

Исследование пульсаций потока в форкамере и их связи с пульсациями сверхзвукового потока

**Л. В. Афанасьев^{1,2}, А. А. Яцких^{1,2}, А. Д. Косинов^{1,2}, Ю. Г. Ермолаев^{1,2}
Н. В. Семёнов¹, О. П. Минин³, С. Г. Шевельков³**

¹ *Институт теоретической и прикладной механики им С. А. Христиановича СО РАН
Новосибирск, Россия*

² *Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия*

³ *ПАО «Туполев»
Москва, Россия*

Аннотация

Проведено экспериментальное исследование влияния пульсаций потока в форкамере на сверхзвуковые возмущения свободного потока. Получены данные о пульсациях потока в форкамере и эффективности детурбулизирующей системы, а также о корреляции пульсаций потока форкамеры и пульсаций потока в рабочей части сверхзвуковой аэродинамической трубы Т-325 ИТПМ СО РАН. В ходе работы апробирована система трехканальных термоанемометрических измерений в дозвуковых и сверхзвуковых потоках.

Ключевые слова

эксперимент, дозвуковой поток, сверхзвуковой поток, термоанемометр постоянного сопротивления, корреляция возмущений потока

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (проект АААА-А17-117030610125-7).

Эксперименты проведены с использованием оборудования ЦКП «Механика».

Для цитирования

Афанасьев Л. В., Яцких А. А., Косинов А. Д., Ермолаев Ю. Г., Семёнов Н. В., Минин О. П., Шевельков С. Г. Исследование пульсаций потока в форкамере и их связи с пульсациями сверхзвукового потока // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 2. С. 77–85. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-2-77-85

A Study of the Pulsations of Flow in the Settling Chamber and Their Relationship with the Pulsations of the Supersonic Flow

**L. V. Afanasev^{1,2}, A. A. Yatskih^{1,2}, A. D. Kosinov^{1,2}, Yu. G. Yermolaev^{1,2}
N. V. Semionov¹, O. P. Minin³, S. G. Shevelkov³**

¹ *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation*

² *Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation*

³ *Tupolev Design Bureau
Moscow, Russian Federation*

Abstract

Experimental study of the influence of flow pulsation in settling chamber on the supersonic free stream disturbances was carried out. Data on the pulsations in the settling chamber and the efficiency of deturbulization system as well as the correlation of pulsations of the flow of settling chamber and flow pulsations in test section of T-325 supersonic wind tunnel of ITAM SB RAS were obtained.

Keywords

experiment, subsonic flow, the constant temperature hot-wire anemometer, correlations of flow pulsations

Funding

The research was carried out within the framework of the Program of Fundamental Scientific Research of the state academies of sciences in 2013-2020 (project No. AAAA-A17-117030610125-7).

Experiments were carried out using the equipment of the Joint Access Center "Mechanics".

For citation

Afanasev L. V., Yatskih A. A., Kosinov A. D., Yermolaev Yu. G., Semionov N. V., Minin O. P., Shevelkov S. G. A Study of the Pulsations of Flow in the Settling Chamber and Their Relationship with the Pulsations of the Supersonic Flow. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 2, p. 77–85. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-2-77-85

Введение

Основным вопросом исследования ламинарно-турбулентного перехода сверхзвукового пограничного слоя при естественных возмущениях является вопрос об источниках этих возмущений. Считается, что в сверхзвуковом потоке всегда присутствуют акустические возмущения. Они могут проникать в рабочую часть аэродинамической трубы из форкамеры либо излучаться турбулентным пограничным слоем на стенках рабочей части. Если уровень акустических пульсаций в рабочей части уменьшается за счет полировки поверхности стенок и сопловых вставок, то может повыситься доля акустических пульсаций, проникающих в рабочую часть из форкамеры. Именно этот случай соответствует условиям работы Т-325 в настоящее время, однако до сих пор не было детальных измерений взаимосвязи пульсаций в форкамере и рабочей части Т-325.

