

СИБИРСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал
Основан в 2006 году

2019. Том 14, № 3

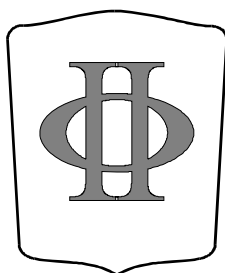
СОДЕРЖАНИЕ

Физика жидкости, нейтральных и ионизованных газов

- Абдуракипов С. С., Добросельский К. Г.* Экспериментальное исследование оптическим и статистическим методами крупномасштабных пульсаций потока при обтекании цилиндра 5
- Гольдфельд М. А.* Влияние скорости потока на поверхностях сжатия воздухозаборника на эффективность слива пограничного слоя 15
- Лысенко В. И., Смородский Б. В., Ермолаев Ю. Г., Яцких А. А., Косинов А. Д.* Эксперименты по ламинаризации сверхзвукового пограничного слоя вдувом инородного газа 26
- Тамбовцев А. С., Грек Г. Р., Козлов В. В., Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г.* Взаимодействие круглой микроструи воздуха с коаксиальной (спутной) струей воздуха на сверхзвуковой скорости их истечения 39
- Козлов В. В., Грек Г. Р., Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Тамбовцев А. С., Шмаков А. Г.* Взаимодействие круглой микроструи воздуха с коаксиальной (спутной) струей водорода при его горении на сверхзвуковой скорости их истечения 53
- Шмаков А. Г., Козлов В. В., Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А.* Изучение пределов устойчивого горения диффузионного пламени микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла, при введении в водород или воздух инертных и реагирующих газов 64

Физика химическая, биологическая, медицинская Синхротронное излучение: генерация и применение

- Боярских И. Г., Сысо А. И., Чанкина О. В.* Применение метода РФА СИ для изучения зависимости между содержанием химических элементов и биологически активными фенольными соединениями жимолости синей 76
- Храмова Е. П., Чанкина О. В., Сыева С. Я., Костикова В. А., Ракиун Я. В., Сороколетов Д. С.* Элементный состав растений Горного Алтая 86
- Седельникова Л. Л., Храмова Е. П., Чанкина О. В., Ракиун Я. В., Сороколетов Д. С.* Использование метода РФА СИ в исследовании экологического состояния техногенной среды в Новосибирской области 97
- Информация для авторов 109



Сибирский физический журнал

Журнал адресован профессорско-преподавательскому составу университетов, научным работникам, аспирантам и студентам, которые интересуются новейшими результатами фундаментальных и прикладных исследований по различным направлениям физики и физико-технической информатики.

Редакция принимает к опубликованию обзоры и оригинальные научные статьи по тем направлениям физики, которые, главным образом, представлены на кафедрах физического факультета НГУ. Принимаются также к рассмотрению статьи по другим направлениям, если в ходе рецензирования подтверждается их высокий научный статус.

Мы приглашаем научные коллективы и отдельных авторов направлять к нам для опубликования материалы по следующим основным разделам:

- квантовая оптика, квантовая электроника;
- радиофизика и электроника;
- теоретическая и математическая физика;
- физика жидкости, нейтральных и ионизованных газов;
- физика высоких энергий, ускорителей и высокотемпературной плазмы;
- физика твердого тела, полупроводников, наноструктур;
- физика химическая, биологическая и медицинская;
- информатика, информационно-коммуникационные технологии;
- учебно-методическое обеспечение преподавания физики.

Периодичность выхода издания – 4 раза в год. Журнал включен в перечень ВАК выпускаемых в Российской Федерации научных и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

SIBERIAN JOURNAL OF PHYSICS

Scientific Journal

Since 2006

In Russian

2019. Volume 14, № 3

CONTENTS

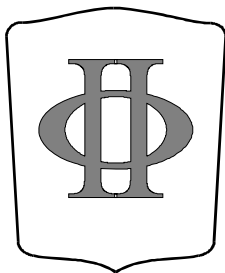
Physics of a Fluid, Neutral and Ionized Gases

<i>Abdurakipov S. S., Dobroselsky K. G.</i> Experimental Study by Optical and Statistical Methods of Large-Scale Velocity Fluctuations in the Flow Past a Cylinder	5
<i>Goldfeld M. A.</i> Influence of Flow Speed on the Compression Surfaces of Inlet on Efficiency of the Boundary Layer Bleed	15
<i>Lysenko V. I., Smorodsky B. V., Yermolaev Yu. G., Yatskih A. A., Kosinov A. D.</i> Experiments on Supersonic Boundary Layer Laminarization by Means of Foreign-Gas Injection	26
<i>Tambovtsev A. S., Grek G. R., Kozlov V. V., Litvinenko M. V., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.</i> Air Round Microjet Interaction with Coaxial Air Jet for Supersonic Speed Jets Efflux	39
<i>Kozlov V. V., Grek G. R., Litvinenko M. V., Litvinenko Yu. A., Tambovtsev A. S., Shmakov A. G.</i> Air Round Microjet Interaction with Coaxial Hydrogen Jet at Its Combustion for Supersonic Speed Jets Efflux	53
<i>Shmakov A. G., Kozlov V. V., Litvinenko M. V., Litvinenko Yu. A.</i> Study of Stable Combustion Ranges of Diffusion Flame Microjet of Hydrogen Effluent from around Micronozzle at Addition of Inert and Reactive Gases into Hydrogen or Air	64

Chemical, Biological and Medical Physics

Synchrotron Radiation: Generation and Application

<i>Boyarskikh I. G., Syso A. I., Chankina O. V.</i> The Use of X-Ray Fluorescence Analysis Using Synchrotron Radiation to Study the Relationship between Chemical Elements and Phenolic Compounds in the Blue Honeysuckle Plants	76
<i>Khramova E. P., Chankina O. V., Syeva S. Ya., Kostikova V. A., Rakshun Ya. V., Sorokoletov D. S.</i> The Element Composition of the Mountain Altai Plants	86
<i>Sedelnikova L. L., Khramova E. P., Chankina O. V., Rakshun Ya. V., Sorokoletov D. S.</i> SR XRF Method Used to Study the Ecological State of Technogenic Surroundings in the Novosibirsk Region	97
Instructions to Contributors	109



Siberian Journal of Physics

The magazine is addressed to the faculty of universities, science officers, post-graduate students and students who are interested in the newest results fundamental and applied researches in various directions of physics and physicotchnical computer science.

Edition accepts to publication reviews and original scientific articles in those directions of physics which, mainly, are presented on faculties of physical faculty of NSU. Are accepted also to viewing article in other directions if during reviewing their high title proves to be true.

We invite scientific personnel and separate authors to guide to us for publication materials on following basic sections:

- Quantum optics, quantum electronics;
- Radiophysics and electronics;
- The theoretical and mathematical physics;
- Physics of a fluid, neutral and ionized gases;
- High-energy and accelerator physics, physics of high-temperature plasma;
- Solid-state and semiconductor physics, physics of nanostructures;
- Chemical, biological and medical physics;
- Computer science, information-communication technologies;
- Educational and methodical provision of teaching of physics

Periodicity of an exit of the edition – 4 times a year. The magazine is included in list Higher Attestation Committee of scientific and technical editions in Russian Federation in which the publication of the basic results of dissertations on competition of a scientific degree of the doctor and candidate of sciences is recommended.

Editor in Chief Andrej V. Arzhannikov
Executive Secretary Sofiya A. Arzhannikova

Editorial Board of the Journal

S. V. Alekseenko, A. V. Arzhannikov, A. L. Aseev, S. N. Bagaev, A. E. Bondar
S. A. Dzyuba, S. I. Eidelman, V. S. Fadin, V. M. Fomin, A. A. Ivanov, B. A. Knyazev, V. V. Kozlov, E. V. Kozyrev
A. V. Latyshev, I. B. Logashenko, V. P. Maltsev, A. G. Pogosov, A. L. Reznik, A. V. Shalagin
V. I. Telnov, S. V. Tsibulya

*The series is published quarterly in Russian since 2006
by Novosibirsk State University Press*

The address for correspondence
Physics Department, Novosibirsk State University
Pirogov Street 2, Novosibirsk, 630090, Russia
Tel. +7 (383) 363 44 25
E-mail address: physics@vestnik.nsu.ru
On-line version: <http://elibrary.ru>; <http://www.phys.nsu.ru/vestnik/>

УДК 532.542.4, 532.574.7, 532.582.3
DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-5-14

Экспериментальное исследование оптическим и статистическим методами крупномасштабных пульсаций потока при обтекании цилиндра

С. С. Абдуракипов, К. Г. Добросельский

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
Новосибирск, Россия*

Аннотация

С использованием оптического метода измерения полей скорости Particle Image Velocimetry (PIV) и статистического метода для анализа когерентных структур в турбулентных потоках Proper Orthogonal Decomposition (POD) проведено экспериментальное исследование пространственной структуры крупномасштабных пульсаций скорости при докавитационном и кавитационном обтекании цилиндра при числе Рейнольдса 280 000.

Ключевые слова

кавитационное обтекание цилиндра, крупномасштабные вихри, particle image velocimetry, proper orthogonal decomposition

Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-79-30075)

Для цитирования

Абдуракипов С. С., Добросельский К. Г. Экспериментальное исследование оптическим и статистическим методами крупномасштабных пульсаций потока при обтекании цилиндра // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 3. С. 5–14. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-5-14

Experimental Study by Optical and Statistical Methods of Large-Scale Velocity Fluctuations in the Flow Past a Cylinder

S. S. Abdurakipov, K. G. Dobroselsky

*Institute of Thermal Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation*

Abstract

Using an optical method for measuring the velocity fields Particle Image Velocimetry (PIV) and a statistical method for analyzing coherent structures in turbulent flows Proper Orthogonal Decomposition (POD), an experimental study of the spatial structure of large-scale velocity fluctuations in the precavitational and cavitation flow past a circular cylinder with a Reynolds number of 280 000 was carried out.

Keywords

cavitation flow around a cylinder, large-scale vortices, particle image velocimetry, proper orthogonal decomposition

Funding

The research was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 19-79-30075)

For citation

Abdurakipov S. S., Dobroselsky K. G. Experimental Study by Optical and Statistical Methods of Large-Scale Velocity Fluctuations in the Flow Past a Cylinder. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 3, p. 5–14. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-5-14

Введение

Общеизвестно, что поперечно-обтекаемые цилиндрические поверхности широко распространены в теплообменных, энергетических и теплотехнических устройствах. Входные кромки лопаток турбомашин, крыльев летательных аппаратов, как правило, представляют собой часть цилиндра. Несмотря на простоту геометрии, обтекание круглого цилиндра чрезвычайно сложно и зависит от режима обтекания.

В литературе выделяют как минимум три режима обтекания: докритический (ламинарный пограничный слой), сверхкритический и переходный, или критический (переход к турбулентности в пограничном слое) [1].

Критический диапазон чисел Рейнольдса составляет примерно 150 000–400 000 и характеризуется резким уменьшением коэффициента сопротивления при обтекании цилиндра. Для различных экспериментальных установок характеристики потока в этом диапазоне чувствительны к таким факторам, как уровень турбулентности и геометрия модели, включая блокировку рабочего канала, отношение длины к диаметру и возможную шероховатость поверхности, которая может нарушить пограничные слои перед отрывом [2]. Отличительной чертой данного диапазона течений является присутствие крупномасштабных вихревых структур, которые играют значительную роль в процессах тепло- и массопереноса, поэтому их изучение имеет теоретическую и практическую значимость.

При обтекании цилиндра в результате глобальной неустойчивости потока образуются вихри Кармана и продольные вихри, которые возникают в результате вторичной неустойчивости [3], также в литературе описаны мелкомасштабные вихри Кельвина – Гельмгольца, формирующиеся в результате роста конвективной неустойчивости в сдвиговом слое [4].

Характеристики крупномасштабных пульсаций скорости в вихревой зоне за телами важны для проектирования размещения как одиночных, так и групп обтекаемых элементов в гидравлических и теплотехнических конструкциях. Анализ литературы показывает, что практически отсутствуют экспериментальные исследования кавитационного обтекания цилиндров. Кавитация представляет собой неблагоприятное явление для многих конструкций, поэтому необходимо знать границы параметров, условия возникновения и степень влияния. Получение детальной экспериментальной информации также важно для построения и верификации математических моделей, описывающих возникновение и развитие кавитации.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование и сравнение характеристик крупномасштабных пульсаций скорости при докавитационном и кавитационном обтекании цилиндра при большом числе Рейнольдса 280 000 с использованием современных подходов для анализа турбулентных течений – PIV и POD.

Описание эксперимента

Для проведения экспериментальных исследований использовалась гидродинамическая труба замкнутого типа [5]. Рабочая часть экспериментальной установки состоит из теплообменника, хонейкомба, конфузора длиной 580 мм, выполненного по профилю полинома четвертого порядка, имеющего степень поджатия потока 13,3, рабочего участка, диффузора. Труба позволяет проводить исследования по обтеканию различных моделей как в бескавитационном, так и в кавитационном режимах.

Для измерений полей скорости использовалась PIV-система, состоящая из программируемого синхронизирующего процессора; ПЗС-камеры (2048×2048 пикселей, 8 бит), оснащенной объективом SIGMA 50 mm 1:2.8 DG MACRO; двойного твердотельного импульсного Nd:YAG лазера (длина волны 532 нм, энергия в импульсе 25 мДж, длительность импульса 10 нс, частота повторения импульсов 1,3 Гц) с фокусирующей и цилиндрической линзами для создания лазерного ножа.

На рис. 1 показан рабочий участок и основные элементы измерительной системы. Рабочий участок имеет длину 1 000 мм с поперечным сечением $150 \times 80 \text{ мм}^2$, в центральной части которого перпендикулярно боковым стенкам установлен круглый цилиндр. Цилиндр обте-

кался потоком воды с постоянным объемным расходом, который измерялся с помощью ультразвукового расходомера. Использовалась фильтрованная водопроводная вода. Массовая концентрация воздуха в воде составляла примерно 0,025 мг/кг. Во время экспериментов использовались полиамидные трассеры средним размером 50 мкм и концентрацией около 13 мг/кг. Время между двумя импульсами лазера составляло 150 мкс, что позволило исследовать течение в вихревой зоне за цилиндром.

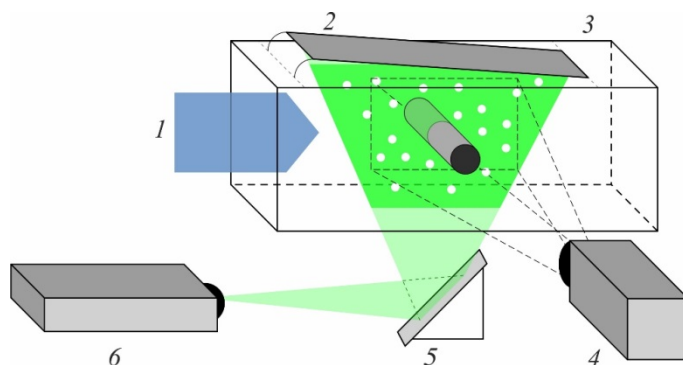


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 – набегающий поток; 2 – зеркало; 3 – измерительная область;
4 – камера; 5 – зеркало; 6 – лазер. Белые точки – трассеры

Fig. 1. Experimental setup:
1 – incoming flow; 2 – mirror; 3 – measuring area;
4 – camera; 5 – mirror; 6 – laser. White points – tracers

Измерительная система управлялась синхронизирующим процессором и компьютером с программным обеспечением ActualFlow [6]. Размер измерительной области составлял примерно 125×125 мм. Поля мгновенной скорости рассчитывались с помощью итерационного кросскорреляционного алгоритма с непрерывным смещением и деформацией элементарных расчетных ячеек и 75 % перекрытием расчетных областей. Обработка полученных данных PIV проводилась по методике [7]. Детали эксперимента и методики измерений приведены в [8].

Для исследования полей скорости использовался гладкий ($R_a \approx 1,0$ мкм) круглый стальной цилиндр диаметром $d = 0,026$ м в поперечном потоке с числом $Re \approx 2,8 \cdot 10^5$. Температура потока $t \approx 25$ °С, статическое давление перед цилиндром составляло 161 и 112 кПа для докавитационного и кавитационного режимов соответственно. Среднерасходная скорость потока составляла $U_0 = 8,8$ м/с, пограничный слой на стенках канала – порядка 10 мм, уровень турбулентных пульсаций в свободном потоке – около 1 %.

Описание метода анализа POD

В основе POD [9] лежит задача нахождения оптимального базиса размерностью N , который наилучшим образом приближает ансамбль полей пульсаций скорости по методу наименьших квадратов. С применением POD-разложения ансамбль полей пульсаций скорости представляется в виде конечного ряда пространственных ортонормированных базисных функций с соответствующими корреляционными коэффициентами $a_n(t)$ [9]:

$$\tilde{u}(\mathbf{x}, t_i) = \sum_{n=1}^N a_n(t_i) \varphi_n(\mathbf{x}).$$

При этом собственные функции и корреляционные коэффициенты должны удовлетворять следующим условиям:

$$\int_{\Omega} \varphi_n(\mathbf{x}) \varphi_m^*(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \delta_{nm}, \quad \frac{1}{T} \int_0^T a_n(t) a_m(t) dt = \lambda_n \delta_{nm}.$$

Для нахождения собственных значений, мод и корреляционных коэффициентов используется алгоритм на основе SVD-разложения кросскорреляционной матрицы [10]. Использованный алгоритм был неоднократно апробирован в других исследованиях [11; 12]. Усредненная по пространству кинетическая энергия пульсаций, содержащаяся в последовательности полей пульсаций скорости, равняется половине суммы всех собственных значений $\epsilon = \sum_n \lambda_n / 2$. Следовательно, $\epsilon / \epsilon_n = \lambda_n / \sum_n \lambda_n$ – доля от полной усредненной по пространству кинетической энергии, содержащейся в каждой POD-мод. В силу симметрии кросскорреляционной матрицы все $\lambda_n > 0$. Кроме того, $\varphi_n(\mathbf{x})$ можно упорядочить согласно величине λ_n : $\lambda_{n-1} \geq \lambda_n > 0$ ($n = 2, \dots, N$). Применение метода к ансамблю полей мгновенной скорости позволяет получить конечный набор собственных значений λ_n и пространственных базисных функций $\varphi_n(\mathbf{x})$, соответствующих пульсациям скорости, вносящим наибольший вклад в кинетическую энергию пульсаций скорости. При этом вклад POD-моды в интегральную кинетическую энергию пульсаций определяется соответствующим собственным значением λ_n , а эволюция наиболее энергоемких пульсаций может быть определена через временные коэффициенты $a_n(t)$ для главных мод. Обычно первые POD-моды связаны с крупномасштабными вихревыми структурами в потоке [12; 13]. Из литературы известно, что если пульсации в турбулентном потоке соответствуют квазипериодичной динамике вихревых структур, то эти структуры будут обязательно отражены в первых двух POD-модях [11].

Результаты

На рис. 2 показаны поля средней скорости при докавитационном и кавитационном обтекании цилиндра. Для продольной компоненты скорости (см. рис. 2, а) наблюдается почти симметричное распределение относительно оси x , а для поперечной компоненты – ассиметричное (см. рис 2, б). Перпендикулярная плоскости компонента скорости не измерялась в процессе эксперимента.

На рис. 3, б можно наблюдать относительно большие флуктуации скорости в поперечном направлении (до 80 % от среднерасходной скорости) в верхнем сдвиговом слое, после зоны возвратных токов, продольные пульсации достигают 60 % для случая до возникновения кавитации. Максимальные значения пульсаций поперечной компоненты $\overline{v'v'}$ обнаружены в сдвиговом слое вблизи точки отрыва пограничного слоя. Максимум пульсаций продольной компоненты скорости $\overline{u'u'}$ находится сразу за областью возвратных токов на расстоянии 1,2d и 1,5d для докавитационного и кавитационного обтекания соответственно (рис. 3, а).

Для сравнения были рассчитаны компоненты тензора скоростей деформации $S_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right)$ и тензора скорости вращения $\Omega_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)$. Рассчитанные величины также демонстрировали ассиметричное распределение в верхней и нижней части. Средняя скорость деформации и средняя скорость вращения имеют один и тот же порядок величины из-за преобладания компоненты градиента поперечной скорости $\frac{\partial v}{\partial y}$. Основное различие между двумя этими величинами наблюдалось вниз по потоку, где скорость вращения становится мала по сравнению со скоростью деформации. Максимальные значения завихренности наблюдались вблизи точки отрыва пограничного слоя.

