.org/10.2514/6-2006-3512>
- [19] Kim Y.H. Garry K.P. Time Dependent Analysis of a Rectangular Synthetic Jet. *International Congress of the Aeronautical Sciences*, 2012. URL: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2012/PAPERS/011.PDF
- [20] Aram S., Mittal R. Computational Study of the Effect of Slot Orientation on Syn- thetic Jet-Based Separation Control. *Int. J. of Flow Control*, 2011, vol. 3 (2–3), pp. 87–110.
- [21] Белова В.Г., Макаров А.Ю., Маслов В.П., Степанов В.А. Расчетно- экспериментальное исследование генератора синтетических струй для управления течением в модельном диффузорном канале. Тез. докл. 17-й междуна- р. школы-семинара «Модели и методы аэродинамики». Евпа- тория, 4–11 июня 2017 г. Москва; Жуковский, ЦАГИ им. профессора Н.Е. Жуковского, 2017, с. 20–21.
- [22] Duncan A., Peter W. Modeling and Design of Microjet Actuators. *AIAA Journal*, 2004, vol. 42 (2), pp. 220–227. URL: <https://doi.org/10.2514/1.9091>
- [23] Holman R., Utturkar Y., Mittal R., Smith B.L., Cattafesta L. Formation Crite- rion for Synthetic Jets. *AIAA Journal*, 2005, vol. 43 (10), pp. 2110–2116. URL: <https://doi.org/10.2514/1.12033>
- [24] Makarov A.Yu., Maslov V.P., Stepanov V.A. Experimental study of unsteady mechanisms of energy supply for the control of secondary flows in the air- craft engines ducts. *International Council of the Aeronautical Sciences* (ICAS-2014), ID 2014_0280, St. Petersburg, 2014, p. 4. URL: [http:// www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014_0280_paper.pdf](http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014_0280_paper.pdf)

Статья поступила в редакцию 06.12.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Белова В.Г., Макаров А.Ю., Маслов В.П., Степанов В.А. Проектирование бло- ков генераторов синтетических струй и экспериментальные исследования нестаци- онарного истечения струй с помощью PIV-метода. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 3. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-3-1737>

Белова Валерия Геннадьевна — инженер отделения «Газовая динамика и теплофизика» ЦИАМ им. П.И. Баранова, аспирантка кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научной деятельности: газовая динамика, вычислительная математика, теплофизика. e-mail: belova.v.g@mail.ru

Макаров Алексей Юрьевич — начальник испытательного стенда отделения «Газовая динамика и теплофизика» ЦИАМ им. П.И. Баранова. Область научной деятельности: газовая динамика, математическое моделирование в естественных науках.

Маслов Владимир Павлович — начальник сектора отделения «Измерительная техника и метрология» ЦИАМ им. П.И. Баранова. Область научной деятельности: турбулентность и гидродинамическая устойчивость, динамика вязкой жидкости, процессы тепло- и массообмена.

Степанов Владимир Алексеевич — канд. техн. наук, заместитель начальника отделения «Газовая динамика и теплофизика» ЦИАМ им. П.И. Баранова. Автор более 40 печатных работ в области аэродинамики силовых установок летательных аппаратов. Область научной деятельности: газовая динамика, вычислительная математика. e-mail: step@ciam.ru

Using the PIV method to design synthetic jet actuators and investigate non-steady-state jet flow

© V.G. Belova, A.Yu. Makarov, V.P. Maslov, V.A. Stepanov

P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motors,
Moscow, 111116, Russia

We developed three designs of actuators generating synthetic jets at various frequencies, all three based on a piezoelectric diaphragm. Synthetic flows (jets featuring no mass flow rate in terms of gas) are a promising means of active flow control. Efficient use of them may reduce gas dynamic losses in transition ducts, improving aircraft power plant characteristics overall. We computed the resonance frequency and determined operation modes of said generators as regards synthetic jet formation. We used a planar method of measuring instantaneous velocity vector field, that is, PIV (Particle Image Velocimetry), for an experimental investigation of a non-steady-state velocity field when a synthetic jet flows into a flooded region, for all synthetic jet actuator design types and various vibration frequencies. We provide clear examples of synthetic jet formation for corresponding resonance frequencies of cavity vibrations in the actuator units. Using compact synthetic jet actuator units in power plant transition ducts will make it possible to decrease total pressure losses and improve engine characteristics overall.

Keywords: synthetic jets, active flow control, PIV method, non-steady-state flow

REFERENCES

- [1] Luo Zh.-B., Xia Zh.-X., Xie Y.-G. *Journal of Aeronautics*, 2007, vol. 20, pp. 193–201. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1000-9361\(07\)60032-6](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(07)60032-6)
- [2] Okada K., Oyama A., Fujii K., Miyaji K. *International J. Aerospace Engineering*, 2010, vol. 2010, art. ID 364859. Available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2010/364859>
- [3] Zhang P.F., Wang J.J., Feng L.H. *Sci. China Ser. E Technol. Sci.*, 2008, vol. 51 (9), pp. 1315–1359.
- [4] Lengani D., Simoni D., Ubaldi M., Zunino P., Bertini F. *Flow Turbul. Combust.*, 2011, vol. 87 (4), pp. 597–616.
- [5] Gu Y.S., Li B.B., Cheng K.M. *Acta Aeronaut et Astronaut Sin*, 2010, vol. 31 (2), pp. 231–238.
- [6] Zhang J.Z., Gao S., Tan X.M. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2013, vol. 57 (1), pp. 321–351.
- [7] Tang X.M., Nie M.M., Zhang J.Z., Shan Y. *J. Eng. Thermophys.*, 2011, vol. 32, pp. 299–302.
- [8] Xia Q.F., Zhong S. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2012, vol. 37, pp. 64–73.
- [9] Glezer A. *Philos. Trans. R Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, 1940, 2011, vol. 369, pp. 1476–1570.
- [10] Xu X.P., Zhu X.P., Zhou Z., Fan R.J. *China J. Aeronaut.*, 2011, vol. 24 (4), pp. 410–416.
- [11] Yang D.G., Wu J.F., Luo X.F. *Acta Aeronaut et Astronaut Sin*, 2011, vol. 32 (6), pp. 1007–1021.
- [12] Lyubimov D.A. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 2011, vol. 49, no. 4, pp. 557–567.
- [13] Lyubimov D.A., Potekhina I.V. *Mekhanika zhidkosti i gaza — Fluid Dynamics*, 2015, no. 4, pp. 144–154.