Постановка экспериментов

Эксперимент выполнен в малотурбулентной сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-325 Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН при числе Маха $M = 2$ и единичном числе Рейнольдса $Re_1 = (11,0 \pm 0,1) \times 10^6 \text{ м}^{-1}$.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. В ходе работы измерялись пульсации потока после поворотных лопаток (1), после хонейкомба и детурбулизирующих сеток (2) и в сверхзвуковом свободном потоке рабочей части Т-325 (3). Датчики 1 и 2 располагаются в 150 мм от внутренней поверхности трубы: датчик 1 расположен в верхней части установки, датчик 2 – справа по потоку в боковой стенке. Положение нитей датчиков горизонтальное.

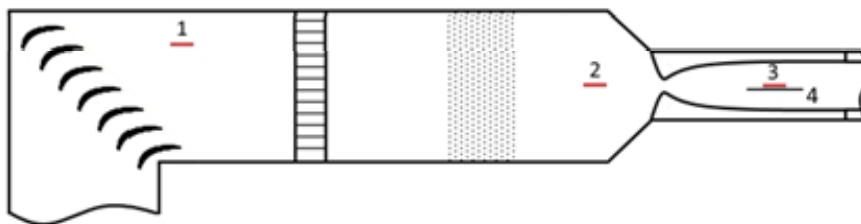


Рис. 1. Схема эксперимента:

- 1 – датчик после поворотных лопаток; 2 – датчик после хонейкомба и детурбулизирующих сеток;
3 – рабочая часть, датчик установлен на штанге; 4 – плоская пластина

Fig. 1. The Scheme of the Experiment:

- 1 – the sensor after the corner vanes; 2 – the sensor after honey comb and deturbulization meshes;
3 – the sensor in the test section; 4 – flat plate

Для измерения пульсаций и средних характеристик течения использовалось три термоанемометра постоянного сопротивления серии СТА-2017 [1]. Датчики термоанемометров имели вольфрамовую нить толщиной 10 мкм и длиной 1,7 мм. Измерения проводились при перегреве, равном 0,7. Этот выбор обусловлен тем, что при данном перегреве датчик термоанемометра восприимчив к колебаниям массового расхода и практически нечувствителен к изменениям температуры торможения [2; 3]. Измерительная система представлена на рис. 2. Измерения средних напряжений происходило с помощью внутренних АЦП с разрядностью 24 бита. Пульсационный сигнал оцифровывался с помощью АЦП TiePie Handyscope HS4 DIFF с разрешением 14 бит и частотой дискретизации 195,3125 кГц, длина реализации 131 072 точек, что соответствует приблизительно 0,67 с. С помощью термоанемометров получены осциллограммы пульсационного сигнала $e'(t)$ и скорость потока в форкамере Т-325, всего получено порядка 500 осциллограмм.