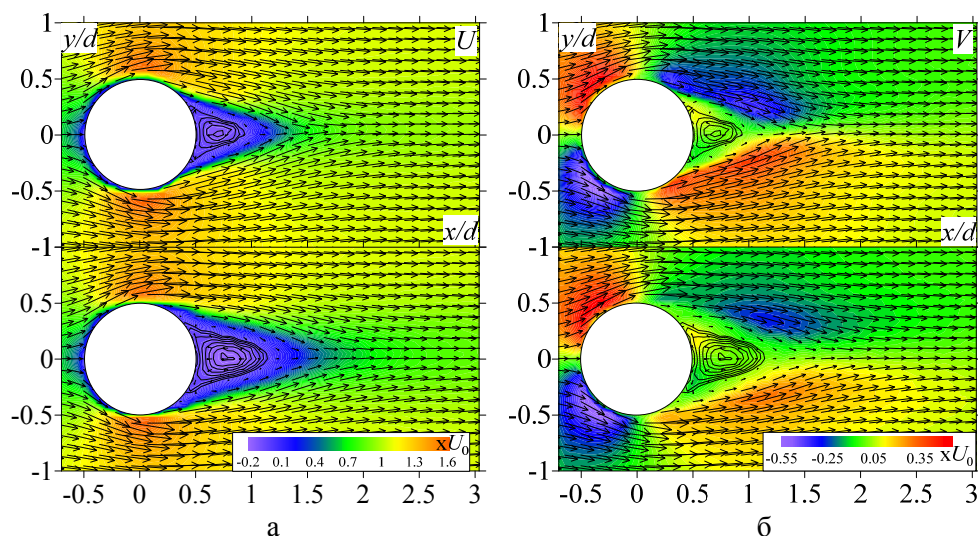


Рис. 2. Поле средней скорости и среднее распределение продольной U (а) и поперечной V (б) компоненты скорости для цилиндра при докавитационном (верхняя пара) и кавитационном (нижняя пара) обтекании цилиндра. Замкнутыми линиями показаны зоны возвратных токов в следе за цилиндром

Fig. 2. The average velocity field and the mean distribution of the longitudinal U (a) and transverse V (b) components of the velocity for the cylinder with the pre-cavitation (upper pair) and cavitation flow past the cylinder (lower pair). Closed lines show the return current zones in the wake of the cylinder

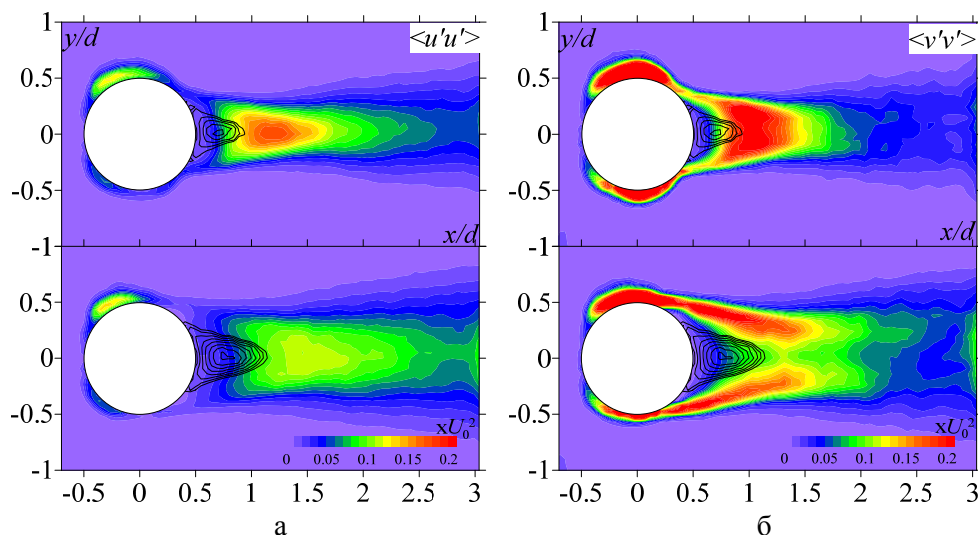


Рис. 3. Среднее распределение кинетической энергии продольных (а) и поперечных (б) пульсаций скорости для цилиндра при докавитационном (верхняя пара) и кавитационном (нижняя пара) обтекании. Замкнутыми линиями показаны зоны возвратных токов в следе за цилиндром

Fig. 3. The average distribution of the kinetic energy of the longitudinal (a) and transverse (b) pulsations of the velocity for the cylinder during the pre-cavitation flow (upper pair) and cavitation flow (lower pair). Closed lines show the return current zones in the wake of the cylinder

Из рис. 2 и 3 можно сделать вывод, что непосредственно за цилиндром сосредоточена область интенсивных турбулентных пульсаций, где формируются противоположно вращающиеся вихри: один по часовой стрелке (в верхней части), другой против часовой стрелки (в нижней части). По вертикали они заметно смещены друг относительно друга. Между этими вихрями жидкость движется в направлении, обратном основному потоку. Значение максимальной скорости обратного тока составило $0,15U_0$ на расстоянии $0,7d$ для докавитационного и $0,21U_0$ на расстоянии $0,78d$ для кавитационного режимов обтекания. Продольные размеры области возвратных токов составили $0,44d$ и $0,6d$, что на 36 % больше. Поперечные размеры выросли на 40 %. Из анализа средних картин течения был обнаружен несимметричный отрыв пограничного слоя, разница рассчитанных углов отрыва составила 7 и 9 градусов для докавитационного и кавитационного обтекания соответственно.

Для анализа фазово-осредненной структуры пульсаций скорости метод POD применен к ансамблям из 2000 полей пульсаций скорости для случаев докавитационного и кавитационного обтекания цилиндра. Рассчитанные собственные значения (представлены в виде спектра, зависимость собственных значений $\epsilon/\epsilon_n = \lambda_n / \sum_{n=1}^N \lambda_n$ от номера моды), собственные функции $\phi_n(\mathbf{x})$ и корреляционные коэффициенты $a_n(t)$. На рис. 4, а показан нормированный на полную кинетическую энергию пульсаций спектр собственных значений POD-мод, демонстрирующий, что первые две главные POD-моды вносят наибольший вклад в интенсивность турбулентных пульсаций в следе цилиндра.

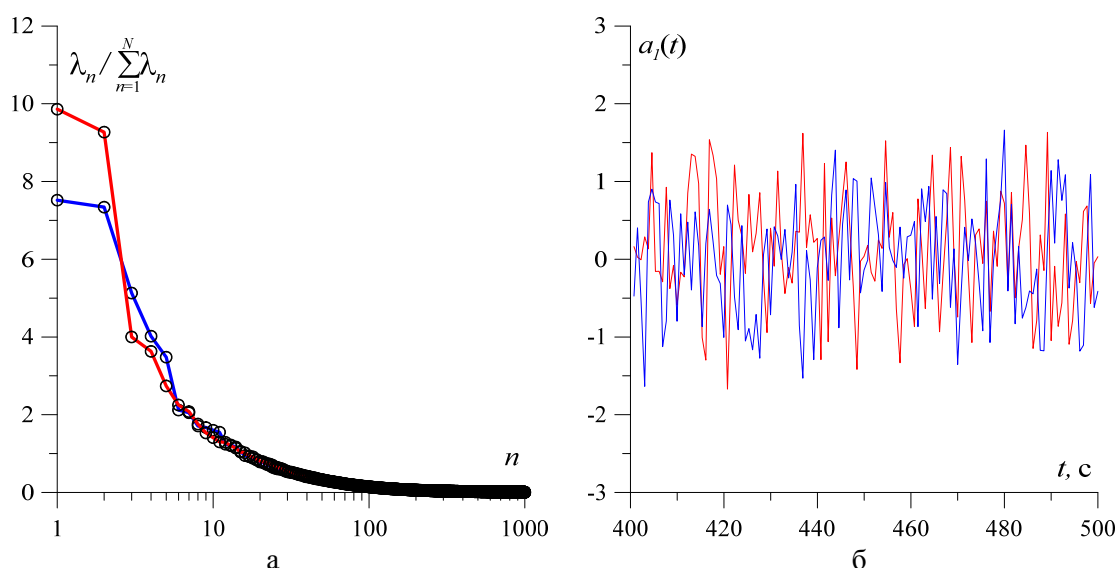


Рис. 4. Спектр собственных значений (а) и корреляционные коэффициенты $a_1(t)$ (б) наиболее энергоемкой моды POD разложения пульсаций скорости. Синим цветом показаны результаты для случая докавитационного обтекания, красным – при кавитационном обтекании цилиндра

Fig. 4. Spectrum of eigenvalues (a) and correlation coefficients $a_1(t)$ (b) of the most energy-intensive mode POD decomposition of velocity pulsations. Blue color shows the results for the case of pre-cavitation flow and red – with cavitation flow around the cylinder

Как можно видеть, при докавитационном обтекании первые две наиболее энергонесущие POD-моды содержат $7,5 + 7,3 = 14,8$ % кинетической энергии пульсаций. В случае кавитационного обтекания кинетическая энергия пульсаций оказывается $9,9 + 9,3 = 19,2$ %, что примерно на 5 % больше. После 10 мод наблюдается заметное изменение угла наклона спектра

(см. рис. 4, а). В первых 10 модах, которые с хорошей точностью реконструируют когерентную компоненту пульсаций, кумулятивно содержится около 36 и 38 % кинетической энергии пульсаций соответственно. На рис. 4, б показаны корреляционные коэффициенты первой POD-моды для случая кавитационного обтекания, которые демонстрируют выраженное квазипериодичное поведение. Коэффициенты корреляции a_1 и a_2 двух главных мод с полями мгновенной скорости (или временные коэффициенты) не являются независимыми и расположены вокруг кольца [13]. Каждое положение на кольце соответствует определенной фазе в квазипериодичной динамике когерентной структуры потока, состоящей из двух доминирующих мод. На основе POD-коэффициентов может быть определена фаза эволюции крупномасштабных вихревых структур [14].

На рис. 5 показаны пространственные распределения двух наиболее энергоемких собственных мод $\phi_{1,2}(\mathbf{x})$ для режима докавитационного обтекания. Отдельно визуализированы продольная (рис. 5, а) и поперечная (рис. 5, б) компоненты двух мод. Красный цвет соответствует положительным значениям пульсаций скорости в рассматриваемой области, а синий – отрицательным. Все распределения нормированы и показаны в одной шкале. Можно видеть, что две первые POD-моды, отличающиеся лишь сдвигом по фазе, связаны с крупномасштабными вихревыми структурами (вихрями Кармана), формирующимися сразу в области возвратных токов. Наблюдаются асимметричная картина пульсаций и поперечные колебания зоны рециркуляции. При переходе к кавитационному обтеканию цилиндра возрастает кинетическая энергия и увеличивается масштаб структур (рис. 6).

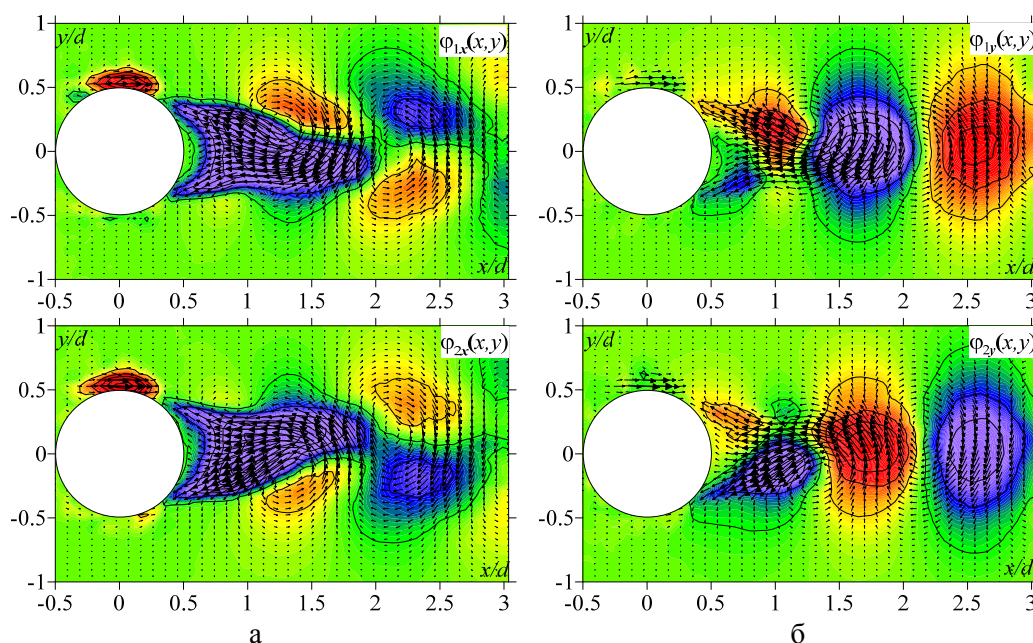


Рис. 5. Пространственные распределения продольной (а) и поперечной (б) компоненты двух наиболее энергоемких мод POD-разложения пульсаций скорости для случая докавитационного обтекания цилиндра. Значения мод нормированы и показаны в одной шкале

Fig. 5. Spatial distributions of the longitudinal (a) and transverse (b) components of the two most energy-intensive modes of POD decomposition of velocity pulsations for the case of pre-cavitation flow past a cylinder. The values of the modes are normalized and shown in one scale

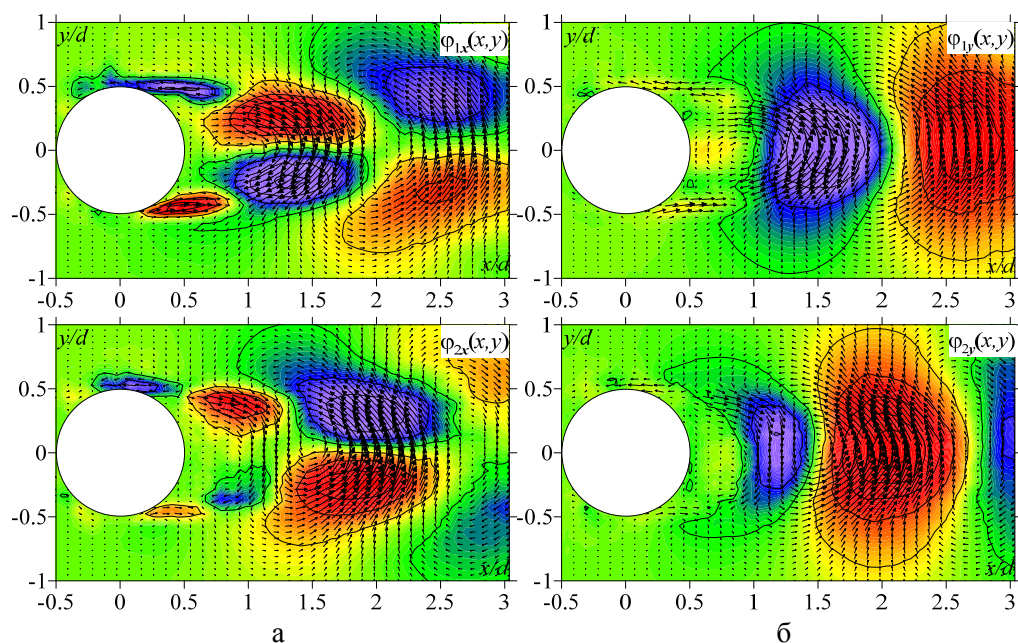


Рис. 6. Пространственные распределения продольной (а) и поперечной (б) компоненты двух наиболее энергоемких мод POD-разложения пульсаций скорости для случая кавитационного обтекания цилиндра. Значения мод нормированы и показаны в одной шкале

Fig. 6. Spatial distributions of the longitudinal (a) and transverse (b) components of the two most energy-intensive modes of POD decomposition of velocity pulsations for the case of cavitation flow past a cylinder. The values of the modes are normalized and shown in one scale

Заключение

Проведено экспериментальное исследование методом PIV характеристик крупномасштабных пульсаций скорости в случае докавитационного и кавитационного обтекания цилиндра при высоком числе Рейнольдса 280 000. Исследуемые режимы обтекания характеризовались наличием несимметричного отрыва пограничного слоя. Разница углов отрыва составила 7 и 9 градусов для докавитационного и кавитационного обтекания соответственно. При переходе к кавитационному режиму происходит увеличение поперечных (на 40 %) и продольных (на 36 %) размеров области возвратных токов. Пространственная форма и кинетическая энергия наблюдаемых крупномасштабных пульсаций в следовой области проанализирована с применением статистического метода POD. Показано, что две первые POD-моды связаны с квазипериодической динамикой вихрей Кармана. В условиях кавитации кинетическая энергия пульсаций двух наиболее энергонесущих мод оказывается на 5 % больше. Помимо увеличения интенсивности, при переходе к кавитационному обтеканию наблюдается заметное увеличение продольных и поперечных размеров крупномасштабных вихревых структур. В работе был сделан вывод, что крупномасштабные вихревые структуры на полях мгновенной скорости могут быть представлены линейной комбинацией двух наиболее энергонесущих POD-мод.

Список литературы

1. **Roshko A.** Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number. *J. Fluid Mech.*, 1961, vol. 10 (3), p. 345–346.

2. **Farell C., Blessman J.** On critical flow around smooth circular cylinders. *J. Fluid Mech.*, 1983, vol. 136, p. 375–391.
3. **Williamson C. H. K.** The natural and forced formation of spot-like ‘vortex dislocations’ in the transition of a wake. *J. Fluid Mech.*, 1992, vol. 243, p. 393–441.
4. **Bloor M. S.** The transition to turbulence in the wake of a circular cylinder. *J. Fluid Mech.*, 1964, vol. 19 (2), p. 290–304.
5. **Добросельский К. Г.** Методика исследования поперечного обтекания цилиндра в гидродинамической трубе // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2013. Т. 8, № 4. С. 110–117.
6. **Ахметбеков Е. К., Бильский А. В., Ложкин Ю. А., Маркович Д. М., Токарев М. П.** Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // Вычислительные методы и программирование. 2007. Т. 7. С. 79–85.
7. **Токарев М. П., Маркович Д. М., Бильский А. В.** Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, № 3. С. 109–120.
8. **Добросельский К. Г.** Применение PIV метода для исследования течения вблизи поперечно обтекаемого цилиндра // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89 (3). С. 687–693.
9. **Holmes P., Lumley J., Berkooz G.** Turbulence, Coherent Structures. Dynamical Systems and Symmetry. Cambridge, Cambridge University Press, 1998.
10. **Meyer K. E., Pedersen J. M., Ozcan O.** A turbulent jet in crossflow analysed with proper orthogonal decomposition. *J. Fluid Mech.*, 2007, vol. 583, p. 199–227.
11. **Alekseenko S. V., Abdurakipov S. S., Hrebtov M. Y., Tokarev M. P., Dulin V. M., Markovich D. M.** Coherent structures in the near-field of swirling turbulent jets: A tomographic PIV study. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2018, vol. 70, p. 363–379.
12. **Mullyadzhyanov R. I., Sandberg R. D., Abdurakipov S. S., George W. K., Hanjalić K.** Propagating helical waves as a building block of round turbulent jets. *Phys. Rev. Fluids*, 2018, vol. 3 (6), p. 062601.
13. **Абдуракипов С. С., Дулин В. М., Маркович Д. М.** Пространственная структура крупномасштабных вихрей в закрученной струе с распадом и прецессией вихревого ядра // Сибирский физический журнал. 2012. Т. 7, № 2. С. 43–47.
14. **Perrin R., Braza M., Cid E., Cazin S., Barthet A., Sevrain A., Thiele F.** Obtaining phase averaged turbulence properties in the near wake of a circular cylinder at high Reynolds number using POD. *Exp. Fluids*, 2007. vol. 43 (2–3), p. 341–355.

References

1. **Roshko A.** Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number. *J. Fluid Mech.*, 1961, vol. 10 (3), p. 345–346.
2. **Farell C., Blessman J.** On critical flow around smooth circular cylinders. *J. Fluid Mech.*, 1983, vol. 136, p. 375–391.
3. **Williamson C. H. K.** The natural and forced formation of spot-like ‘vortex dislocations’ in the transition of a wake. *J. Fluid Mech.*, 1992, vol. 243, p. 393–441.
4. **Bloor M. S.** The transition to turbulence in the wake of a circular cylinder. *J. Fluid Mech.*, 1964, vol. 19 (2), p. 290–304.
5. **Dobroselskiy K. G.** Research Methodology of Cross-Flow Cylinder Pipe Hydrodynamical. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2013, vol. 8, no. 4, p. 110–117. (in Russ.)
6. **Akhmetbekov Ye. K., Bilsky A. V., Lozhkin Yu. A. et al.** Software for Experiment Management and Processing of Data Obtained by Digital Flow Visualization Techniques (ActualFlow). *Vychisl. Metody Programm.*, 2007, vol. 7, p. 79–85. (in Russ.)