- [14] Lyubimov D.A., Soloveva A.A., Fedorenko F.E. Primenenie RANS/ILES metoda dlya issledovaniya gazodinamicheskogo upravleniya techeniem v VZ legkogo sverkhzvukovogo delovogo samoleta [Employing the RANS/ILES method to investigate gas dynamic flow control in air intakes of a light supersonic business airplane]. *Tez. dokl. 17-y Mezhdunar. shkoly-seminara Modeli i metody aerodinamiki. Evpatoriya, 4–11 iyunya 2017 g.* [Proc. of the 17th International Workshop on Models and Methods in Aerodynamics. Yevpatoriya, 4–11 June, 2017]. Moscow, Zhukovsky, Zhukovskiy Central Aerohydrodynamic Institute Publ., 2017, pp. 102–103.
- [15] Kashkin Yu.F., Konovalov A.E., Krashennnikov S.Yu., Lyubimov D.A., Pudovikov D.E., Stepanov V.A. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza — Fluid Dynamics*, 2009, no. 4, pp. 91–99.
- [16] Lee S., Loth E., Babinsky H. *Computers & Fluids*, 2011, vol. 49, no. 1, pp. 233–246.
- [17] Debiasi M., Herberg M.R., Yan Z., Dhanabalan S.S., Tsai H.M., Dhanabalan S. Control of Flow Separation in S-Ducts via Flow Injection and Suction. *ARC Aerospace Sciences Meetings. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (Reno, Nevada, 7–10 January 2008). AIAA Paper no. 2008-74.
- [18] Florea R., Bertuccioli L., Tillman T.G. Flow-control-enabled aggressive turbine transition ducts and engine system analysis. *3rd AIAA Flow Control Conference* (San Francisco, California, 5–8 June 2006). Paper no. 2006-3512.
- [19] Kim Y.H. Garry K.P. Time Dependent Analysis of a Rectangular Synthetic Jet. *International Congress of the Aeronautical Sciences*, 2012. Available at: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2012/PAPERS/011.PDF
- [20] Aram S., Mittal R. *Int. J. of Flow Control*, 2011, vol. 3 (2-3), pp. 87–110.
- [21] Belova V.G., Makarov A.Yu., Maslov V.P., Stepanov V.A. Raschetno-eksperimentalnoe issledovanie generatora sinteticheskikh struy dlya upravleniya techeniem v modelnom diffuzornom kanale [Simulation and experimental investigation of a synthetic jet actuator for controlling flow in a mock-up diffuser channel]. *Tez. dokl. 17-y mezhdunar. shkoly-seminara Modeli i metody aerodinamiki. Evpatoriya, 4–11 iyunya 2017 g.* [Proc. of the 17th International Workshop on Models and Methods in Aerodynamics. Yevpatoriya, 4–11 June, 2017]. Moscow, Zhukovsky, Zhukovskiy Central Aerohydrodynamic Institute Publ., 2017, pp. 20–21.
- [22] Duncan A., Peter W. *AIAA Journal*, 2004, vol. 42 (2), pp. 220–227. Available at: <https://doi.org/10.2514/1.9091>
- [23] Holman R., Utturkar Y., Mittal R., Smith B.L., Cattafesta L. *AIAA Journal*, 2005, vol. 43 (10), pp. 2110–2116. Available at: <https://doi.org/10.2514/1.12033>
- [24] Makarov A.Yu., Maslov V.P., Stepanov V.A. Experimental study of unsteady mechanisms of energy supply for the control of secondary flows in the aircraft engines ducts. *International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS-2014)*, ID 2014_0280. St. Petersburg, 2014, p. 4. Available at: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014_0280_paper.pdf

Belova V.G., Engineer, Department of Gas Dynamics and Thermal Physics, P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motors, post-graduate student, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University. Specialises in gas dynamics, computational mathematics, thermal physics. e-mail: belova.v.g@mail.ru

Makarov A.Yu., Test Bench Supervisor, Department of Gas Dynamics and Thermal Physics, P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motors. Specialises in gas dynamics and mathematical modelling in natural sciences.

Maslov V.P., Head of Sector, Department of P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motors. Specialises in turbulence and hydrodynamic stability, viscous fluid dynamics, heat and mass transfer processes.

Stepanov V.A., Cand. Sc. (Eng.), Deputy Head of Department of Gas Dynamics and Thermal Physics, P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motors. Author of over 40 scientific publications in the field of aircraft power plant aerodynamics. Specialises in gas dynamics and computational mathematics. e-mail: step@ciam.ru