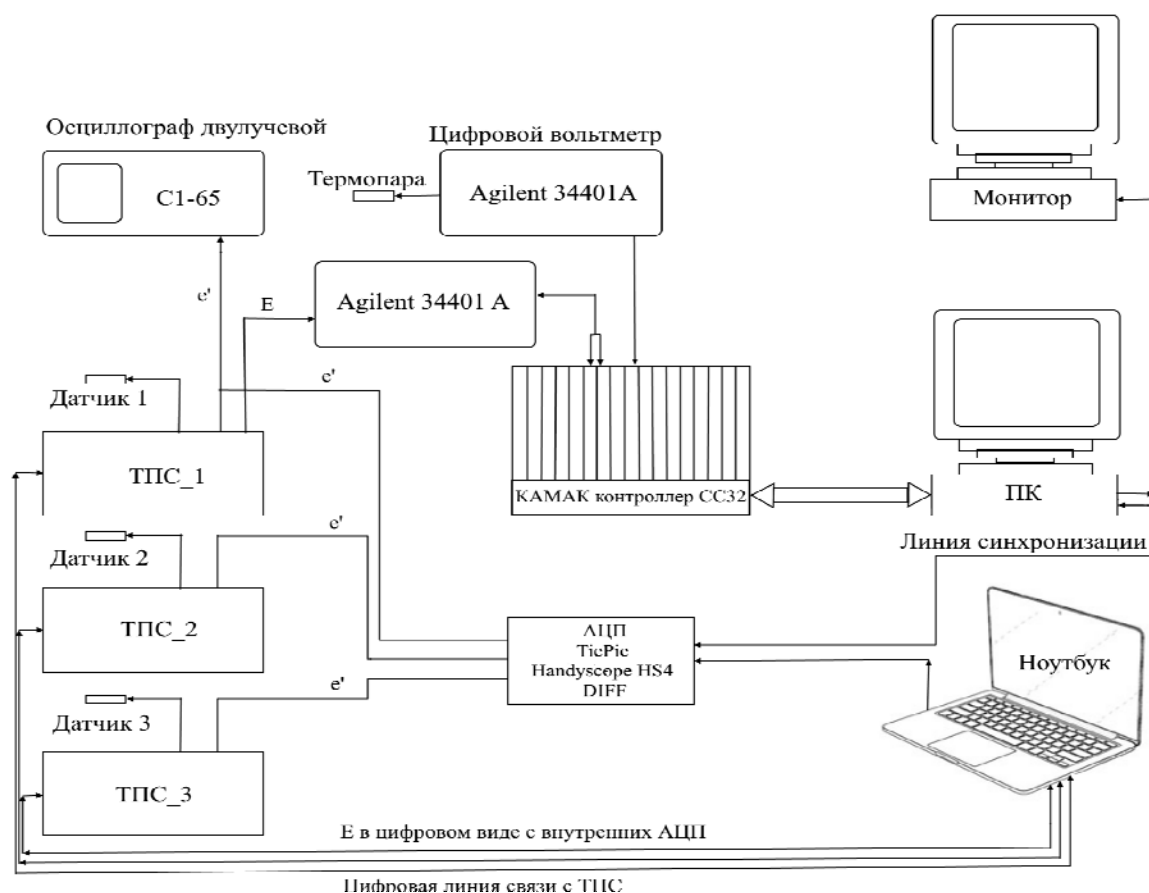


Рис. 2. Схема измерительной системы

Fig. 2. Scheme of the Measuring System

Оценка взаимосвязи электрических сигналов производилась с помощью спектрального анализа, анализа среднеквадратичных пульсаций напряжения, а также построения корреляционной функции вида

$$\text{Corr}(\tau) = \frac{\int f(t)g(t-\tau)dt}{\sqrt{\int f(t)^2 dt * \int g(t-\tau)^2 dt}}. \quad (1)$$

Пример получаемой корреляционной функции приведен на рис. 3. Для оценки вклада в корреляцию разных частот использовался идеальный фильтр высоких частот. Необходимо сказать, что взаимовлияние каналов, обусловленное приборами, мало, и его можно не учитывать [3].