7. **Tokarev M. P., Markovich D. M., and Bilsky A. V.** Adaptive Algorithms for PIV Image Processing. *Vychisl. Tekhnol.*, 2007, vol. 12 (3), p. 109–131. (in Russ.)
8. **Dobroselskii K G.** Use of the PIV method for investigation of motion near a cylinder in transverse flow. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89 (3), p. 687–693. (in Russ.)
9. **Holmes P., Lumley J., Berkooz G.** Turbulence, Coherent Structures. Dynamical Systems and Symmetry. Cambridge, Cambridge University Press, 1998.
10. **Meyer K. E., Pedersen J. M., Ozcan O.** A turbulent jet in crossflow analysed with proper orthogonal decomposition. *J. Fluid Mech.*, 2007, vol. 583, p. 199–227.
11. **Alekseenko S. V., Abdurakipov S. S., Hrebtov M. Y., Tokarev M. P., Dulin V. M., Markovich D. M.** Coherent structures in the near-field of swirling turbulent jets: A tomographic PIV study. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2018, vol. 70, p. 363–379.
12. **Mullyadzhanov R. I., Sandberg R. D., Abdurakipov S. S., George W. K., Hanjalić K.** Propagating helical waves as a building block of round turbulent jets. *Phys. Rev. Fluids*, 2018, vol. 3 (6), p. 062601.
13. **Abdurakipov S. S., Dulin V. M., Markovich D. M.** Spatial Structure of Large-Scale Vortices in a Swirling Jet with Breakdown and Precession of the Vortex Core. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2012, vol. 7, no. 2, p. 43–47. (in Russ.)
14. **Perrin R., Braza M., Cid E., Cazin S., Barthet A., Sevrain A., Thiele F.** Obtaining phase averaged turbulence properties in the near wake of a circular cylinder at high Reynolds number using POD. *Exp. Fluids*, 2007. vol. 43 (2–3), p. 341–355.

Материал поступил в редколлегию

*Received
13.06.2019*

Сведения об авторах / Information about the Authors

Абдуракипов Сергей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия)

Sergey S. Abdurakipov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Institute of Thermal Physics SB RAS (1 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
s.s.abdurakipov@gmail.com

Добросельский Константин Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия)

Konstantin G. Dobroselsky, Doctor of Science (Technics), Associate Professor, Institute of Thermal Physics SB RAS (1 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
dobroselsky@mail.ru

Влияние скорости потока на поверхностях сжатия воздухозаборника на эффективность слива пограничного слоя

М. А. Гольдфельд

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

Аннотация

Представлены результаты аналитического и экспериментального исследования зависимости коэффициентов расхода для систем слива при числах Маха полета от 3 до 7. Для расчета использовалась аналитическая модель с фиксированным выходом системы слива при сверхкритическом режиме течения, которая позволяет варьировать количество отводимого воздуха в зависимости от местных условий и характеристик системы слива пограничного слоя. Эксперименты для измерения коэффициента расхода отверстий слива были выполнены в аэродинамической трубе при локальных числах Маха перед областью слива пограничного слоя от 2,5 до 5,96. Модель имела длинную носовую часть для моделирования толстого пограничного слоя перед областью слива пограничного слоя. В результате были получены новые экспериментальные данные о коэффициентах расхода и общая зависимость до числа 6 для углов наклона канала слива 90° и 45° . Показано, что при увеличении локального числа Маха наблюдается тенденция к снижению коэффициента расхода, и эта тенденция усиливается при уменьшении угла наклона канала. Эти данные были использованы для оценки применимости известных аналитических моделей для определения свойств систем слива в условиях гиперзвуковых скоростей потока.

Ключевые слова

пограничный слой, канал слива, гиперзвуковая скорость, воздухозаборник, расход воздуха, эксперимент, моделирование

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (проект № АААА-А17-117030610126-4).

Экспериментальная часть работы выполнена на базе ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН).

Для цитирования

Гольдфельд М. А. Влияние скорости потока на поверхностях сжатия воздухозаборника на эффективность слива пограничного слоя // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 3. С. 15–25. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-15-25

Influence of Flow Speed on the Compression Surfaces of Inlet on Efficiency of the Boundary Layer Bleed

M. A. Goldfeld

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

Abstract

The paper presents the results of analytical and experimental study of the bleed coefficient at high flight Mach numbers from 3 to 7. For the calculation, an analytical model was used model with a fixed exit in the supercritical bleed mode, which allows varying the bleed air mass depending on flow conditions and parameter bleed system. The measurement of the bleed flow coefficients were performed for three bleed configurations in a wind tunnel at local Mach

numbers in front of the bleed area from 2.5 to 5.96. The model had a long forebody, so that before the bleed area there was a thick boundary layer. As a result, new experimental data on bleed coefficient and its general dependence on the Mach numbers up to 6 and the bleed angles of 90 and 45° were obtained. It is revealed that at increase in the local Mach number, the tendency is observed towards a decrease in the bleed coefficient, and this tendency intensifies with decrease in the bleed channel inclination. These data were used to evaluate known analytical models to determine the characteristics of bleed systems at hypersonic flow velocity analytical models to determine the characteristics of bleed systems at hypersonic flow velocity.

Keywords

boundary layer, bleed channel, hypersonic speed, air inlet, mass flow rate, experiment, simulation.

Funding

The work was completed within the framework of the Program of Fundamental Scientific Research of the State Academies of Sciences for 2013–2020 (project AAAA-A17-117030610126-4).

The experimental research was conducted at the Joint Access Center «Mechanics» of ITAM SB RAS.

For citation

Goldfeld M. A. Influence of Flow Speed on the Compression Surfaces of Inlet on Efficiency of the Boundary Layer Bleed. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 3, p. 15–25. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-15-25

Введение

Одним из наиболее эффективных подходов к управлению течением в воздухозаборниках различного типа является слив пограничного слоя (ПС), что позволяет предотвратить отрыв ПС и заклинивание канала [1–3]. Смысл такого процесса управления состоит в том, чтобы удалить низкоэнергетическую часть ПС, которая способствует отрыву потока и приводит к ухудшению характеристик воздухозаборника. В результате удается снизить потери, предотвратить отрыв ПС и обеспечить запуск воздухозаборника [3]. Обычно слив ПС реализуется через систему перфорированных (пористых) областей на поверхностях сжатия вблизи входа в канал или в областях взаимодействия ударных волн с ПС. Перфорация, как правило, представляет собой круглые отверстия или щели с характерным размером, намного меньшим, чем масштаб воздухозаборника. Очевидно, влияние условий обтекания носовой части летательного аппарата и входа в воздухозаборник являются определяющими для обеспечения эффективной работы системы слива ПС [4].

В настоящее время имеется обширный опыт исследования и применения управления течением на входе в канал для воздухозаборников различных типов (плоские, осесимметричные, смешанного сжатия) [5; 6]. На начальном этапе исследований усилия были сосредоточены на изучении общих характеристик систем слива и их влияния на структуру течения и запуск воздухозаборника [7]. Анализ известных исследований свидетельствует, что разработка систем слива воздуха для входных устройств базируется на экспериментальных данных и эмпирических зависимостях, которые играют решающую роль в процессе моделирования таких течений [8–10]. В результате этих исследований было показано, что при организации слива ПС на поверхностях сжатия воздухозаборника приходится сталкиваться со сложными проблемами, от решения которых зависит расход сливаемого воздуха и его влияние на эффективность работы входного устройства.

Обычно задача состоит в определении коэффициента расхода сливаемого воздуха (C_d) в зависимости от диаметра сливного отверстия (суммарной площади слива ПС) и отношения полного давления на внешней границе пограничного слоя и в камере слива (P_{blch}/P_t) [8]. Другим важным геометрическим параметром является угол наклона канала слива. Уменьшение угла наклона канала с 90 до 20° ведет к росту C_d более чем в 2 раза в диапазоне чисел Маха 1,25–2,46 [9]. Вместе с очевидными геометрическими и газодинамическими параметрами при определении C_d необходимо учитывать структуру потока перед областью слива ПС, отрыв ПС, относительную длину канала и плотность упаковки отверстий на поверхности слива [10]. Кроме этого, на эффективность слива ПС оказывает влияние отношение диаметра отверстия к толщине вытеснения пограничного слоя d/δ^* , которое влияет на формирование зон

отрыва в канале слива и приводит снижению массового расхода сливаемого воздуха [11]. Аналогичное влияние оказывает относительная длина канала слива d/L .

Для расчета систем слива ПС используются различные полуэмпирические модели, которые созданы на основе многочисленных экспериментальных данных. Большое количество таких данных позволяет разрабатывать и верифицировать различные аналитические подходы [12] и одновременно является причиной противоречивости некоторых результатов в силу многопараметрического характера задачи. Вместе с экспериментальными исследованиями и аналитическими моделями последнее время широко используются методы численного моделирования [13; 14]. В результате становится возможным не только предсказать влияние слива ПС на характеристики воздухозаборника, но и определить структуру течения, скорость потока, эффективную площадь канала и зависимость этих параметров от условий течения на поверхностях сжатия. Применение методов CFD позволяет глубже понять тонкую структуру потока в каналах слива, что не всегда возможно в рамках эксперимента, и выбрать методы управления течением.

Большинство упомянутых выше исследований слива ПС были сосредоточены на изучении течений применительно к воздухозаборникам с полетным числом Маха от 0,8 до 3,5. Вместе с этим опубликованы отдельные данные, которые свидетельствуют, что с увеличением числа Маха можно ожидать роста сливаемого воздуха ввиду усиления необходимости удаления части пограничного слоя и предотвращения его отрыва, а также обеспечения устойчивой работы двигателя [15; 16]. Однако эти исследования обозначают пока только тенденции и требуют эмпирической проверки в аэродинамической трубе.

Цель настоящей работы состояла в изучении слива пограничного слоя на поверхности сжатия гиперзвукового воздухозаборника и оценки возможности применения известных моделей и аналитических соотношений при расширении полетных чисел Маха до 7. Одновременно задача заключалась в определении влияния системы слива воздуха на характеристики и условия запуска воздухозаборника.

Модель и методика исследования

Для изучения свойств пористого слива ПС использовалась модель носовой части, за которой устанавливался двухскачковый воздухозаборник с предполагаемым максимальным числом Маха около 8 (рис. 1). Модель имела сменную обечайку, что позволяло моделировать взаимодействие ударной волны с пограничным слоем в области слива.

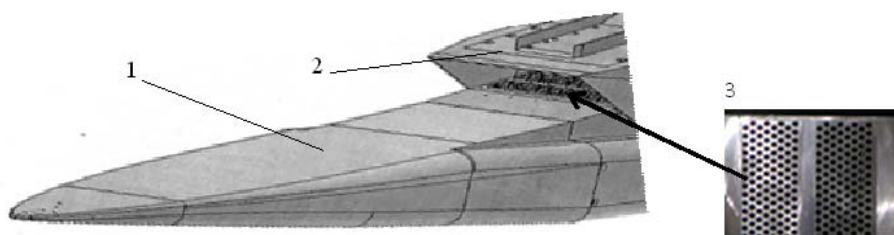


Рис. 1. Схема модели:

1 – носовая часть; 2 – обечайка; 3 – поверхность слива

Fig. 1. Scheme of the model:

1 – forebody; 2 – cowl; 3 – bleed surface

Перед входом в канал располагалась область слива ПС со сменными панелями (рис. 2). В исследованиях использовались вставки с одним или двумя рядами отверстий диаметром $d = 4$ мм для слива ПС. В каждом ряду отверстия были расположены на расстоянии 13 мм

друг от друга, что исключало их взаимное влияние. В обоих случаях опыты проводились при углах наклона отверстий слива 90 и 45°.

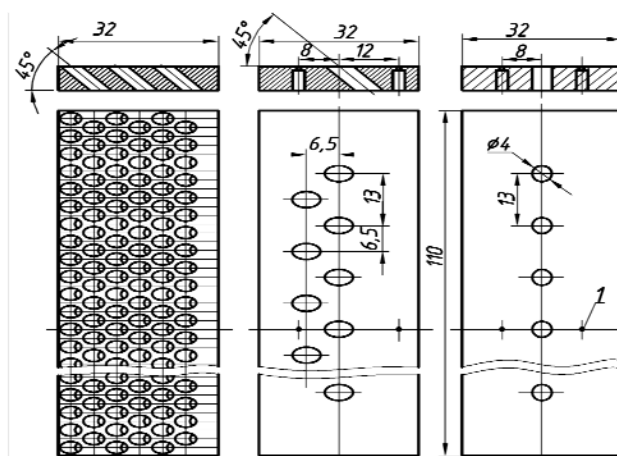


Рис. 2. Схемы слива пограничного слоя (1 – приемник давления).
Все размеры в миллиметрах

Fig. 2. Schemes of porous bleed model. All dimensions in mm

Для оценки влияния слива ПС на запуск и расходные характеристики воздухозаборника [17] использовалась плотная упаковка из 147 отверстий слива с наклоном оси канала 45° и шахматным расположением отверстий слива (см. рис. 2, слева).

Сливаемый поток поступал в общую камеру слива и затем отводился через общий выходной канал, который имел фиксированную площадь критического сечения (рис. 3). Величина этой площади изменялась в зависимости от общей площади отверстий слива. Для определения расхода воздуха измерялись давления в камере слива и в критическом сечении сопла. Опыты показали, что при всех режимах испытаний реализовались критический или сверхкритический режимы истечения, что обусловлено достаточным уровнем повышения давления уже при числе Маха 3 даже при нулевом угле атаки.

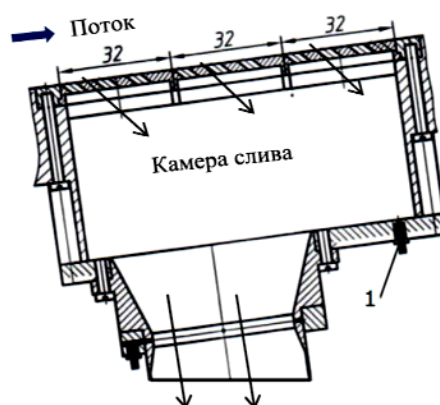


Рис. 3. Камера слива и измерительное сопло (1 – приемник давления)

Fig. 3. Bleed chamber and measuring nozzle (1 – pressure tap)

Для расчета параметров пористого слива ПС использовалась модель системы слива с фиксированной площадью выходного сечения, предложенная в [17]. Предполагается, что баланс массового расхода воздуха через отверстия в области отбора воздуха m_{bl} и массовый расход через выходной канал выпускной камеры m_{ex} остаются постоянными, т. е. $m_{bl} = m_{ex}$, и коэффициент слива воздуха можно определить по соотношению

$$C_d A_{bl} \rho_t U_{ch} = C_{ex} A_{nz}^* \rho_{ex} U_{nz}^*, \quad (1)$$

где C_d , A_{bl} , U_{ch} – общий коэффициент расхода, площадь и скорость в каналах слива, C_{ex} , A_{bl}^* , U_{nz}^* – коэффициент слива, площадь критического сечения и скорость в критическом сечении измерительного сопла камеры слива соответственно. Основное предположение состоит в том, что коэффициент расхода отверстий слива C_d является общим для всей области слива ПС и оценивается на основе обработки эмпирических данных для потоков на плоской пластине с одиночными каналами или пористыми областями слива ПС. Поскольку число Маха в камере слива очень мало ввиду ее большого объема, полное давление в камере равно статическому давлению, и полная температура равна полной температуре в ядре потока над областью слива. Площадь выходного канала определяется из условия критического истечения на выходе ($M = 1$), что было подтверждено результатами калибровки измерительного канала. Коэффициент расхода измерительного сопла C_{nz} зависит от условий течения и геометрии выхода и является известной величиной. Модель слива предполагает непрерывный слив ПС во всей области без идентификации каждого отверстия. Граничные условия задаются для всех точек поверхности в области слива и учитывают разворот сливаемого потока на передней стенке отверстия слива в течении Прандтля – Майера, как предложено в [19].

Экспериментальные исследования слива пограничного слоя были выполнены в аэродинамической трубе Т-313 [20] при числах Маха набегающего потока от 3 до 7, что соответствует локальному числу Маха перед областью слива от 2,5 до 5,96. Опыты были проведены в диапазоне полных давлений 0,2–1,2 МПа, полных температур 270–420 К и чисел Рейнольдса $(18–56)10^6$ 1/м. На длинной носовой части модели перед областью слива реализовался пограничный слой толщиной от 6,2 до 12,8 мм [21]. Измерения показали, что вследствие трехмерного обтекания толщина слоя снижалась к боковым кромкам носовой части примерно на 10–18 % в зависимости от числа Маха. В этих условиях отношение диаметра каналов слива к толщине вытеснения (d/δ^*) в зависимости от условий обтекания изменялось в диапазоне от 1,0 до 3,2.

При выполнении экспериментов измерялось распределение давления на носовой части модели в продольном и поперечном направлениях перед областью слива и за ней. Полное давление Пито измерялось в трех поперечных сечениях перед областью слива для определения параметров пограничного слоя. При испытаниях воздухозаборника определялся запуск, измерялись коэффициенты расхода воздуха и восстановления полного давления для оценки влияния слива пограничного слоя на характеристики воздухозаборника.

Результаты

Эффективность системы слива пограничного слоя зависит от того, насколько успешно удаляется низкоэнергетическая часть пограничного слоя и зависит от величины коэффициента расхода каналов слива. Этот коэффициент определяется как массовый расход сливаемого газа через канал слива, нормированный теоретическим максимальным расходом, который может реализоваться при идеальных условиях критического истечения.

Изменение коэффициента расхода зависит главным образом от числа Маха, угла наклона канала слива и относительного давления в камере слива, P_{blch}/P_t . Величина P_{blch}/P_t определяет режим истечения, а именно докритический ($M < 1$), критический ($M = 1$) и сверхкритический ($M > 1$). Другие свойства течения оказывают влияние на величину C_d , такие как диаметр и форма отверстия, относительная длина канала, расстояние между отверстиями, размер ка-

меры слива и др. Однако их влияние, как показали многочисленные эксперименты [8], не так значительно. При таких условиях обобщение и анализ данных крайне затруднен и требует выполнения большого объема экспериментов. Поэтому здесь обсуждается влияние основных параметров, по которым известно необходимое количество эмпирических данных для оценки достоверности полученных результатов.

Для получения коэффициента расхода слива ПС при больших числах Маха были выполнены измерения давления на поверхностях сжатия и на выходе из канала слива на модели. Было установлено, что для всех условий испытаний при $M > 3$ реализовался сверхкритический перепад давления $P_{blch}/P_t < 0,528$, при котором достигается максимальный коэффициент расхода для фиксированного числа Маха. Для определения коэффициента расхода слива ПС был применен метод, предложенный в работе [19]. В качестве исходных данных использовалось измеренное давление перед каналами слива, в камере слива и в критическом сечении выходного сопла. Коэффициент расхода выходного сопла предполагался известным по результатам калибровки сопел различного размера.

В результате выполненных расчетов были получены данные о влиянии числа Маха и угла наклона канала слива на изменение коэффициента слива ПС. На рис. 4 показано, что снижение коэффициента слива ПС при больших числах Маха заметно замедляется, но эти кривые качественно повторяют таковые для небольших сверхзвуковых скоростей потока. Можно видеть также, что экспериментальные данные систематически превышают расчетные оценки. Влияние угла наклона канала слива сохраняется во всем диапазоне рассмотренных чисел Маха.

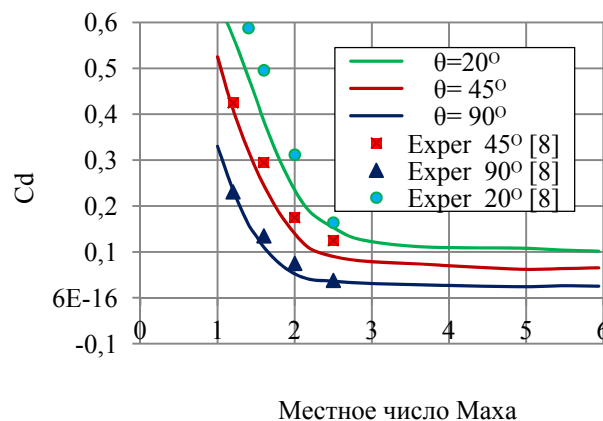


Рис. 4. Зависимость коэффициента слива ПС от числа Маха перед областью слива

Fig. 4. Bleed coefficient vs Mach number

Были получены зависимости коэффициента слива ПС от относительного давления в канале слива $C_d(P_{blch}/P_w)$ при дросселировании выходного сопла камеры слива. Это давление фактически соответствует отношению давлений на внешней границе пограничного слоя над областью слива ПС и в камере слива, и оно зависит от степени дросселирования выходного канала.