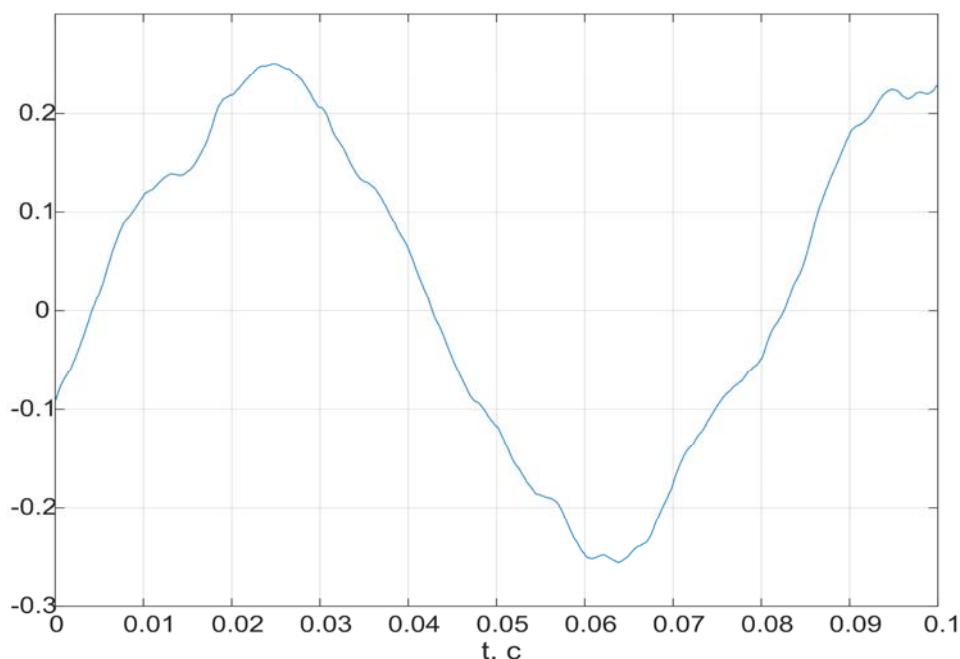


Рис. 3. Функция корреляции от сигналов из форкамеры после поворотных лопаток и детурбулизирующей системы

Fig. 3. The Correlation Function of Signals of the Settling Chamber after the Profile System for Turning the Flow (blades for turning the flow) and after Honeycomb and Deturbulization Meshes

Результаты

На рис. 4, 5 приведены осциллограммы сигнала с датчика, расположенного в форкамере, на ней видно, что сигнал имеет затухающую низкочастотную составляющую с частотой порядка 15 Гц. Также обнаружено, что эта компонента не является стационарной (см. рис. 6, 7), ее наличие наблюдалось примерно в половине полученных осциллограмм.

Получены среднеквадратичные пульсации напряжения, скорости и массового расхода (табл. 1). Пульсации скорости потока в форкамере снизились с 12,1 до 1,2 % от скорости потока после прохождения потоком хонейкомба и детурбулизирующих сеток. Видно, что пульсации потока снизились практически на порядок. Измерение скорости потока с помощью датчика термоанемометра показало, что скорость потока после детурбулизирующей системы составляет $(4,03 \pm 0,02)$ м/с.

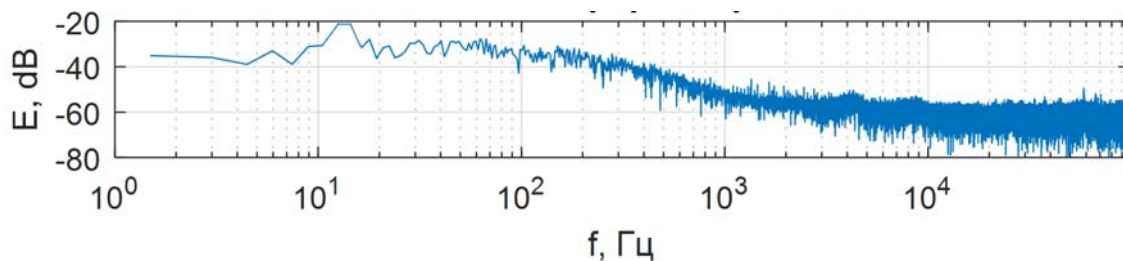


Рис. 4. Сигнал с датчика, расположенного в форкамере
(в спектре частот присутствует пик с частотой порядка 15 Гц)

Fig. 4. Signal from the Sensor Installed in a Settling Chamber
(in the frequency spectrum there is a peak with a frequency of about 15 Hertz)

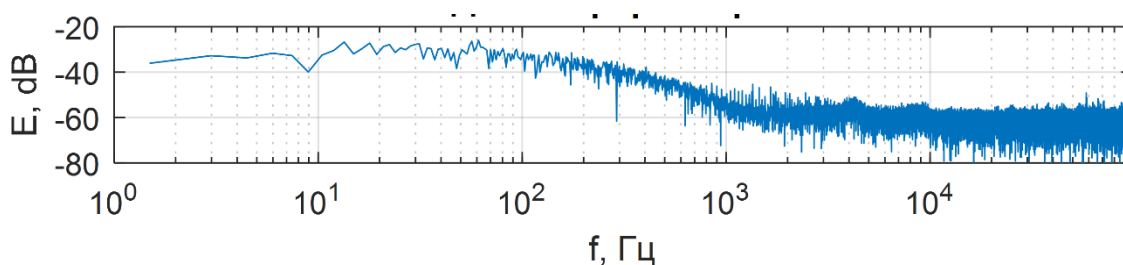


Рис. 5. Сигнал с датчика, расположенного в форкамере
(измерение, выполненное через небольшой промежуток времени в той же точке, видно, что низкочастотный пик в спектре отсутствует)

Fig. 5. Signal from the Sensor Installed in a Settling Chamber
(measurement taken after a short period of time at the same point shows that there is no low-frequency peak in the spectrum)

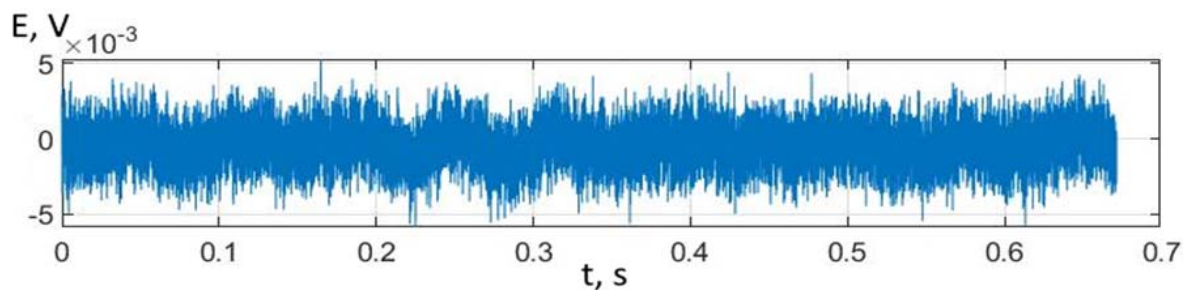
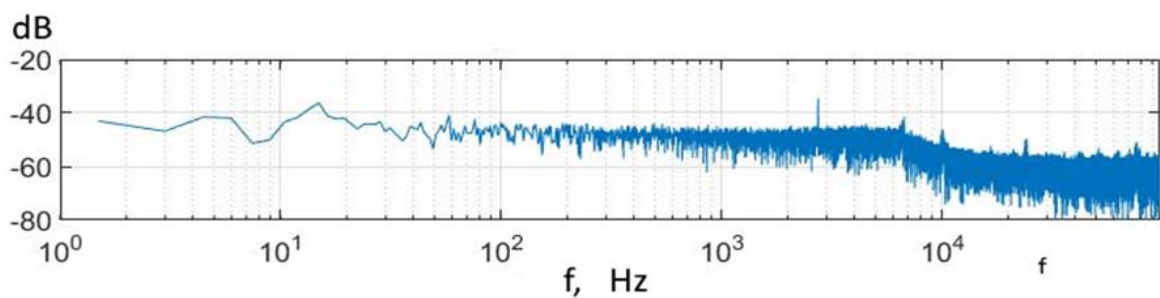


Рис. 6. Сигнал от датчика в свободном потоке рабочей части Т-325 до фильтрации
Fig. 6. The Signal from the Sensor in the Free Flow of the Test Section T-325 before Filtration