На рис. 5 приведено сравнение данных для диапазона чисел Маха от 1,2 до 2,46 из работы [18] и данных настоящей работы для диапазона чисел Маха от 2,8 до 5,96. Во всех случаях рассматривался сверхкритический режим слива ПС. Эти данные свидетельствуют, что влияние относительного давления на коэффициент слива ПС при увеличении числа Маха ведет к снижению величины C_d по мере роста полного давления на поверхности сжатия. Проведенное сравнение показывает, что диапазон изменения коэффициента слива ПС очень широк даже при ограничении входных условий (число Маха, угол канала слива).

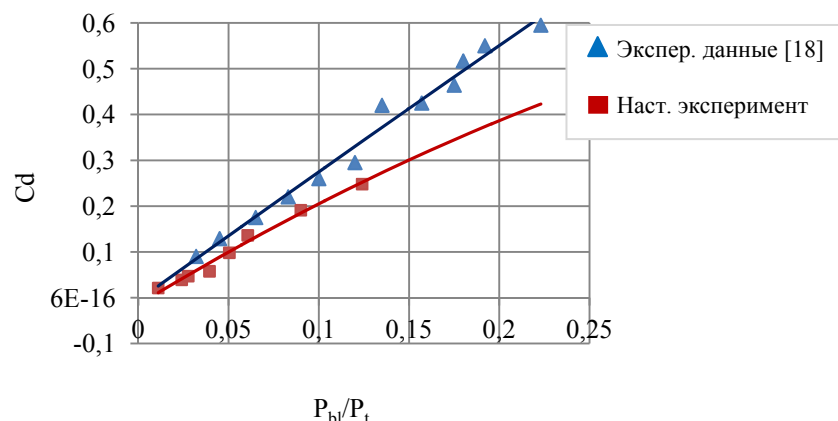


Рис. 5. Зависимость коэффициента слива ПС от относительного давления в канале слива

Fig. 5. Bleed coefficient vs relative pressure

Поэтому предпринимаются попытки обобщения известных данных для облегчения их практического использования [22]. Применение известных аналитических соотношений [18; 22] для описания зависимости коэффициента слива от относительного давления показывает, что экспериментальные данные не всегда удовлетворительно согласуются с расчетом (рис. 6) и, как правило, расчет дает завышенное значение коэффициента слива ПС. Такой результат является характерным как для сверхзвуковых, так и для гиперзвуковых скоростей потока. Надо подчеркнуть, что прямое сравнение свойств систем слива ПС затруднительно, поскольку не всегда совпадают масштабные эффекты (d , d/δ), которые оказывают влияние на структуру течения в канале слива [10; 22].

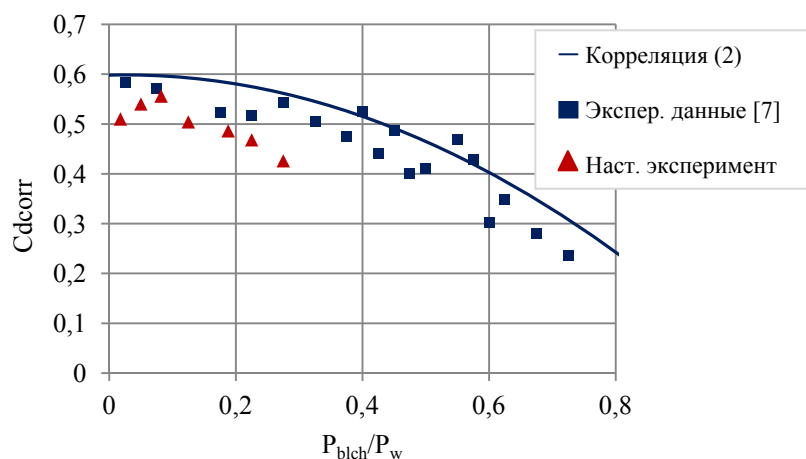


Рис. 6. Обобщенная зависимость коэффициента слива ПС от относительного давления в канале слива

Fig. 6. Bleed flow coefficient vs relative pressure

Анализ известных данных показал, что, несмотря на многопараметрический характер задачи, для сверхкритического режима слива ПС можно получить зависимость коэффициента расхода от числа Маха (рис. 7). Сравнение полученных экспериментальных данных с расче-

том и данными работы [8] (для $M = 2,2$ и $2,46$: светлые символы на рис. 7) показывает их удовлетворительное соответствие, несмотря на различие начальных данных для этих двух случаев.

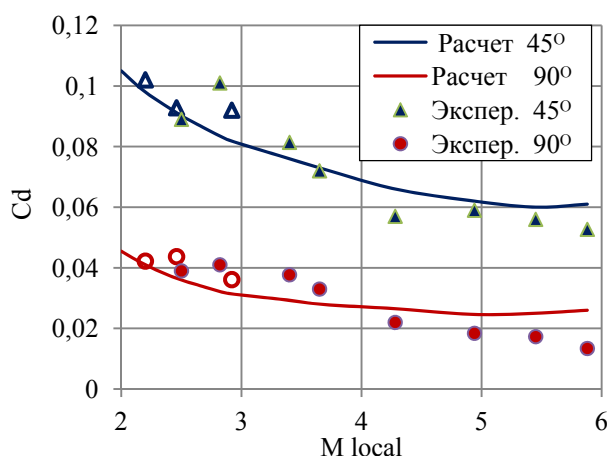


Рис. 7. Изменение коэффициента слива ПС для полетных чисел Маха от 3 до 7

Fig. 7. Bleed flow coefficient vs Mach number

Приведенные данные демонстрируют значительное снижение коэффициента расхода при увеличении числа Маха до 6. Можно видеть, что при $M = 2,5$ и $2,92$ результаты расчета и эксперимента удовлетворительно согласуются, тогда как при $M > 3$ расчет дает завышенную оценку для коэффициента слива ПС. Причина такого различия может состоять в увеличении интенсивности «барьерного» скачка на задней стенке отверстия слива при увеличении числа Маха, наполненности профилей скорости пограничного слоя и несовпадении начальных условий (число Рейнольдса, взаимное влияние отверстий). Следует отметить, что здесь рассматривается только сверхкритический режим течения, но при небольших сверхзвуковых скоростях могут реализоваться одновременно все режимы течения, особенно при многорядной плотной упаковке отверстий на поверхностях сжатия.

Тем не менее выполненные расчеты слива пограничного слоя для гиперзвукового воздухозаборника в диапазоне для чисел Маха от 3 до 7 свидетельствуют, что использованная модель слива ПС обеспечивает реалистичное предсказание массового расхода. Полученные данные показывают, что для предотвращения отрыва и реализации запуска воздухозаборника достаточно обеспечить массовый расход слива ПС около 5 % общего расхода воздуха через воздухозаборник (рис. 8). Можно видеть, что слив пограничного слоя приводит к предотвращению отрыва пограничного слоя, повышению давления перед входом в канал воздухозаборника и, как следствие, к увеличению расхода воздуха более чем на 30 %. Такой эффект сохранялся во всем исследованном диапазоне чисел Маха и углов атаки.

Анализ изменения массового расхода сливаемого воздуха показал [17], что с увеличением числа Маха возрастает не только абсолютная величина расхода сливаемого воздуха, но и его относительная величина (рис. 9). Рост расхода сливаемого воздуха происходит, несмотря на значительное снижение коэффициента расхода слива ПС, в силу увеличения относительного давления в каналах слива при увеличении локального числа Маха перед областью слива. Можно предположить, что полученное различие расчетных и экспериментальных данных обусловлено двумя причинами: некорректным применением эмпирического коэффициента расхода сливных отверстий C_d для условий настоящего эксперимента и увеличением интенсивности веера волн разрежения на отверстиях слива ПС, который приводит к снижению эффективного сечения канала.

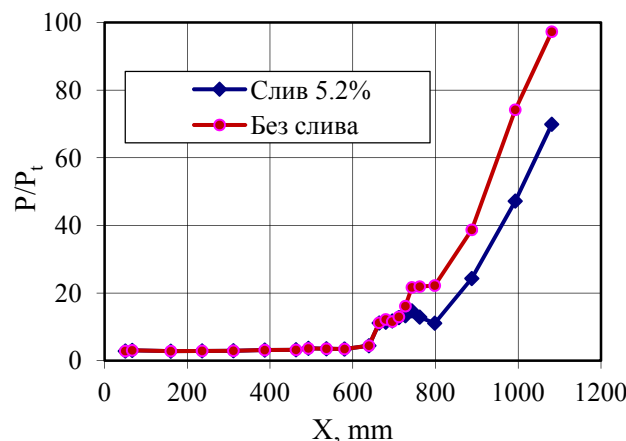


Рис. 8. Влияние слива ПС на распределение давления в воздухозаборнике

Fig. 8. Bleed influence on the pressure distribution at Mach number of 6

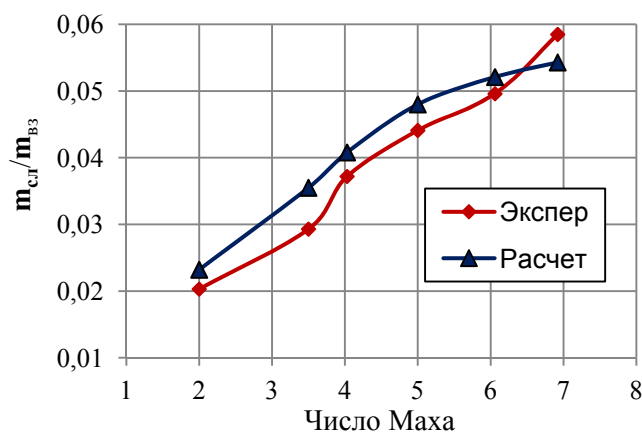


Рис. 9. Относительный массовый расход слива ПС в зависимости от числа Маха свободного потока

Fig. 9. Relative bleed mass flow rate vs freestream Mach number

Заключение

В работе представлены данные о коэффициентах расхода систем слива для 3-х конфигураций их расположения на панели слива пограничного слоя при локальных числах Маха от 2,5 до 6, что соответствует числам Маха полета от 3 до 7. Эти данные использовались для оценки применимости известных аналитических моделей для определения характеристик систем слива при разработке гиперзвуковых входных устройств.

Полученные данные указывают на то, что известные аналитические модели позволяют корректно прогнозировать влияние относительного давления и угла наклона отверстий слива пограничного слоя на коэффициент расхода при гиперзвуковых скоростях потока перед областью слива ПС.

Показано, что при увеличении локального числа Маха наблюдается тенденция к снижению коэффициента расхода слива вследствие увеличения интенсивности барьерного скачка на задней стенке отверстия слива и зоны рециркуляции в канале.

Установлено, что при росте числа Маха снижение угла наклона отверстия слива приводит к большему снижению коэффициента расхода слива пограничного слоя, чем при небольших сверхзвуковых скоростях потока.

Использованный подход позволяет осуществить аналитическое определение расходных характеристик системы слива пограничного слоя, которые затем могут быть оптимизированы в аэродинамической трубе с меньшим количеством испытаний.

Список литературы / References

1. **Seddon J., Goldsmith E.** Intake Aerodynamics. In: AIAA Education Ser. Reston, 1985, 426 p.
2. **Van Wie D. M.** Scramjet Inlets in Scramjet Propulsion. In: AIAA. Eds. E. T. Curran, S. N. B. Murthy. Reston, VA, 2000, vol. 189, p. 447–511.
3. **Herrmann D., Gulhan A.** Experimental Analysis of Inlet Characteristics of an Airbreathing Missile with Boundary-Layer Bleed. *J. of Propulsion and Power*, 2015, vol. 31, no. 1, p. 170–179.
4. **Choe Y., Kim C.** Numerical Investigation of Bleed Effects on Supersonic Inlet under Various Bleed and Inlet Conditions. In: 34th AIAA Applied Aerodynamics Conference. AIAA Paper 2016-3564. 11 p.
5. **Hamed A., Shang J.** Survey of validation data base for shockwave boundary-layer interactions in supersonic inlets. *J. of Propulsion and Power*, 1991, vol. 7, no. 4, p. 617–25.
6. **Surber L., Tinapple J.** Inlet Flow Control Technology Learning from History, Reinventing the Future. In: AIAA Paper 2012-0012. 19 p.
7. **Mayer D. W., Paynter G. C.** Boundary Conditions for Unsteady Supersonic Inlet Analyses. *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, no. 6, p. 1200–1206.
8. **Willis B., Davis D., Hingst W.** Flow Coefficient Behavior for Boundary-Layer Bleed Holes and Slots. In: 33rd AIAA Aerospace Sci. Meeting and Exhibit. Reno, NV, 1995, AIAA Paper 1995-031.
9. **Harloff G. J., Smith G. E.** Supersonic-Inlet Boundary-Layer Bleed Flow. *AIAA Journal*, 1996, vol. 34, no. 4, p. 778–785.
10. **Davis D. O., Vyas M., Slater J. W.** Research on Supersonic Inlet Bleed. In: 50th AIAA Aerospace Science Meeting. Nashville, TN, 2012, AIAA Paper 2012-0272, 12p.
11. **Paynter G. C., Treiber D. A., Kneeling W. D.** Modeling supersonic inlet boundary-layer bleed roughness. *J. of Propulsion and Power*, 1993, vol. 9, no. 4, p. 622–627.
12. **Eichorn M., Barnhart P., Davis D., Vyas M., Slater J.** Effect of Boundary-Layer Bleed Hole Inclination Angle and Scaling on Flow Coefficient Behavior. In: 51st Aerospace Science Conference. Grapevine, Texas, 2013, AIAA-2013-0424, 19 p.
13. **Duncan S. A., Orkwis P. D., Ugolotti M.** CFD Investigation of Supersonic Bleed with Discretely Modeled Holes in Cambridge Wind Tunnel. In: 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. San Diego, 2016, AIAA Paper 2016-0333, 24 p.
14. **Chang D., Crowe D. S., Sherer S.** CFD Investigation Using Bleed as a Method of Active Flow Control. In: 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2017, AIAA Paper 2017-1423.
15. **Schulte D., Henckels A., Wepler U.** Reduction of Shock Induced Boundary Layer Separation in Hypersonic Inlets using Bleed. *Aerospace Science Technology*, 1998, vol. 2, p. 231–239.
16. **Tan H.-J., Li C.-H., Zhang Y.** Investigation of a Fluidic Shock Control Method for Hypersonic Inlets. *J. of Propulsion and Power*, 2010, vol. 26, no. 5, p. 1072–1083.
17. **Falempin F., Goldfeld M. A., Semenova Yu. V., Starov A. V., and Timofeev K. Yu.** Experimental study of different control methods for hypersonic air inlets. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2008, vol. 15, no. 1, p. 1–9. (in Russ.)

18. **Slater J. W., Saunders J. D.** Modeling of Fixed-Exit Porous Bleed Systems. *J. of Prop and Power*, 2010, vol. 26, no. 2, p. 193–202.
19. **Morell A., Hamed A.** Supersonic expansion based model for 3D flow through bleed hole rows. In: 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Dallas, Texas. 2013. AIAA 2013-0426. 11 p.
20. **Zapryagaev V. I., Mazhul I. I., and Maksimov A. I.** Flow field study in the T-313 wind-tunnel test section for $M = 7$. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2013, vol. 20, no. 2, p. 166–180. (in Russ.)
21. **Orlik E., Fedioun I., Davidenko D.** Boundary-Layer Transition on a Hypersonic Forebody: Experiments and Calculations. *J. of Spacecraft and Rockets*, 2011, vol. 48, no. 4, p. 545–552.
22. **Slater J. W.** Improvements in Modeling 90° Bleed Holes for Supersonic Inlets. In: 7th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Orlando, FL. 2009. AIAA Paper 2009-0710, 12 p.

Материал поступил в редколлегию
Received
08.07.2019

Сведения об авторе / Information about the Author

Гольдфельд Марат Абрамович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/3, Новосибирск, 630090, Россия)

Maran A. Goldfeld, Candidate of Technical Sciences (PhD), Senior Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
gold@itam.nsc.ru

УДК 532.526
DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-26-38

Эксперименты по ламинаризации сверхзвукового пограничного слоя вдувом инородного газа

**В. И. Лысенко, Б. В. Смородский, Ю. Г. Ермолаев
А. А. Яцких, А. Д. Косинов**

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

Аннотация

Проведены экспериментальные исследования влияния распределенной инжекции тяжелого газа (гексафторида серы, SF_6) в пристенный подслой сверхзвукового (при числе Маха $M = 2$) пограничного слоя плоской пластины на его устойчивость к искусственным (контролируемым) возмущениям. Впервые в экспериментах с контролируемыми возмущениями получено, что такой вдув тяжелого газа приводит к стабилизации пограничного слоя, проявляющейся в уменьшении скоростей роста возмущений. Получено хорошее согласование экспериментальных данных с результатами расчетов по линейной теории устойчивости.

Ключевые слова

сверхзвуковой пограничный слой, гидродинамическая устойчивость, ламинарно-турбулентный переход, проницаемые покрытия, инжекция, бинарная газовая смесь

Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-01-00070-а) и в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (проект АААА-А17-117030610125-7).

Для цитирования

Лысенко В. И., Смородский Б. В., Ермолаев Ю. Г., Яцких А. А., Косинов А. Д. Эксперименты по ламинаризации сверхзвукового пограничного слоя вдувом инородного газа // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 3. С. 26–38. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-26-38

Experiments on Supersonic Boundary Layer Laminarization by Means of Foreign-Gas Injection

**V. I. Lysenko, B. V. Smorodsky, Yu. G. Yermolaev
A. A. Yatskih, A. D. Kosinov**

*S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation*

Abstract

Experimental investigation of the influence of the distributed heavy gas (sulfur hexafluoride, SF_6) injection into the near-wall sub-layer of a boundary layer on the hydrodynamic stability in relation to controlled disturbances of the supersonic flat-plate boundary-layer at free-stream Mach number $M = 2$ have been performed. It was for the first time in controlled experiments obtained that injection of this foreign gas leads to the boundary-layer stabilization that is manifested in reduction of disturbance amplification rates. Good quantitative agreement of collected experimental data with computations based on the linear stability theory is obtained.

Keywords

supersonic boundary layer, hydrodynamic stability, laminar-turbulent transition, permeable coatings, injection, binary gas mixture

© В. И. Лысенко, Б. В. Смородский, Ю. Г. Ермолаев, А. А. Яцких, А. Д. Косинов, 2019

Funding

The research was carried out within the framework of the Program of Fundamental Scientific Research of Russian state academies of sciences in 2013–2020 (project AAAA-A17-117030610125-7, no. 0323-2018-0009) and was also supported by Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-01-00070a)

For citation

Lysenko V. I., Smorodsky B. V., Yermolaev Yu. G., Yatskih A. A., Kosinov A. D. Experiments on Supersonic Boundary Layer Laminarization by Means of Foreign-Gas Injection. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 3, p. 26–38. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-26-38

Введение

Некоторые задачи механики жидкости и газа связаны с управлением пограничным слоем и, в частности, его ламинарно-турбулентным переходом. Одним из доступных методов управления является отсос газа из пограничного слоя через проницаемую поверхность. Это может замедлить процесс турбулизации пограничного слоя. Стабилизирующее действие отсасывания газа из пограничного слоя объясняется уменьшением его толщины и формированием более устойчивых профилей скорости. Проблема стабилизации течений (как для дозвуковых, так и для сверхзвуковых скоростей обтекания) рассматривалась, например, в монографиях [1; 2].

К сожалению, проницаемые пористые покрытия всегда имеют ненулевую шероховатость. По этой причине их влияние на переход обусловлено как проницаемостью (благодаря нестационарным течениям в каналах пористого покрытия), так и влиянием шероховатости.

При определении местоположения ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) и исследовании устойчивости пограничного слоя к естественным и искусственным возмущениям в работе [3] было получено, что пористое покрытие ускоряет переход и оказывает дестабилизирующее влияние на первую моду неустойчивости пограничного слоя.

В [4–8] исследовалась инжекция двуокиси углерода (CO_2) в гиперзвуковой пограничный слой на остром конусе. Эксперименты проводились в высокоэнтальпийной ударной трубе Т-5 Калифорнийского технологического института, США. Характерное время пуска в этой установке – не более 2 мкс. Метод управления переходом, разработанный в [4], основан на экспериментально установленном факте, что переход высокотемпературного гиперзвукового пограничного слоя в углекислом газе происходит при более высоких числах Рейнольдса по сравнению с пограничными слоями в воздухе и азоте. Механизм этого явления объясняется более сильным затуханием второй (акустической) моды неустойчивости, доминирующей при переходе гиперзвукового слоя. Это поглощение энергии объясняется низкой энергией диссоциации и большим количеством колебательных мод молекул CO_2 . Этого не происходит в потоках с меньшими числами Маха – в сверхзвуковых и, тем более, дозвуковых пограничных слоях. В [5] представлены результаты измерений по переходу, выполненных в Т-5 на модели острого конуса. С помощью термопар измерялось распределение среднего теплового потока на поверхности модели. Было установлено, что число Рейнольдса перехода увеличивается с увеличением скорости инжекции углекислого газа в пограничный слой.

Однако вплоть до настоящего времени эксперименты по устойчивости пограничного слоя в импульсных установках и с использованием таких датчиков не проводились. В статье [8] представлены результаты расчетов по линейной теории устойчивости (ЛТУ) с применением метода e^N . Эти расчеты показали, что учет колебательного неравновесия молекул CO_2 способствует уменьшению скорости нарастания второй моды неустойчивости.

Наконец, в статье [7] представлены результаты экспериментов по переходу, выполненных без инжекции, но для случая, когда газ представлял собой смесь азота и углекислого газа, взятых в разных пропорциях. Авторы пришли к заключению о том, что число Рейнольдса перехода пограничного слоя на конической модели для такой газовой смеси увеличивается при увеличении полной энтальпии потока.

Представленные в настоящей работе эксперименты проводились в других условиях по сравнению с [4–8]. Наши измерения проводились в аэродинамической трубе непрерывного действия с типичным временем пуска 40 минут, при меньшем, сверхзвуковом, числе Маха $M = 2$ и с использованием высокочастотной термоанемометрии для сбора данных. В нашем случае механизм стабилизации течения в пограничном слое не объясняется высокотемпературной диссоциацией молекул углекислого газа, он имеет другую природу. Этот механизм связан с изменением профилей среднего течения [9]. Здесь мы предпринимая попытку повлиять на неустойчивость первой (вихревой) моды путем вдува инородного газа. Это отличается от механизмов, сформулированных в [4–8], где усилия экспериментаторов были направлены на подавление второй (акустической) моды неустойчивости, доминирующей при переходе гиперзвуковых пограничных слоев.

Теоретические оценки, представленные в [10], показывают, что стабилизация сверхзвукового пограничного слоя возможна путем закачки тяжелого газа в пристенный подслой этого пограничного слоя. При этом происходит благоприятная деформация среднего течения (оно становится более устойчивым) благодаря изменению профиля средней плотности пограничного слоя.

Эффект роста плотности в пристеночном слое сверхзвукового пограничного слоя полностью аналогичен влиянию охлаждения поверхности модели, которое при сверхзвуковых скоростях потока приводит к стабилизации возмущений первой моды [11].

Целью данной работы является экспериментальное и теоретическое исследование влияния распределенной (как нормальной, так и наклонной по отношению к обтекаемой поверхности) инъекции тяжелого газа (гексафторида серы, SF_6) в пристенный подслой пограничного слоя на линейную устойчивость к искусственным (контролируемым) возмущениям плоского сверхзвукового пограничного слоя при числе Маха набегающего потока $M = 2$.

Постановка эксперимента

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе Т-325 Института теоретической и прикладной механики СО РАН [12] при числе Маха набегающего потока $M_\infty = 2$, температуре торможения $T_0 \approx 290$ К и значениях единичного числа Рейнольдса $Re_{l_\infty} = (3 - 5) \times 10^6 \text{ м}^{-1}$. Поскольку Т-325 – установка непрерывного действия, тепловые граничные условия на поверхности модели во время типичного пуска (~ 40 минут) соответствуют теплоизолированной стенке. Это означает, что температура стенки была равна температуре восстановления, и для выбранных M_∞ , T_0 она была несколько ниже температуры окружающей среды: $T_{\text{wall}} \approx 273$ К.

Модель представляла собой стальную плоскую пластину длиной 440 мм, толщиной 10 мм и шириной 200 мм, с острой передней кромкой, скошенной под углом 14° (с радиусом притупления $r_b \approx 0,05$ мм). Схема модели приведена на рис. 1. Начало отсчета продольной координаты x (в направлении свободного потока) находится на передней кромке модели. На участке рабочей поверхности $50 \leq x \leq 170$ мм (на всю ширину модели) в пластине был сделан паз глубиной 4,3 мм. В данный паз помещались различные сменные вставки в виде плоских пластинок различных пористости, размеров пор и т. д.

В силу конструктивных особенностей модели проникаемая часть пористой вставки располагалась на участке $65 \leq x \leq 155$ мм и $|z| \leq 85$ мм от оси модели.

В настоящей работе использовались две пластины-вставки.

Вставка 1 – пористая вставка из нержавеющей стали (рис. 2, а, б) с пористостью $\phi = 39\%$, чистотой фильтрации (аналог размера пор) $d \approx 10 \text{ мкм}$, толщиной $h = 2,5$ мм. Характерная величина шероховатости поверхности пластины $R_z \approx 11 \text{ мкм}$. Вставка была изготовлена из по-

ристой нержавеющей стали ПНС-8 (спеченная из металлического порошка с размером частиц $D \approx 70 \text{ }\mu\text{m}$), поставляемой Выксунским металлургическим заводом.

Вставка 2 – проницаемая перфорированная вставка из нержавеющей стали (рис. 2, в) с диаметром пор $200 < d < 260 \text{ }\mu\text{m}$, шагом пор $s = 1 \text{ мм}$, пористостью $\phi = 5\%$ и толщиной $h = 1 \text{ мм}$. Отверстия просверлены с помощью Nd:YAG лазера.

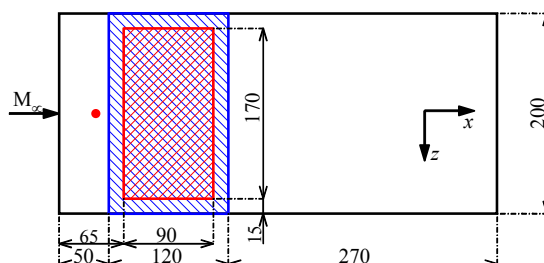


Рис. 1. Схема экспериментальной модели плоской пластины (вид сверху). Вся пористая вставка ($50 \leq x \leq 170 \text{ мм}$) показана штриховкой, проницаемая часть вставки, через которую осуществлялся вдув тяжелого газа ($65 \leq x \leq 155 \text{ мм}$), – двойной штриховкой. Положение источника возмущений обозначено малым кружком: $x_{\text{source}} = 37 \text{ мм}$

Fig. 1. Schematic of the experimental flat-plate model, plan view. The whole porous insert ($50 \leq x \leq 170 \text{ mm}$) is shown as a hatched region, whereas the permeable part of the insert where injection of a foreign gas was performed ($65 \leq x \leq 155 \text{ mm}$) is shown by the cross-hatching. The position of the disturbance generator is shown by the small circle: $x_{\text{source}} = 37 \text{ mm}$

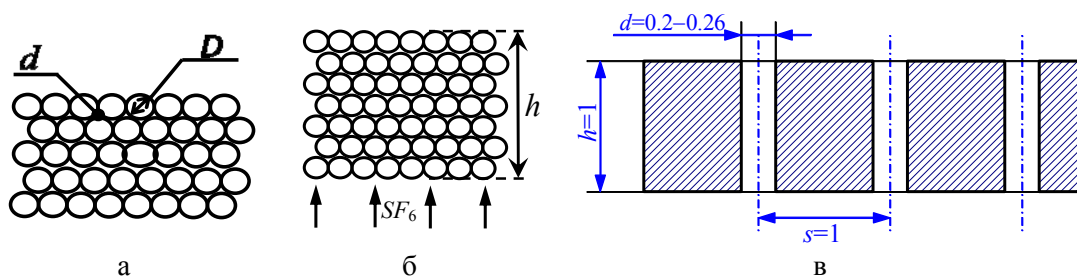


Рис. 2. Схематичное изображение проницаемых вставок: вставка 1, вид сверху (а), поперечное сечение (б); вставка 2 (в)

Fig. 2. Schematic of the permeable inserts: insert 1, plan view (a), cross-section (b); insert 2 (c)

Исследуемая пластина жестко крепилась к боковым стенкам рабочей части аэродинамической трубы под нулевым углом атаки. Искусственные контролируемые возмущения вводились в пограничный слой модели с помощью точечного источника на основе высокочастотного тлеющего разряда [13; 14]. Устойчивость пограничного слоя по отношению к контролируемым возмущениям определенной частоты измерялись одноканальным термоанемометром постоянного сопротивления с вольфрамовой нитью диаметром 10 мкм и длиной 1,5 мм. Величина перегрева нити датчика составляла 0,8. Вследствие этого можно утверждать, что термоанемометр фиксировал преимущественно пульсации массового расхо-

да. Измерения нарастающих вниз по потоку возмущений проводились в окрестности максимума пульсаций поперек пограничного слоя, в слое $E = \text{const}$ (где E – среднее напряжение в диагонали моста термоанемометра), иными словами, вдоль линии постоянного значения массового расхода. Измерения возмущений проводились в окрестности линии $z = 0$ (соответствующей оси симметрии модели) при $|z| \leq 15$ мм, т. е. достаточно далеко от боковых стенок рабочей части трубы, расположенных при $|z| = 100$ мм).

Рабочая модель в экспериментах обтекалась потоком воздуха, а тяжелым газом, использовавшимся для вдува в пограничный слой, был гексафторид серы, SF_6 . Это газ с молекулярным весом $m_1 = 146,07$ (плотность газа в стандартных условиях $\rho = 6,15$ кг/м³), т. е. в пять раз тяжелее воздуха. Эксперименты проводились при различных значениях массового расхода Q примеси, впрыскиваемой в пограничный слой.

Пульсационные и средние параметры потока измерялись с помощью автоматизированной системы сбора данных, подробно описанной в [15; 16]. Пульсационное напряжение термоанемометра записывалось в компьютер с помощью аналого-цифрового преобразователя с частотой дискретизации 750 кГц, при этом длина реализации составила в основном 65536. Среднее напряжение моста измерялось вольтметром Agilent 34401A. Это напряжение записывалось в компьютер через последовательный порт. Измерения характеристик потока проводились с определенным шагом по продольной координате x . При последующей обработке собранных экспериментальных данных амплитудно-частотный спектр $A(f, x)$ рассчитывался путем усреднения измеренных спектров мощности.

Линейная теория устойчивости

Динамика бинарной смеси вязких теплопроводных сжимаемых газов может быть описана с помощью системы дифференциальных уравнений в частных производных [17; 18]. Определяющими параметрами динамики газовой смеси являются m_2 , m_1 – молекулярные веса, и C_{p2} , C_{p1} – удельные теплоемкости основного газа и примеси соответственно. На основе этих общих уравнений авторами [18; 19] получена система обыкновенных дифференциальных уравнений для описания течения в двумерном стационарном сверхзвуковом пограничном слое. Эта система уравнений сформулирована для бинарной смеси газов в отсутствие каких-либо химических реакций и в приближении локальной автомодельности течения [19]. Уравнения учитывают влияние диффузии примеси поперек пограничного слоя и влияние градиента давления в продольном направлении. Наиболее важным параметром, описывающим течение пограничного слоя, является параметр инжекции инородного газа через поверхность модели:

$$-f_w = \bar{\rho}_w \bar{V}_w \text{Re}. \quad (1)$$

Фактически это равенство является граничным условием для функции тока f , которая на поверхности модели должна принимать указанное выше значение. В (1) $\bar{\rho}_w = \rho_w / \rho_e$ – это плотность смеси на стенке, нормированная на соответствующее значение на внешней границе пограничного слоя, $\bar{V}_w = V_w / U_e$ – безразмерная нормальная составляющая скорости на поверхности, а Re – число Рейнольдса, построенное по масштабу Блазиуса ламинарного пограничного слоя. Введенный параметр инжекции (1) является, таким образом, нормированным массовым расходом примеси по нормали к проницаемой поверхности. Коэффициенты вязкости и теплопроводности для компонентов смеси, а также коэффициент диффузии примеси рассчитывались на основании кинетической теории с использованием потенциала Леннарда – Джонса [17]. Вязкость и теплопроводность бинарной смеси определялись с использованием полуэмпирической формулы Уилки [20]. Учитывалась также поправка Эйкена при расчете коэффициента теплопроводности многоатомных газов. Наконец, краевая задача для

уравнений пограничного слоя бинарной смеси интегрировалась численно с использованием метода Рунге – Кутты четвертого порядка. Для удовлетворения граничным условиям применялись метод стрельбы и ньютоновские итерации. Уравнения, граничные условия и численные методы подробно описаны в предыдущей публикации [19].

Линейная теория устойчивости для пограничного слоя бинарной газовой смеси была разработана авторами работы [10]. После линеаризации безразмерных уравнений движения вязкой теплопроводной бинарной газовой смеси для возмущений (без учета термодиффузии), представленных в виде набора квазигармонических в пространстве и времени волн $q(x, y, z, t) = \tilde{q}(y) \exp i(\alpha x + \beta z - \alpha C t)$, была получена система обыкновенных дифференциальных уравнений. Она решается для следующего набора однородных граничных условий на поверхности и на внешней границе пограничного слоя:

$$\begin{aligned} \left(\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}, \tilde{h}, f_w \tilde{c} - \bar{\rho}_w \bar{D}_{12} \frac{d\tilde{c}}{dy} \right) &= 0 \quad (\bar{y} = 0), \\ (\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}, \tilde{h}, \tilde{c}) &\rightarrow 0 \quad (\bar{y} \rightarrow \infty). \end{aligned} \quad (2)$$

Для исследования пространственной устойчивости предполагается, что частота и трансверсальное волновое число являются действительными величинами, тогда как продольное волновое число $\alpha = \alpha_r + i\alpha_i$ – комплексное. При этом волновые возмущения с $-\alpha_i > 0$ относятся к неустойчивым возмущениям, растущим вниз по течению, а возмущения с $-\alpha_i \leq 0$ являются устойчивыми и затухают с ростом x .

Полученная задача на собственные значения интегрировалась численно с использованием метода ортогонализаций [2]. Более подробно уравнения устойчивости и численный метод обсуждаются в [10].

Результаты

Влияние инжекции SF_6 на устойчивость пограничного слоя по отношению к искусственным (контролируемым) возмущениям для вставки I

Были проведены исследования развития поля искусственных возмущений, генерируемых в пограничном слое нашим источником. На рис. 3 показаны β -спектры, измеренные на частоте возбуждения $f = 14$ кГц (рис. 3, а) в экспериментах с моделью со сплошной вставкой, а также с проницаемой вставкой I при различной скорости инжекции элегаза Q (рис. 3, б–г) при $Re_1 = 5 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$. Показаны нормированные (по величине максимума в первом сечении по x) среднеквадратичные амплитуды колебаний $A_{f\beta}$ в некоторых выбранных сечениях по x в зависимости от размерного продольного волнового числа β (рад/мм).

На рис. 3 видно, что вдув тяжелого газа заметно стабилизирует возмущения на частоте возбуждения $f = 14$ кГц.

Сравнение спектров возмущений показывает, что во всех четырех экспериментах, как со сплошной вставкой, так и со вставкой I, наиболее усиливающимися возмущениями в направлении вниз по потоку являются пульсации с $0,5 < |\beta| < 0,7$ рад/мм. Видно небольшое дестабилизирующее влияние пористости без инжекции элегаза (см. рис. 3, б) по сравнению с гладкой поверхностью (см. рис. 3, а). Однако увеличение скорости вдува тяжелого элегаза Q от нуля (см. рис. 3, б) до $Q = 0,085$ (см. рис. 3, в) и $Q = 0,18 \text{ г/см}^2 \cdot \text{мин}$ (см. рис. 3, г) последовательно и заметно уменьшает скорости нарастания возмущений для всех β . Таким образом, пограничный слой стабилизируется, по крайней мере на частоте возбуждения $f = 14$ кГц.

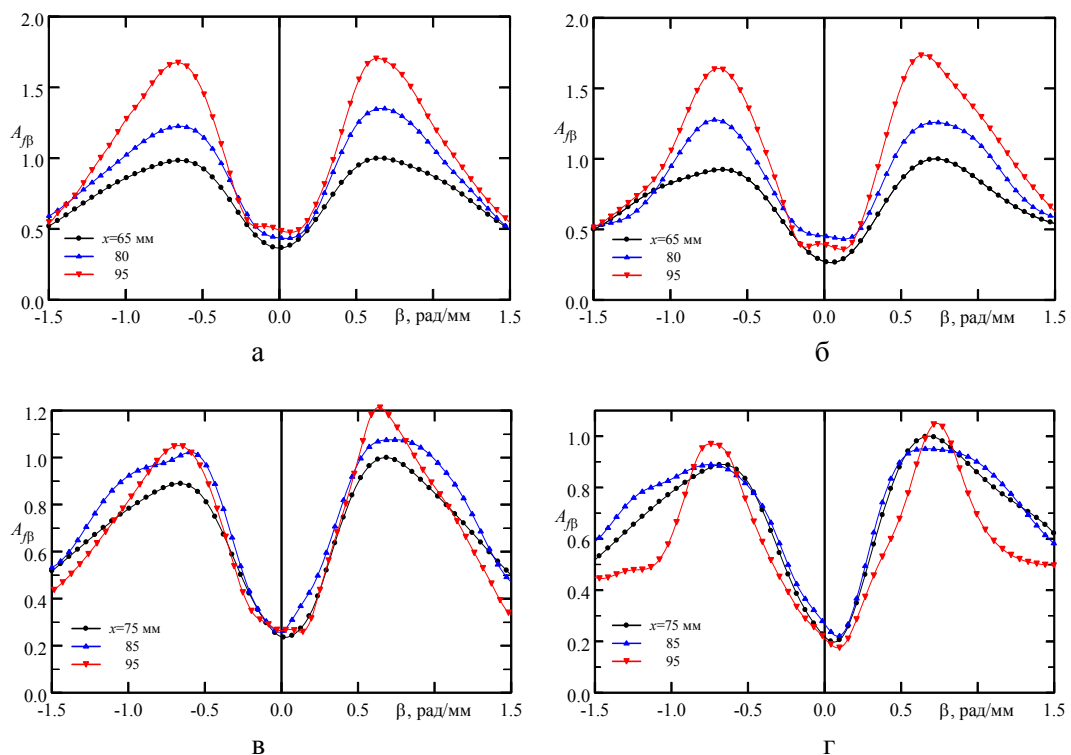


Рис. 3. Измеренные спектры возмущений: нормированные среднеквадратичные амплитуды пульсаций $A_{f\beta}$ в зависимости от трансверсального волнового числа β в различных сечениях по продольной координате $65 \leq x \leq 95$ мм: (а) сплошная вставка; (б–г) проницаемая вставка I ; (б) в отсутствие инъекции ($Q = 0$); (в) $Q = 0,085$ г/см²·мин; (г) $Q = 0,18$ г/см²·мин; $Re_1 = 5 \times 10^6$ м⁻¹, $f = 14$ кГц

Fig. 3. Measured disturbance spectra: normalized RMS fluctuation amplitudes $A_{f\beta}$ versus span-wise wave number β at various streamwise stations $65 \leq x \leq 95$ mm for: (a) solid impermeable insert; (b–d) permeable insert I ; (b) zero injection ($Q = 0$); (c) $Q = 0.085$ g/(cm²·min); (d) $Q = 0.18$ g/(cm²·min); $Re_1 = 5 \times 10^6$ m⁻¹, $f = 14$ kHz

На рис. 4 показано прямое сопоставление измеренных (символы) и рассчитанных (пунктирные линии) локальных скоростей пространственного усиления $-\alpha_i = -\alpha_i(\beta)$ для непроницаемой вставки и проницаемой вставки I при $x = 85$ мм. Экспериментальные скорости нарастания были определены с помощью полиномиальной регрессии измеренных данных для кривых нарастания возмущений $\ln A(x)$ с различными β . Затем инкременты определялись по обычной формуле $-\alpha_i = \partial \ln A(x) / \partial x$. Размерные значения пространственных скоростей роста показаны на рис. 4 как функции трансверсального волнового числа β .