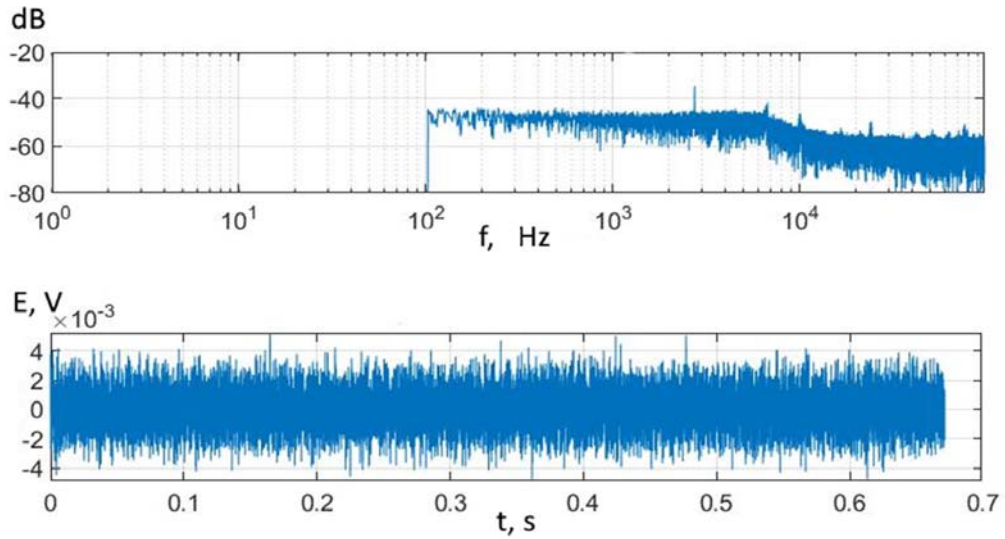


Рис. 7. Сигнал от датчика в свободном потоке рабочей части Т-325 после фильтрации.
 Fig. 7. The Signal from the Sensor in the Free Flow of the Test Section T-325 after Filtration

Таблица 1

Среднеквадратичные пульсации напряжения и массового расхода

Table 1

RMS Voltage and Mass Flow Pulsations

Местоположение	$\langle e' \rangle$, %	$\langle u' \rangle$, %	$\langle m' \rangle$, %
После поворотных лопаток	3,0	12,1	–
После хонейкомба и сеток	0,3	1,2	–
Свободный поток рабочей части	0,02	–	0,09

Снижение корреляции с ростом частоты ФВЧ (табл. 2) является ожидаемым результатом ввиду преобладания в спектрах сигналов низких частот (см. рис. 6).

Таблица 2

Значение максимума корреляции
от частоты фильтра верхних частот

Table 2

The Value of the Maximum Correlation
of the Frequency of the High Pass Filter

Частота ФВЧ, Гц	0	100	500
$\langle \max(\text{Corr}(\tau)) \rangle$, 1–2	0,15	0,1	0,07
$\langle \max(\text{Corr}(\tau)) \rangle$, 2–3	0,09	0,08	0,08
$\langle \max(\text{Corr}(\tau)) \rangle$, 1–3	0,07	0,06	0,03

Примечание: 1 – датчик после поворотных лопаток; 2 – датчик после хонейкомба и дегурбулизирующих сеток; 3 – датчик в рабочей части.

Note: 1 – the sensor after profile system for turning the flow; 2 – the sensor after honeycomb and deturbulization meshes; 3 – the sensor in the test section.

Таким образом, полученные результаты показывают, что взаимосвязь присутствует между пульсациями потока в форкамере за поворотными лопатками и после детурбулизирующей системы. Слабая взаимосвязь имеется между пульсациями потока после детурбулизирующей системы и пульсациями свободного потока рабочей части. Отметим, что в обоих случаях взаимосвязь слабо выражена и обусловлена низкими частотами.

Заключение

Отработана трехканальная термоанемометрическая система для измерений как в дозвуковых, так и в сверхзвуковых потоках одновременно. Проведено экспериментальное исследование взаимосвязи пульсаций потока форкамеры и пульсаций свободного сверхзвукового потока. В ходе работы выявлен низкий уровень взаимосвязи пульсаций потока форкамеры и пульсаций свободного сверхзвукового потока (порядка 0,09–0,03). Это может означать, что основная часть возмущений в рабочей части исходит от пристенных пограничных слоев. Был измерен уровень пульсаций скорости в форкамере, в рабочей части Т-325, а также проведено измерение скорости потока в форкамере после детурбулизирующей системы. Измерения показывают, что после прохождения потоком хонейкомба и детурбулизирующих сеток пульсации потока снижаются на порядок.