На рис. 4 видна заметная стабилизация возмущений на частоте возбуждения $f = 14$ кГц при закачке тяжелого газа.

Сравнение измеренных и рассчитанных скоростей роста будем проводить вблизи максимумов инкрементов. В окрестности максимумов погрешность их экспериментального определения минимальна, и, как видно из рис. 4, согласование данных теории и эксперимента достаточно хорошее. Следует отметить, что даже вблизи максимумов измеренных спектров возмущений на частоте генератора (рис. 3) амплитуда возмущений массового расхода

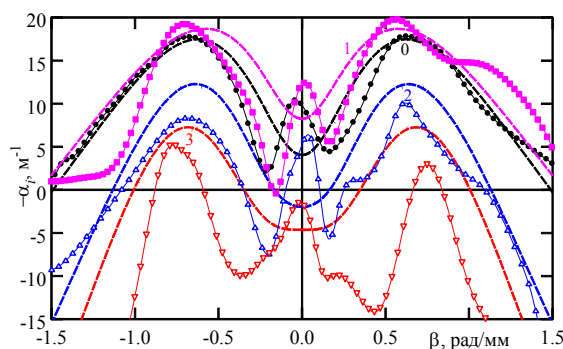


Рис. 4. Скорости пространственного роста возмущений $-\alpha_i$ в зависимости от трансверсального волнового числа β для: (0) непроницаемой вставки; (1–3) пористой вставки 1; (1) в отсутствие инъекции ($Q = 0$); (2) $Q = 0,085 \text{ г/см}^2 \cdot \text{мин}$; (3) $Q = 0,18 \text{ г/см}^2 \cdot \text{мин}$; $Re_1 = 5 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$, $x = 85 \text{ мм}$, $f = 14 \text{ кГц}$. Сравнение данных экспериментов (символы) и теории (пунктирные линии)

Fig. 4. Disturbance spatial amplification rates $-\alpha_i$ versus spanwise wave number β for impermeable solid insert (0); permeable insert 1 (1–3): zero injection ($Q = 0$) (1), $Q = 0.085 \text{ g/(cm}^2 \cdot \text{min)}$ (2), $Q = 0.18 \text{ g/(cm}^2 \cdot \text{min)}$ (3); $Re_1 = 5 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$, $x = 85 \text{ мм}$, $f = 14 \text{ kHz}$. Comparison of measurements (symbols) with theory (dashed lines)

не превышает 1 % от среднего. На рис. 4 можно отметить также начало развития нелинейных процессов, происходящих в пограничном слое, что проявляется в аномальном росте квазидвумерных волн с малыми значениями трансверсального волнового числа $|\beta| < 0,15 \text{ рад/мм}$. Несмотря на существование нелинейности поля возмущений, развитие доминирующих волн с $0,5 < |\beta| < 0,8 \text{ рад/мм}$, происходит в полном согласии с линейной теорией устойчивости.

Влияние инъекции SF_6 на устойчивость пограничного слоя по отношению к контролируемым возмущениям для вставки 2

Мы также провели эксперименты, аналогичные описанным, на модели с перфорированной вставкой 2. Измерения проводились при меньшем значении единичного числа Рейнольдса $Re_1 = 3 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$, на той же частоте возбуждения, $f = 14 \text{ кГц}$. На рис. 5 показаны β -спектры, измеренные в экспериментах с проницаемой вставкой 2 для трех различных величин инъекции тяжелого газа: $Q = 0$ (см. рис. 5, а); $0,05$ (см. рис. 5, б); $0,12 \text{ г/см}^2 \cdot \text{мин}$ (см. рис. 5, в).

Качественно развитие возмущений на вставке 2 на частоте генерации выглядит аналогично представленным выше результатам для пористой вставки 1. Видно, что последовательное увеличение скорости инъекции тяжелого газа Q от нуля (см. рис. 5, а) до $Q = 0,05$ (см. рис. 5, б) и $Q = 0,12 \text{ г/см}^2 \cdot \text{мин}$ (см. рис. 5, в) привело к последовательному уменьшению роста неустойчивых возмущений. Таким образом, вдув тяжелого газа приводит к стабилизации пограничного слоя, по меньшей мере на частоте возбуждения $f = 14 \text{ кГц}$.

На рис. 6 показано прямое сопоставление измеренных (символы) и рассчитанных (пунктирные линии) локальных скоростей пространственного роста возмущений $-\alpha_i = -\alpha_i(\beta)$

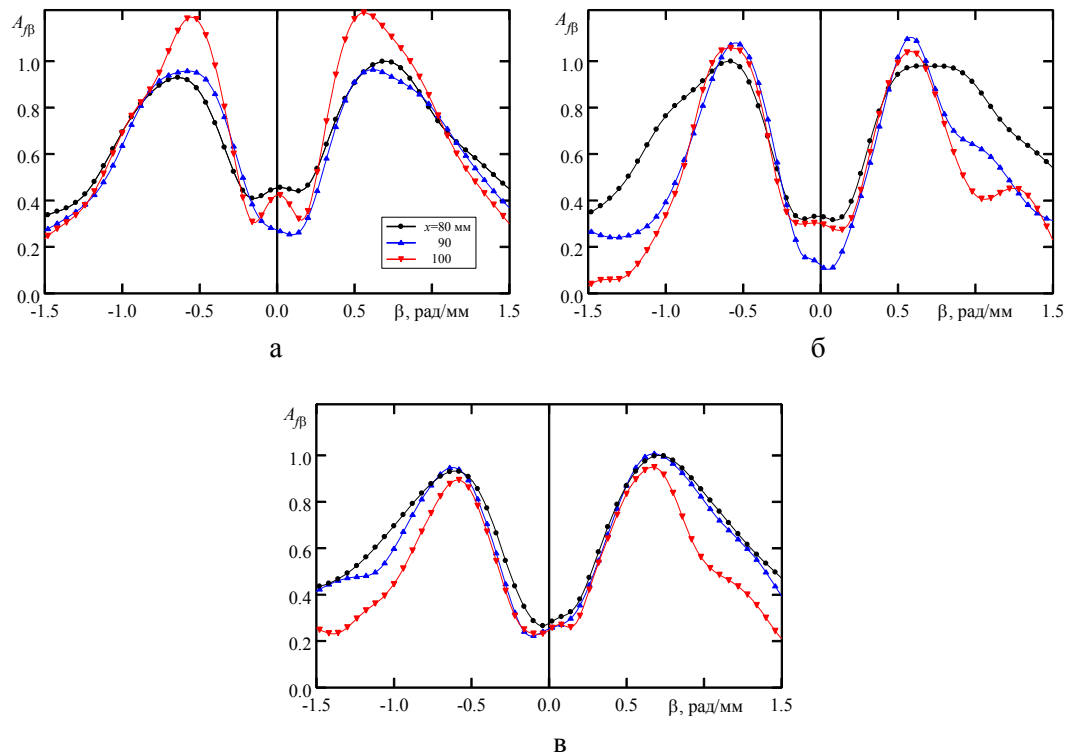


Рис. 5. Измеренные спектры возмущений: нормированные среднеквадратичные амплитуды пульсаций $A_{f\beta}$ в зависимости от трансверсального волнового числа β в различных сечениях по продольной координате $80 \leq x \leq 100$ мм на проницаемой вставке 2; (а) в отсутствие инъекции ($Q = 0$); (б) $Q = 0,05$ г/см²·мин; (в) $Q = 0,12$ г/см²·мин; $Re_1 = 3 \times 10^6$ м⁻¹, $f = 14$ кГц

Fig. 5. Measured disturbance spectra: normalized RMS fluctuation amplitude $A_{f\beta}$ versus span-wise wave number β at various streamwise stations $80 \leq x \leq 100$ mm for permeable insert 2; (a) zero injection ($Q = 0$); (b) $Q = 0.05$ g/(cm²·min); (c) $Q = 0.12$ g/(cm²·min); $Re_1 = 3 \times 10^6$ m⁻¹, $f = 14$ kHz

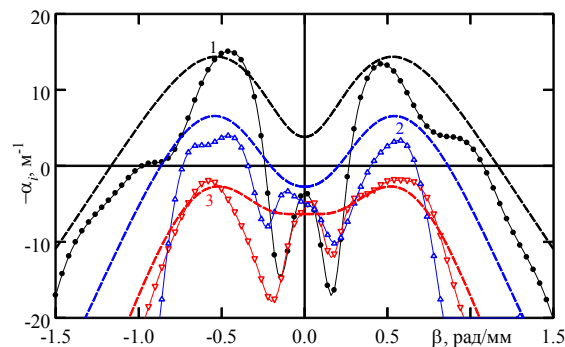


Рис. 6. Скорости пространственного роста возмущений $-\alpha_i$ в зависимости от трансверсального волнового числа β для проницаемой вставки 2; (1) в отсутствие инъекции ($Q = 0$); (2) $Q = 0,05$ г/см²·мин; (3) $Q = 0,12$ г/см²·мин; $Re_1 = 3 \times 10^6$ м⁻¹, $x = 90$ мм, $f = 14$ кГц. Сравнение данных экспериментов (символы) и теории (пунктирные линии)

Fig. 6. Disturbance spatial amplification rates $-\alpha_i$ versus span-wise wave number β for permeable insert 2; (1) zero injection ($Q = 0$); (2) $Q = 0.05$ g/(cm²·min); (3) $Q = 0.12$ g/(cm²·min); $Re_1 = 3 \times 10^6$ m⁻¹, $x = 90$ mm, $f = 14$ kHz. Comparison of measurements (symbols) with theory (dashed lines)

при $x = 90$ мм. Хорошо видна заметная стабилизация возмущений на частоте возбуждения $f = 14$ кГц при закачке тяжелого газа. Видно, что инъекция тяжелого SF_6 при более низком значении единичного числа Рейнольдса $\text{Re}_1 = 3 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$ позволяет полностью стабилизировать (для всех значений трансверсального волнового числа β) возмущения на частоте генератора искусственных возмущений $f = 14$ кГц при $Q = 0,12 \text{ г/см}^2 \cdot \text{мин}$. Следует также отметить достаточно хорошее согласование данных теории и эксперимента для $0,3 < |\beta| < 0,8$ рад/мм при всех рассмотренных параметрах инъекции примеси Q .

Основные выводы

Проведены совместные экспериментальное и теоретическое исследования влияния распределенного вдува тяжелого газа (гексафторида серы, SF_6) в пристенный подслой сверхзвукового (при числе Маха свободного потока $M = 2$) пограничного слоя на его устойчивость по отношению к контролируемым возмущениям. Контролируемые возмущения вводились в пограничный слой модели с помощью точечного гармонического по времени источника возмущений на основе тлеющего разряда.

Впервые в экспериментах с контролируемыми возмущениями получено, что такая инъекция гексафторида серы приводит к стабилизации пограничного слоя. При этом происходит уменьшение скоростей роста возмущений на высоких частотах. Результаты расчетов, проведенных по линейной теории устойчивости, хорошо согласуются с данными экспериментов.

Список литературы

1. Бойко А. В., Грек Г. Р., Довгаль А. В., Козлов В. В. Физические механизмы перехода к турбулентности в открытых течениях. М.; Ижевск: НИЦ РХД, Ин-т компьютерных исследований, 2006. 304 с.
2. Гапонов С. А., Маслов А. А. Развитие возмущений в сжимаемых потоках. Новосибирск: Наука, 1980. 144 с.
3. Lysenko V. I., Gaponov S. A., Smorodsky B. V., Yermolaev Y. G., Kosinov A. D., Semionov N. V. Combined Influence of Coating Permeability and Roughness on Supersonic Boundary Layer Stability and Transition. *J. Fluid Mech.*, 2016, vol. 798, p. 751–773.
4. Leyva I. A., Laurence S., Beierholm A. W. K., Hornung H. G., Wagnild R., Candler G. Transitional delay in hypersonic boundary layers by means of CO_2 /acoustic instability interactions. In: AIAA Paper, 2009, no. 2009-1287.
5. Leyva I. A., Jewell J. S., Laurence S., Hornung H. G., Shepherd J. E. On the impact of injection schemes on transition in hypersonic boundary layers. In: AIAA Paper, 2009, no. 2009-7204.
6. Jewell J. S., Leyva I. A., Parziale N. J., Shepherd J. E. Effect of gas injection on transition in hypervelocity boundary layers. In: Proc. 28th Intern. Symposium on Shock Waves. University of Manchester, July 17–22, 2011. Springer, 2012, p. 735–740.
7. Jewell J. S., Wagnild R. M., Leyva I. A., Candler G. V., Shepherd J. E. Transition within a hypervelocity boundary layer on a 5-degree half-angle cone in air/ CO_2 mixtures. In: AIAA Paper, 2013, no. 2013-0523.
8. Wagnild R. M., Candler G. V., Leyva I. A., Jewell J. S., Hornung H. G. Carbon Dioxide Injection for Hypervelocity Boundary Layer Stability. In: AIAA Paper, 2010, no. 2010-1244.
9. Shen S. F. The Theory of Stability of Compressible Laminar Boundary Layers with Injection of a Foreign Gas. In: NAVORD Report 4467, 1957.
10. Gaponov S. A., Smorodsky B. V. Control of supersonic boundary layer and its stability by means of foreign gas injection through the porous wall. *Intern. J. Theor. & Appl. Mech.*, 2016, vol. 1, p. 97–103.

11. **Lysenko V. I., Maslov A. A.** The effect of cooling on the supersonic boundary layer stability. *J. Fluid Mech.*, 1984, vol. 147, p. 39–52.
12. **Багаев Г. И., Лебига В. А., Приданов В. Г., Черных В. В.** Сверхзвуковая аэродинамическая труба Т-325 с пониженной степенью турбулентности // Аэрофизические исследования. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1972. С. 11–13.
13. **Kosinov A. D., Semionov N. V., Shevelkov S. G.** Investigation of supersonic boundary layer stability and transition using controlled disturbances. In: Proc. Intern. Conf. Meth. Aerophys. Research. ITAM. USSR Acad. Sci. Siberian Branch. Novosibirsk, 1994, pt. 2, p. 159–166.
14. **Lysenko V. I.** Experimental studies of stability and transition in high-speed wakes. *J. Fluid Mech.*, 1999, vol. 392, p. 1–26.
15. **Kosinov A. D., Semionov N. V., Ermolaev Y. G.** Disturbances in the test section of T-325 supersonic wind tunnel. Preprint 6-99. ITAM SB RAS. Novosibirsk, 1999. (in Russ.)
16. **Kosinov A. D., Ermolaev Y. G., Nikolaev N. N., Semionov N. V., Semisynov A. I.** On the measurements of the pulsation in supersonic boundary layer by constant temperature hot-wire anemometer. In: Proc. Int. Conf. on the Methods of Aerophysical Research. Novosibirsk, Parallel, 2007, pt. 5, p. 81–86.
17. **Гиршфелдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р.** Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: ИЛ, 1961.
18. **Гапонов С. А., Петров Г. В.** Устойчивость пограничного слоя неравновесно диссоциирующего газа. Новосибирск: Наука, 2013. 96 с.
19. **Гапонов С. А., Смородский Б. В.** Ламинарный сверхзвуковой пограничный слой бинарной смеси газов // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2016. Т. 11, № 1. С. 5–15.
20. **Дорренс У. Х.** Гиперзвуковые течения вязкого газа. М.: Мир, 1966. 439 с.

References

1. **Boiko A. V., Grek G. R., Dovgal A. V., Kozlov V. V.** Physical mechanisms of transition to turbulence in open flows. Moscow, 2006. (in Russ.)
2. **Gaponov S. A., Maslov A. A.** Development of disturbances in compressible flows. Novosibirsk, Nauka, 1980. (in Russ.)
3. **Lysenko V. I., Gaponov S. A., Smorodsky B. V., Yermolaev Y. G., Kosinov A. D., Semionov N. V.** Combined Influence of Coating Permeability and Roughness on Supersonic Boundary Layer Stability and Transition. *J. Fluid Mech.*, 2016, vol. 798, p. 751–773.
4. **Leyva I. A., Laurence S., Beierholm A. W. K., Hornung H. G., Wagnild R., Candler G.** Transitional delay in hypersonic boundary layers by means of CO₂/acoustic instability interactions. In: AIAA Paper, 2009, no. 2009-1287.
5. **Leyva I. A., Jewell J. S., Laurence S., Hornung H. G., Shepherd J. E.** On the impact of injection schemes on transition in hypersonic boundary layers. In: AIAA Paper, 2009, no. 2009-7204.
6. **Jewell J. S., Leyva I. A., Parziale N. J., Shepherd J. E.** Effect of gas injection on transition in hypervelocity boundary layers. In: Proc. 28th Intern. Symposium on Shock Waves. University of Manchester, July 17–22, 2011. Springer, 2012, p. 735–740.
7. **Jewell J. S., Wagnild R. M., Leyva I. A., Candler G. V., Shepherd J. E.** Transition within a hypervelocity boundary layer on a 5-degree half-angle cone in air/CO₂ mixtures. In: AIAA Paper, 2013, no. 2013-0523.
8. **Wagnild R. M., Candler G. V., Leyva I. A., Jewell J. S., Hornung H. G.** Carbon Dioxide Injection for Hypervelocity Boundary Layer Stability. In: AIAA Paper, 2010, no. 2010-1244.
9. **Shen S. F.** The Theory of Stability of Compressible Laminar Boundary Layers with Injection of a Foreign Gas. In: NAVORD Report 4467, 1957.

10. **Gaponov S. A., Smorodsky B. V.** Control of supersonic boundary layer and its stability by means of foreign gas injection through the porous wall. *Intern. J. Theor. & Appl. Mech.*, 2016, vol. 1, p. 97–103.
11. **Lysenko V. I., Maslov A. A.** The effect of cooling on the supersonic boundary layer stability. *J. Fluid Mech.*, 1984, vol. 147, p. 39–52.
12. **Bagaev G. I., Lebiga V. A., Pridanov V. G., Chernykh V. V.** T-325 low-turbulence supersonic wind tunnel. In: *Aerophysical Research*. Novosibirsk, ITAM, USSR Acad. Sci., 1972, p. 11–13. (in Russ.)
13. **Kosinov A. D., Semionov N. V., Shevelkov S. G.** Investigation of supersonic boundary layer stability and transition using controlled disturbances. In: *Proc. Intern. Conf. Meth. Aerophys. Research*. ITAM. USSR Acad. Sci. Siberian Branch. Novosibirsk, 1994, pt. 2, p. 159–166.
14. **Lysenko V. I.** Experimental studies of stability and transition in high-speed wakes. *J. Fluid Mech.*, 1999, vol. 392, p. 1–26.
15. **Kosinov A. D., Semionov N. V., Ermolaev Y. G.** Disturbances in the test section of T-325 supersonic wind tunnel. Preprint 6-99. ITAM SB RAS. Novosibirsk, 1999. (in Russ.)
16. **Kosinov A. D., Ermolaev Y. G., Nikolaev N. N., Semionov N. V., Semisynov A. I.** On the measurements of the pulsation in supersonic boundary layer by constant temperature hot-wire anemometer. In: *Proc. Int. Conf. on the Methods of Aerophysical Research*. Novosibirsk, Parallel, 2007, pt. 5, p. 81–86.
17. **Hirschfelder J. O., Curtiss C. F., Bird R. B.** *Molecular theory of gases and liquids*. Wiley, 1961.
18. **Gaponov S. A., Petrov G. V.** *Stability of nonequilibrium dissociating gas boundary layer*. Nauka, Novosibirsk, 2013, 96 p. (in Russ.)
19. **Gaponov S. A., Smorodsky B. V.** Laminar supersonic boundary layer of binary gas mixture, *Vestnik NSU. Series: Physics*, vol. 11, no. 1, p. 5–15. (in Russ.)
20. **Dorrance W. H.** *Viscous hypersonic flow*. McGraw-Hill, 1966.

Материал поступил в редколлегию
Received
30.05.2019

Сведения об авторах / Information about the Authors

Лысенко Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича, (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия)

Vladimir I. Lysenko, Doctor of Science (Physics and Mathematics), S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk 630090, Russian Federation)

vl@itam.nsc.ru

Смородский Борис Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича, (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия)

Boris V. Smorodsky, Candidate of Science (Physics and Mathematics), S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk 630090, Russian Federation)

smorodsk@itam.nsc.ru

Ермолаев Юрий Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича, (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия)

Yuri G. Yermolaev, Candidate of Science (Physics and Mathematics), S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk 630090, Russian Federation)

yermol@itam.nsc.ru

Яцких Алексей Анатольевич, аспирант, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича, (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия)

Alex A. Yatskih, Post-Graduate Student, S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk 630090, Russian Federation)

73.yatskikh@gmail.com

Косинов Александр Дмитриевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича, (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия)

Alexander D. Kosinov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), head of laboratory, S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk 630090, Russian Federation)

kosinov@itam.nsc.ru

УДК 532.525.2

DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-39-52

Взаимодействие круглой микроструи воздуха с коаксиальной (спутной) струей воздуха на сверхзвуковой скорости их истечения

**А. С. Тамбовцев^{1,2}, Г. Р. Грек¹, В. В. Козлов^{1,2}, М. В. Литвиненко^{1,2}
Ю. А. Литвиненко¹, А. Г. Шмаков^{3,4}**

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

² *Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия*

³ *Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН
Новосибирск, Россия*

⁴ *Сибирский государственный университет геосистем и технологий
Новосибирск, Россия*

Аннотация

Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей взаимодействия круглой микроструи с коаксиальной (спутной) струей воздуха на сверхзвуковой скорости их истечения. Показано, что взаимодействие круглой и коаксиальной струй воздуха при сверхзвуковом их истечении приводит к возникновению череды мелко- / крупномасштабных и, наоборот, крупно- / мелкомасштабных сверхзвуковых ячеек на результирующей струе с ростом и падением скорости ее истечения соответственно. Установлено, что результат взаимодействия круглой и коаксиальной струй воздуха при сверхзвуковом их истечении не зависит от геометрических параметров выходных отверстий круглого и коаксиального сопел.

Ключевые слова

круглая микроструя воздуха, спутная коаксиальная струя воздуха, взаимодействие струй, до- и сверхзвуковая скорость истечения

Источник финансирования

Работа поддержана грантом РФФИ № 16-19-10330

Для цитирования

Тамбовцев А. С., Грек Г. Р., Козлов В. В., Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Взаимодействие круглой микроструи воздуха с коаксиальной (спутной) струей воздуха на сверхзвуковой скорости их истечения // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 3. С. 39–52. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-39-52

© А. С. Тамбовцев, Г. Р. Грек, В. В. Козлов, М. В. Литвиненко,
Ю. А. Литвиненко, А. Г. Шмаков, 2019

ISSN 2541-9447
Сибирский физический журнал. 2019. Том 14, № 3
Siberian Journal of Physics, 2019, vol. 14, no. 3

Air Round Microjet Interaction with Coaxial Air Jet for Supersonic Speed Jets Efflux

A. S. Tambovtsev^{1,2}, G. R. Grek¹, V. V. Kozlov^{1,3}, M. V. Litvinenko^{1,2}
Yu. A. Litvinenko¹, A. G. Shmakov^{3,4}

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

² Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

³ Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

⁴ Siberian State University of Geosystem and Technology
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

Results of experimental studies of the round hydrogen microjet interaction with a coaxial air for supersonic speed jets efflux are presented in this work. It is shown that interaction of round and coaxial air jets at their supersonic efflux leads to appearance of a train small/large-scale and, on the contrary, large/small-scale supersonic cells on a resultant jet with growth and reduction of speed of its efflux, respectively. It is found that the result of the round and coaxial air jets interaction at their supersonic efflux does not depend on geometrical parameters of a round and coaxial exit nozzle.

Keywords

round air microjet, coaxial air jet, interaction of jets, subsonic and supersonic jet efflux

Funding

This work was supported by the Russian Science Foundation, project number 16-19-10330

For citation

Tambovtsev A. S., Grek G. R., Kozlov V. V., Litvinenko M. V., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Air Round Microjet Interaction with Coaxial Air Jet for Supersonic Speed Jets Efflux. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 3, p. 39–52. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-39-52

Введение

Экспериментальные исследования диффузионного горения круглой микроструи водорода [1–5] показали наличие различных сценариев протекания данного процесса в зависимости от нарастания скорости истечения микроструи в диапазоне диаметров выходного отверстия от 0,25 до 1 мм. Обнаружены следующие сценарии диффузионного горения круглой микроструи водорода.

1. Горение чисто ламинарной микроструи с наличием ламинарного пламени большой дальности (U₀ ≤ 150 м/с).

2. Возникновение сферической области «перетяжки» пламени с наличием в ней ламинарной микроструи и ламинарного пламени с турбулизацией микроструи и пламени при преодолении ламинарной микроструей узкой области градиента плотности газа (U₀ > 150 м/с).

3. Отрыв турбулентного пламени от области перетяжки пламени (U₀ > 200 м/с).

4. Прекращение горения турбулентного участка микроструи при сохранении горения в области перетяжки пламени. Причем в данной ситуации горение в области перетяжки пламени сохраняется, вплоть до трансзвуковых скоростей ее истечения, однако при наличии такого явления, как «запирание сопла» [5; 6] (U₀ > 331 м/с).

5. Прекращение горения микроструи (U₀ ≈ 331 м/с).

Аналогичные сценарии горения были обнаружены и при диффузионном горении плоской микроструи водорода [2; 7]. Следует заметить, что запирание сопла происходило при достижении скорости истечения микроструи водорода близкой к скорости звука в воздухе (U₀ ≈

≈ 331 м/с). Стабилизация горения как круглой, так и плоской микроструи обеспечивалась в данной ситуации наличием области перетяжки пламени и существованием в ней горения.

Тем не менее нам не удалось выйти на сверхзвуковое диффузионное горение микроструи водорода по причине заклинивания сопла областью перетяжки пламени, которая приводила к нагреву выхода микросопла и предотвращала отрыв пламени от его среза. Одной из характеристик сверхзвукового горения струйного течения, наряду с рядом других, является наличие сверхзвуковых ячеек как в струе, так и в пламени, но в ситуации пламени, оторванного от среза сопла. Это детально продемонстрировано в работах [6; 8] при поджигании круглой микроструи водорода вдали от среза сопла. В данной ситуации можно было наблюдать наличие сверхзвуковых ячеек как в струе, так и в оторвавшемся от среза сопла пламени. Результаты экспериментальных и численных исследований горения круглых струй водорода при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях их истечения детально представлены в работах [9–11].

С другой стороны, важно изучить влияние различных газообразных добавок в микрострую водорода на режимы ее горения. В работе [12] представлены результаты экспериментальных исследований диффузионного горения смесей водорода с метаном, а также с гелием или азотом в круглой микроструе. Показано, что механизм и характеристики развития микроструи и пламени при диффузионном горении смесей водорода с одним из газов – метаном, гелием или азотом, связаны с образованием области перетяжки пламени, как и в ситуации диффузионного горения микроструи чистого водорода. Установлено, что область перетяжки пламени имеет сферическую форму, где идет процесс смешения ламинарной струи смеси с окружающим воздухом и их горение. При преодолении узкой области мощного градиента плотности на границе сферической области ламинарная микроструя и пламя мгновенно турбулизуются. Обнаружено, что процесс диффузионного горения смеси водород / метан в круглой микроструе сопровождается поэтапными стадиями отрыва пламени при сохранении горения в области перетяжки пламени, срыва пламени при сохранении горения в области перетяжки пламени и, наконец, прекращения горения, что коррелирует с процессом горения аналогичной микроструи чистого водорода. Установлено, что все перечисленные стадии горения смеси водород / метан реализуются в диапазоне значительно меньших скоростей истечения микроструи ($200\div 500$ м/с), чем в аналогичной ситуации горения микроструи чистого водорода ($600\div 800$ м/с). Обнаружено повышение устойчивости горения микроструи смеси водород / метан по сравнению с неустойчивым горением микроструи чистого метана, что говорит о возможности за счет добавок водорода расширить диапазон условий (скоростей потока газов) устойчивого турбулентного горения метана и других углеводородов. Показано, что при диффузионном горении смеси водорода с метаном, гелием или азотом в круглой микроструе для стабилизации горения с ростом скорости истечения микроструи необходимо увеличивать долю водорода (или уменьшать долю примеси) в смеси газов.

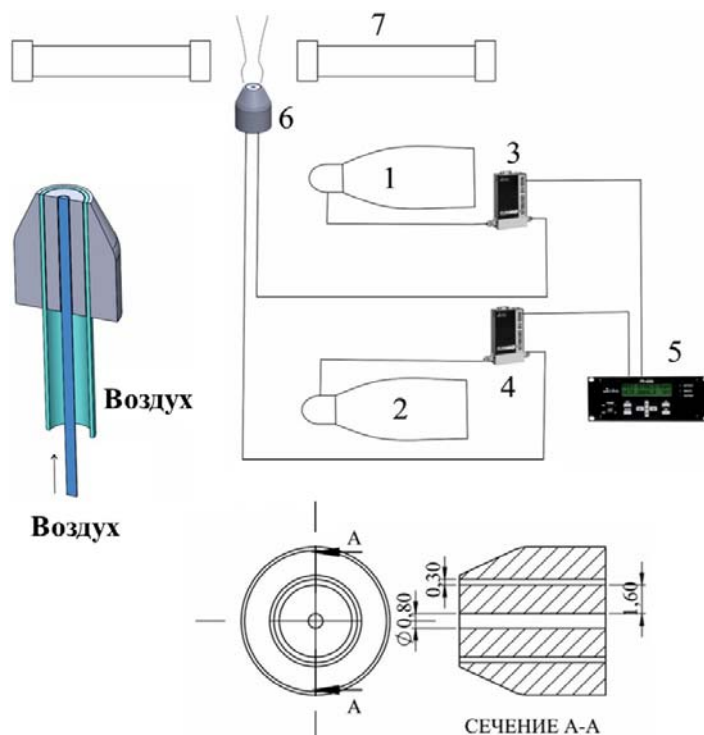
В работе [13] рассмотрены особенности горения микроструи смеси водорода не с инертными (гелий, азот) и горючим (углеводородный газ метан) газами, как в вышеизложенной ситуации, а с хорошо известным окислителем (кислородом). Показано, что добавление кислорода приводит к снижению диапазона скоростей существования горения микроструи по сравнению с аналогичным параметром при диффузионном горении чистого водорода. Установлено, что с ростом скорости истечения микроструи прекращение ее горения связано с уменьшением доли кислорода в смеси. Обнаружено, что сферическая форма области перетяжки пламени трансформируется в узкую и вытянутую область ламинарного пламени цилиндрической формы, процесс утонения (уменьшения поперечного сечения области перетяжки пламени) которой растет с ростом скорости истечения микроструи. Следует заметить, что исследования горения микроструи смеси водорода с различными газами проведено в условиях их смешения до введения смеси в сопловой аппарат.

Исследованию коаксиальных струй и особенно их взаимодействию посвящено значительно меньше работ, особенно экспериментальных. В теоретической работе [14] показано разви-

тие коаксиальной струи на до- и сверхзвуковой скорости и численно смоделировано наличие сверхзвуковых ячеек при сверхзвуковом истечении коаксиальной щелевой струи. Цель настоящей работы состоит в экспериментальных исследованиях особенностей развития и взаимодействия круглой микроструи воздуха и коаксиальной (спутной) струи воздуха на сверхзвуковой скорости их истечения.

Экспериментальное оборудование и процедура исследования

На рис. 1, 2 представлены схемы двух различных экспериментов.



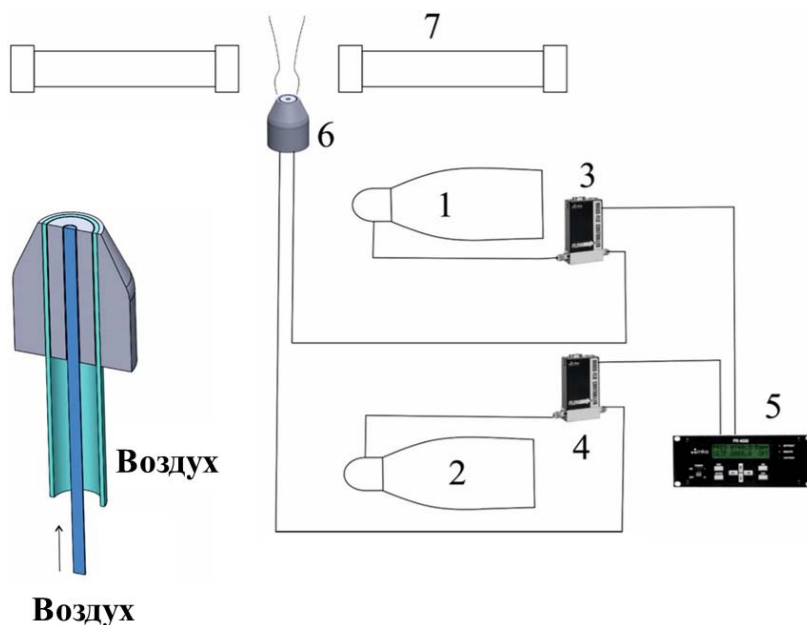
S_1 – площадь круглого отверстия ввода воздуха
 S_2 – площадь коаксиальной щели ввода спутной струи воздуха
 $S_1 = 0,005 \text{ см}^2$
 $S_2 = 0,04 \text{ см}^2$

Рис. 1. Схема эксперимента № 1 (сопло № 0): 1, 2 – баллоны со сжатым воздухом; 3, 4 – клапаны расходомера; 5 – контроллер расходомера; 6 – сопло горелки; 7 – теневой прибор ИАБ-451. Внизу представлено сопло в разрезе

Fig. 1. Experimental sketch: 1, 2 – air flow; 3, 4 – flow-meter valve; 5 – flow-meter controller; 6 – nozzle section; 7 – schlieren device IAB-451. Cross-section of the nozzle is shown in the bottom

В сопловое устройство через блок управления электромагнитными клапанами типа 179В фирмы *MKS Instruments* объемного расхода газа подавался сжатый атмосферный воздух через центральное круглое отверстие горелки и сжатый воздух через коаксиальную щель горелки. Установка объемного расхода газов осуществлялась блоком управления, а показания расхода газов регистрировались электронным табло расходомеров. Процедура проведения исследований состояла из видеосъемки непосредственно процесса развития и взаимодействия микроструи чистого воздуха в отсутствие спутной струи воздуха и при ее наличии,

а также видеосъемки теневой картины данного процесса (теневой метод Теплера на базе ИАБ-451) с помощью цифровой видеокамеры *Olympus SZ-17* с разрешением 12 МП.



4 СОПЛА: $S_1 - S_4$ - площадь круглого отверстия ввода воздуха $U_2 > U_1 > U_3 > U_4$

4 СОПЛА: $S_1 - S_4$ - площадь коаксиальной щели ввода спутной струи воздуха

$$S_1 - S_4 = 0,008; 0,005; 0,011; 0,0038 \text{ см}^2$$

$$S_1 - S_4 = 0,009; 0,008; 0,009; 0,008 \text{ см}^2$$

Рис. 2. Схема эксперимента № 2 (сопла № 1, 2, 3, 4): взаимодействие круглой микроструи и коаксиальной струи воздуха при их сверхзвуковом истечении (четыре типа сопел)

Fig. 2. Scheme of experiment No. 2 (nozzles No. 1, 2, 3, 4): interaction of round microjet and coaxial air jet at supersonic flow velocities (four types of nozzles)

Развитие и взаимодействие круглой микроструи чистого воздуха и при наличии спутной струи воздуха исследовалось при различных скоростях истечения как микроструи водорода, так и спутной струи воздуха. Объемный расход газов Q (см³/с) измерялся с помощью прецизионных расходомеров MKS Instruments (США) с точностью $\pm 0,7\%$. Скорость истечения микроструи определялась по формуле U_0 , м/с = Q , см³/с / S , см², где S – площадь поперечного сечения круглого отверстия для водорода и коаксиальной щели для спутной струи воздуха на выходе из горелки. Следует заметить, что определение скорости истечения газа из микросопла на сверхзвуковой скорости таким способом не совсем корректно, поскольку не учитывается целый ряд параметров, в том числе сжимаемость газа. В данной ситуации был использован еще один метод определения скорости истечения микроструи по разности давления (ΔP , кГс/м²) на входе ($P_{\text{редуктор}}$) и выходе ($P_{\text{атмосфера}}$) воздуха из микросопла ($\Delta P = P_{\text{редуктор}} - P_{\text{атмосфера}}$). При этом U_0 , м/с = $\sqrt{(2\Delta P / \rho)}$, где ρ , кГ/м³ – плотность воздуха.

Результаты экспериментов

Сценарии взаимодействия круглой микроструи и спутной (коаксиальной) струи воздуха на сверхзвуковой скорости их истечения

Сценарий взаимодействия круглой микроструи и спутной (коаксиальной) струи воздуха на сверхзвуковой скорости их истечения (эксперимент № 1)

Схема эксперимента № 1 представлена на рис. 1. Круглая и coaxиальная (спутная) микроструи воздуха вводились в затопленное (воздушное) пространство через центральное отверстие сопла горелки ($d = 0,8$ мм, $S = 0,04$ см²) и coaxиальную щель ($S = 0,005$ см²) соответственно. В данном случае можно ясно наблюдать наличие сверхзвуковых ячеек в обоих случаях при раздельном введении микроструй на сверхзвуковой (по воздуху, $U_0 = 331$ м/с) скорости их истечения (рис. 3).

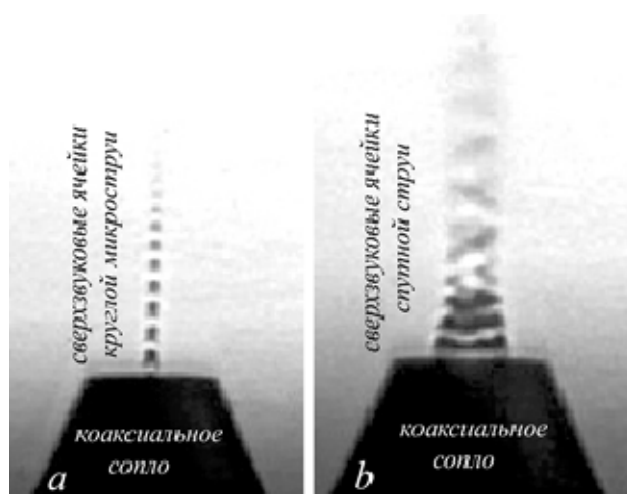


Рис. 3. Теневые картины сверхзвукового истечения круглой (а) и coaxиальной (б) микроструи воздуха при наличии сверхзвуковых ячеек при скорости истечения $U_0 > 340$ м/с)

Fig. 3. Shadow images of the supersonic flow of round (a) and coaxial (b) micro-jet air at the presence of supersonic cells at the flow velocity of $U_0 > 340$ m/s)

Теневые картины развития круглой и coaxиальной (спутной) струй воздуха при сверхзвуковом их истечении и при наличии сверхзвуковых ячеек с ростом скорости истечения, $\Delta P > 12$ атм., $U_0 = \sqrt{(2\Delta P/\rho)} > 320$ м/с показаны на рис. 4. Видно, что с ростом скорости истечения струи можно наблюдать появление крупномасштабных сверхзвуковых ячеек на спутной струе (см. рис. 4). Теневые картины взаимодействия круглой и coaxиальной струй воздуха при сверхзвуковом их истечении и при наличии сверхзвуковых ячеек с ростом скорости истечения (рис. 5) демонстрируют появление крупномасштабных сверхзвуковых ячеек на спутной струе и исчезновение структур на круглой микроструе (см. рис. 5, c–h). С другой стороны, теневые картины взаимодействия круглой и coaxиальной струй воздуха при сверхзвуковом их истечении и при наличии сверхзвуковых ячеек с уменьшением скорости истечения (рис. 6) демонстрируют наличие крупномасштабные сверхзвуковых ячеек на спутной струе (см. рис. 6, a–c) и мелкомасштабных сверхзвуковых ячеек, по-видимому, на круглой микроструе, хотя вблизи среза сопла отчетливо видна конусообразная структура спутной струи (рис. 6, d–g).