Список литературы / References

1. **Yatskikh A. A., Kosinov A. D., Semionov N. V., Smorodsky B. V., Ermolaev Yu. G., Kolosov G. L.** Investigation of laminar-turbulent transition of supersonic boundary layer by scanning constant temperature hot-wire anemometer In: AIP Conference Proceedings 2027, 040041 (2018). DOI 10.1063/1.5065315
2. **Yatskikh A. A., Kosinov A. D., Semionov N. V., Smorodsky B. V., Ermolaev Yu. G., Kolosov G. L.** Investigation of laminar-turbulent transition of supersonic boundary layer by scanning constant temperature hot-wire anemometer // XIX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2018) (Novosibirsk, Russia, 13–19 Aug., 2018). AIP Conference Proceedings, 2018, vol. 2027, no. 1. S.I., 040041(5) p. DOI 10.1063/1.5065315
3. **Яцких А. А., Косинов А. Д., Семенов Н. В., Ермолаев Ю. Г., Смородский Б. В., Колосов Г. Л.** Измерение пульсаций свободного потока и сверхзвукового пограничного слоя сканирующим термоанемометром постоянного сопротивления // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: Тез. докл. XII Всерос. конф. молодых ученых (Новосибирск, Шерегеш, 16–22 марта 2018 г.) / Под ред. В. В. Козлова. Новосибирск, 2018. С. 171–172.
Yatskikh A. A., Kosinov A. D., Semionov N. V., Smorodsky B. V., Kolosov G. L. Measurement of pulsations of a free stream and a supersonic boundary layer with a constant-temperature scanning hot-wire. In: Problems of mechanics: theory, experiment and new technologies: Abstracts XII All-Russian Conference of Young Scientists (Novosibirsk, Sheregesh, March 16–22, 2018) / Ed. by V. V. Kozlov. Novosibirsk, 2018, p. 171–172. (in Russ.)
4. **Афанасьев Л. В.** Изучение взаимовлияния каналов термоанемометра постоянного сопротивления при измерении характеристик потока // МНСК-2018: Физика сплошных сред: Материалы 56-й Междунар. науч. студ. конф. Новосибирск, 2018.
Afanasev L. V. Study of the cross influence of the channels of the constant-resistance anemometer when measuring the flow characteristics. In: ISSC-2018: Continuous Physics: Materials of the 56th Intern. scientific Stud. conf. Novosibirsk, 2018. (in Russ.)

*Материал поступил в редколлегию
Received
09.04.2019*

Сведения об авторах / Information about the Authors

Афанасьев Леонид Владимирович, лаборант, Институт теоретической и прикладной механики им С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия)

Leonid V. Afanasev, Laboratory Assistant, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

l.afanasev@itam.nsc.ru

Яцких Алексей Анатольевич, младший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия); ассистент преподавателя, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия)

Aleksey A. Yatskikh, Junior Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Teaching Assistant, Novosibirsk State University (2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

73.yatskikh@gmail.com

Косинов Александр Дмитриевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия); профессор, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия)

Aleksandr D. Kosinov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Head of Laboratory, Principal Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Professor, Novosibirsk State University (2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

kosinov@itam.nsc.ru

Ермолаев Юрий Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия); ассистент преподавателя, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия)

Yuriy G. Yermolaev, PhD, Senior Fellow, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Teaching Assistant, Novosibirsk State University (2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

yermol@itam.nsc.ru

Семёнов Николай Васильевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия)

Nikolay V. Semionov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Leading Research Fellow, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

semion@itam.nsc.ru

Минин Олег Петрович, директор программы, ПАО «Туполев» (наб. Академика Туполева, 17, Москва, 105005, Россия)

Oleg P. Minin, Program Director, Tupolev Design Bureau (17 Academician Tupolev Emb., Moscow, 105005, Russian Federation)

ole-m2@yandex.ru

Шевельков Сергей Григорьевич, кандидат физико-математических наук, главный специалист, ПАО «Туполев» (наб. Академика Туполева, 17, Москва, 105005, Россия)

Sergey G. Shevelkov, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Chief Specialist, Tupolev Design Bureau (17 Academician Tupolev Emb., Moscow, 105005, Russian Federation)

shev0927@mail.ru