Рис. 4. Теневые картины сверхзвукового истечения коаксиальной (спутной) струи воздуха при наличии сверхзвуковых ячеек с ростом скорости истечения U_0 (a, b, c) = 290, 315, 350 м/с)

Fig. 4. Shadow images of the supersonic flow of coaxial air jet in the presence of supersonic cells with an increase in the flow rate of U_0 (a, b, c) = 290, 315, 350 m/s)

Взаимодействие струй с ростом скорости их истечения (сопло № 0)



Рис. 5. Теневые картины взаимодействия круглой и коаксиальной струй воздуха при сверхзвуковом их истечении и при наличии сверхзвуковых ячеек в зависимости от роста скорости истечения, U_0 (a) = 320 м/с (круглая микро-струя), U_0 ($b-h$) = $\sqrt{(2\Delta P/\rho)} > 320$ м/с

Fig. 5. Shadow images of the interaction of round and coaxial air jets at their supersonic efflux and at the presence of supersonic cells depending on the flow rate growth, U_0 (a) = 320 m/s (round microjet), U_0 ($b-h$) = $\sqrt{(2\Delta P/\rho)} > 320$ m/s

Взаимодействие струй с падением скорости их истечения (сопло № 0)

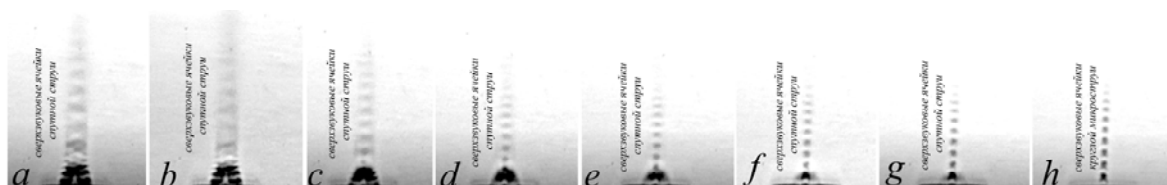


Рис. 6. Теневые картины взаимодействия круглой и коаксиальной струй воздуха при сверхзвуковом их истечении и при наличии сверхзвуковых ячеек в зависимости от уменьшения скорости истечения, U_0 ($a-g$) = $\sqrt{(2\Delta P/\rho)} < 500$ м/с, U_0 (h) = 320 м/с (круглая микроструя)

Fig. 6. Shadow images of the interaction of round and coaxial air jets at their supersonic efflux and at the presence of supersonic cells depending on the decrease in the flow velocity, U_0 ($a-g$) = $\sqrt{(2\Delta P/\rho)} < 500$ m/s, U_0 (h) = 320 m/s (round microjet)

*Сценарий взаимодействия круглой микроструи
и спутной (коаксиальной) струи воздуха на сверхзвуковой скорости их истечения
(эксперимент № 2)*

Схема эксперимента № 2 представлена на рис. 2. Круглая и коаксиальная (спутная) микроструи воздуха вводились в затопленное (воздушное) пространство с помощью четырех различных сопел горелки. Центральное отверстие сопла горелки: $d_1 - d_4 = 1; 0,8; 1,2; 0,7$ мм, $S_1 - S_4 = 0,008; 0,005; 0,011; 0,0038$ см²; коаксиальная щель: $S_1 - S_4 = 0,009; 0,008; 0,009; 0,008$ см². Теневые картины круглой (рис. 7) и коаксиальной (рис. 8) микроструй воздуха при их сверхзвуковом истечении в зависимости от площади выходного сопла и щели, при наличии сверхзвуковых ячеек, демонстрируют изменения масштаба и периодичности структур в зависимости от параметров сопел горелок. Теневые картины взаимодействия круглой и коаксиальной струй воздуха при сверхзвуковом их истечении и при наличии сверхзвуковых ячеек с ростом скорости истечения, $U_0 = \sqrt{(2\Delta P/\rho)} > 125-600$ м/с показаны на рис. 9–12. Анализ результатов исследований показывает, что независимо от геометрических параметров сопел горелок можно наблюдать наличие четко выделяемых в коническом пространстве сверхзвуковых ячеек вблизи выходной щели коаксиальной струи и ослабление их четкости далее вниз по потоку с ростом скорости истечения струй.

Микроструя (сопла № 1, 2, 3, 4, слева направо)

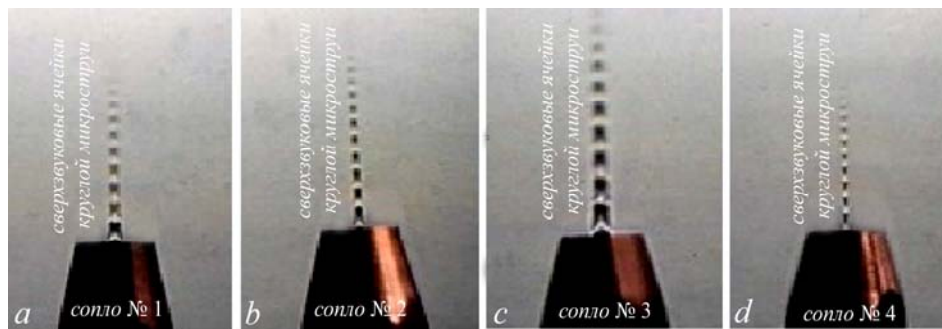


Рис. 7. Теневые картины круглой микроструи воздуха при ее сверхзвуковом истечении в зависимости от площади выходного сопла и при наличии сверхзвуковых ячеек ($S_1 - S_4 = 0,008; 0,005; 0,011; 0,0038$ см²; $U_0 = S_4 > S_2 > S_1 > S_3$)

Fig. 7. Shadow images of round micro-jet air at their supersonic efflux depending on the area of the outlet nozzle and the presence of supersonic cells ($S_1 - S_4 = 0,008; 0,005; 0,011; 0,0038$ см²; $U_0 = S_4 > S_2 > S_1 > S_3$)

Коаксиальная струя (сопла № 1, 2, 3, 4, слева направо)

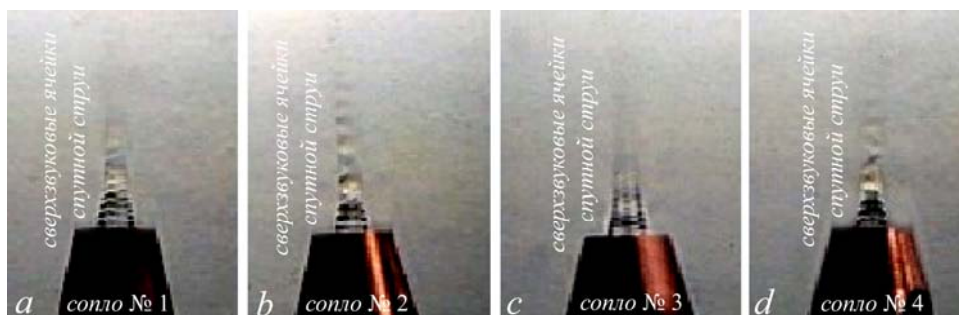


Рис. 8. Теневые картины коаксиальной струи воздуха при ее сверхзвуковом истечении в зависимости от площади выходного сопла и при наличии сверхзвуковых ячеек ($S_1 - S_4 = 0,009; 0,008; 0,009; 0,008$ см²; $U_0 \approx S_1 = S_3; S_2 = S_4$)

Fig. 8. Shadow pictures of the coaxial air jet at their supersonic efflux depending on the area of the outlet nozzle and the presence of supersonic cells $S_1 - S_4 = 0,009; 0,008; 0,009; 0,008$ см²; $U_0 \approx S_1 = S_3; S_2 = S_4$)

Взаимодействие струй с ростом скорости (сопло № 1)

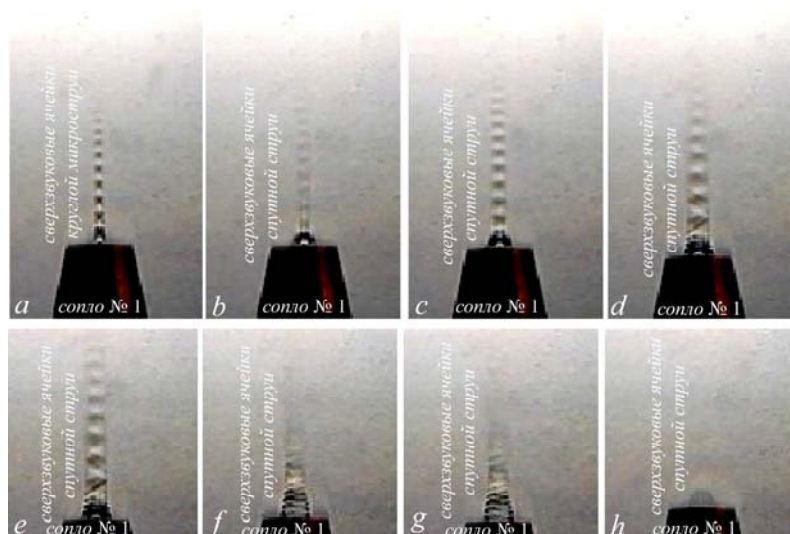


Рис. 9. Теневые картины взаимодействия коаксиальной и круглой струи воздуха при их сверхзвуковом истечении из выходного сопла № 1 и при наличии сверхзвуковых ячеек, $U_0(a) = \sqrt{(2\Delta P/\rho)} = 320$ м/с, (круглая микроструя), $U_0(b-h) > 320$ м/с (коаксиальная струя)

Fig. 9. Shadow images of interaction of coaxial and round air jet at their supersonic efflux from the nozzle No.1 and at presence of supersonic cells, $U_0(a) = \sqrt{(2\Delta P/\rho)} = 320$ м/с, (round microjet), $U_0(b-h) > 320$ м/с (coaxial jet)

Взаимодействие струй с ростом скорости (сопло № 3)



Рис. 10. Теневые картины взаимодействия коаксиальной и круглой струи воздуха при их сверхзвуковом истечении из выходного сопла № 2 и при наличии сверхзвуковых ячеек, $U_0(a, g) = \sqrt{(2\Delta P/\rho)} = 320$ м/с, (круглая микроструя), $U_0(b-f) > 320$ м/с (коаксиальная струя)

Fig. 10. Shadow images of the interaction of coaxial and round air jet at their supersonic efflux from the nozzle No. 2 and supersonic cells, $U_0(a, g) = \sqrt{(2\Delta P/\rho)} = 320$ м/с (round microjet), $U_0(b-f) > 320$ м/с (coaxial jet)

Взаимодействие струй с ростом скорости (сопло № 3)

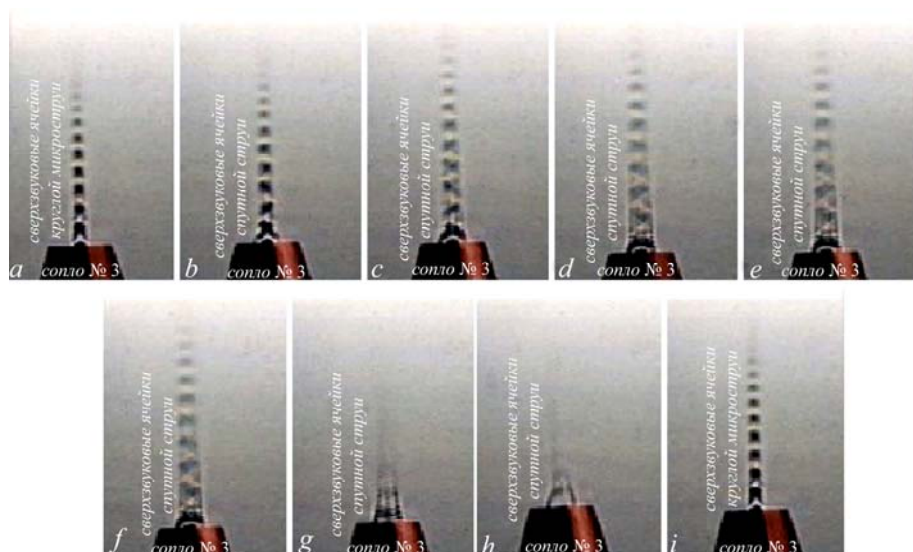


Рис. 11. Теневые картины взаимодействия коаксиальной и круглой струи воздуха при их сверхзвуковом истечении из выходного сопла № 3 и при наличии сверхзвуковых ячеек, $U_0(a, i) = \sqrt{(2\Delta P/\rho)} = 320$ м/с (круглая микроструя), $U_0(b-h) > 320$ м/с (коаксиальная струя)

Fig. 11. Shadow pictures of the interaction of coaxial and round air jet at their supersonic efflux from the outlet nozzle No. 3 and at the presence of supersonic cells, $U_0(a, i) = \sqrt{(2\Delta P/\rho)} = 320$ m/s (round microjet), $U_0(b-h) > 320$ m/s (coaxial jet)

Взаимодействие струй с ростом скорости (сопло № 4)

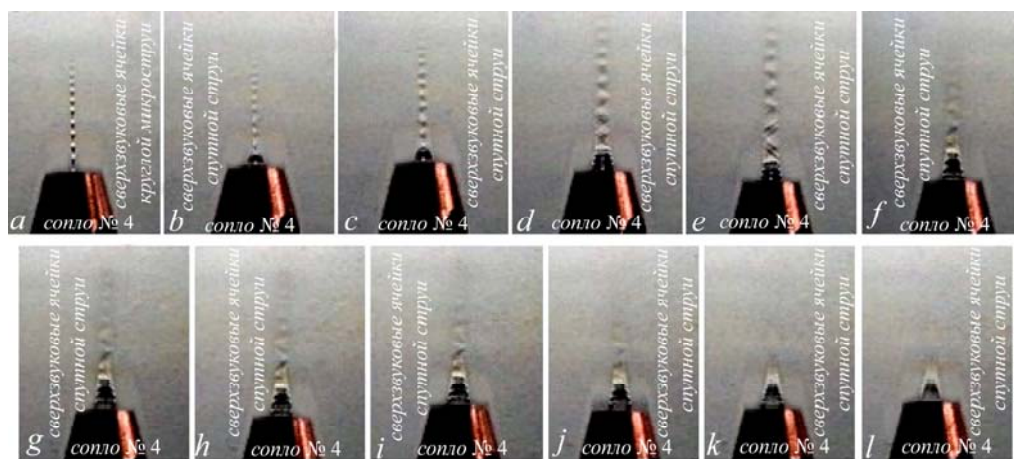


Рис. 12. Теневые картины взаимодействия коаксиальной и круглой струи воздуха при их сверхзвуковом истечении из выходного сопла № 4 и при наличии сверхзвуковых ячеек, $U_0(a) = \sqrt{(2\Delta P/\rho)} = 320$ м/с (круглая микроструя), $U_0(b-l) > 320$ м/с (коаксиальная струя).

Fig. 12. Shadow pictures of the interaction of coaxial and round air jet at their supersonic flow from the outlet nozzle No. 4 and at the presence of supersonic cells, $U_0(a) = \sqrt{(2\Delta P/\rho)} = 320$ m/s (round microjet), $U_0(b-l) > 320$ m/s (coaxial jet)

Заключение

Показано, что взаимодействие круглой и коаксиальной струй воздуха при сверхзвуковом их истечении приводит к возникновению череды мелко- / крупномасштабных и, наоборот, крупно- / мелкомасштабных сверхзвуковых ячеек на результирующей струе с ростом и падением скорости ее истечения соответственно. Установлено, что представленный взаимодействие круглой и коаксиальной струй воздуха при сверхзвуковом их истечении не зависит от геометрических параметров выходных отверстий круглого и коаксиального сопла.

Список литературы

1. Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А. Различные режимы диффузионного горения круглой струи водорода в воздухе // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, № 2. С. 27–41.
2. Литвиненко Ю. А., Грек Г. Р., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Шмаков А. Г. Структура присоединенного диффузионного пламени микроструи водорода, истекающей из щелевого сопла // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, № 2. С. 52–66.
3. Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов Г. В., Литвиненко М. В. Диффузионное горение водорода (круглое скошенное сопло) // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, № 2. С. 42–51.
4. Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Combustion of a high-velocity hydrogen microjet effluxing in air. *Doklady Physics*, 2016, vol. 61, iss. 9, p. 457–462.
5. Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А. Экспериментальное исследование диффузионного горения высокоскоростной круглой микроструи водорода. Часть 1. Присоединенное пламя, дозвуковое течение // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 2. С. 28–45.
6. Kozlov V. V., Grek G. R., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Experimental study on diffusion combustion of high-speed hydrogen round microjets. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, iss. 1, p. 457–468.
7. Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Features of diffusion combustion of hydrogen in the round and plane high-speed microjets (Part II). *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, vol. 41, iss. 44, p. 20240–20249.
8. Козлов В. В., Грек Г. Р., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Экспериментальное исследование диффузионного горения круглой микроструи водорода при ее зажигании вдали от среза сопла // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 3. С. 62–73.
9. Kalghatgi G. T. Lift-off heights and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air. *Combust. Sci. Technol.*, 1984, vol. 41, iss. 1–2, p. 14–29.
10. Аннушкин Ю. М., Свердлов Е. Д. Исследование устойчивости диффузионных затопленных пламен при дозвуковом и нерасчетном сверхзвуковом истечениях газообразных топлив // Химическая физика. Водород, параметры горения и взрыва. М.: Физматлит, 2008. С. 53–63.
11. Shentsov V., Sakatsume R., Makarov D., Takeno K., Molkov V. Lift-off and blow-out of under-expanded jets: experiments versus simulations. In: 8th International Seminar on Fire and Explosion. Hefei, China, 2016.
12. Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В., Литвиненко Ю. А., Коробейничев О. П. Диффузионное горение круглой микроструи смесей водорода с метаном, гелием и азотом // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2016, Т. 11, № 2. С. 56–76.

13. **Шмаков А. Г., Вихорев В. В., Грек Г. Р., Козлов В. В., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А.** Горение круглой микроструи смеси водорода с кислородом, истекающей из прямолинейного микросопла // Сибирский физический журнал. 2018. Т. 13, № 1. С. 54–67.
14. **Guariglia D., Schram C.** Numerical Simulations of a Subsonic / Supersonic Coaxial Jet for an Efficient Design of Experimental Setup. In: Proceedings of the 2014 COMSOL Conference. Cambridge, 2014.

References

1. **Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov V. V., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A.** Different Conditions of the Round Hydrogen Jets Diffusion Combustion in Air. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10, no. 2, p. 27–41. (in Russ.)
2. **Litvinenko Yu. A., Grek G. R., Kozlov V. V., Korobeinichev O. P., Shmakov A. G.** Structure of the Attached Flame during Diffusion Hydrogen Microjet Combustion (Slotted Nozzle). *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10, no. 2, p. 52–66. (in Russ.)
3. **Grek G. R., Katasonov M. M., Kozlov V. V., Litvinenko Yu. A.** Diffusion Hydrogen Microjet Combustion (Round Bevelled Nozzle). *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10, no. 2, p. 42–51. (in Russ.)
4. **Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Combustion of a high-velocity hydrogen microjet effluxing in air. *Doklady Physics*, 2016, vol. 61, iss. 9, p. 457–462.
5. **Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov V. V., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A.** Experimental Study of the Diffusion Combustion of a High-Speed Round Hydrogen Microjet. Part 1. Attached Flame, Subsonic Flow. *Siberian Journal of Physics*, 2017, vol. 12, no. 2, p. 28–45. (in Russ.)
6. **Kozlov V. V., Grek G. R., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Experimental study on diffusion combustion of high-speed hydrogen round microjets. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, iss. 1, p. 457–468.
7. **Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Features of diffusion combustion of hydrogen in the round and plane high-speed microjets (Part II). *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, vol. 41, iss. 44, p. 20240–20249.
8. **Kozlov V. V., Grek G. R., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Experimental Study of the Diffusion Combustion of a Round Hydrogen Microjet at Its Ignition Far from the Nozzle Exit. *Siberian Journal of Physics*, 2017, vol. 12, no. 3, p. 62–73. (in Russ.)
9. **Kalghatgi G. T.** Lift-off heights and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air. *Combust. Sci. Technol.*, 1984, vol. 41, iss. 1–2, p. 14–29.
10. **Annushkin Yu. M., Sverdlov E. D.** Investigation of the stability of diffusion flooding flame at subsonic and supersonic off-design nozzle at flowing of gaseous fuels. In: Chemical Physics. Hydrogen, combustion and explosion parameters. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, p. 53–63. (in Russ.)
11. **Shentsov V., Sakatsume R., Makarov D., Takeno K., Molkov V.** Lift-off and blow-out of under-expanded jets: experiments versus simulations. In: 8th International Seminar on Fire and Explosion. Hefei, China, 2016.
12. **Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov V. V., Litvinenko Yu. A., Korobeinichev O. P.** Diffusion Combustion of the Round Microjet Mixture of Hydrogen with Metane, Helium and Nitrogen. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2016, vol. 11, no. 2, p. 56–76. (in Russ.)
13. **Shmakov A. G., Vikhorev V. V., Grek G. R., Kozlov V. V., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A.** Combustion of the Round Microjet Premixed Hydrogen with Oxygen Efflux from the Linear Channel. *Siberian Journal of Physics*, 2018, vol. 13, no. 1, p. 54–67. (in Russ.)

14. **Guariglia D., Schram C.** Numerical Simulations of a Subsonic / Supersonic Coaxial Jet for an Efficient Design of Experimental Setup. In: Proceedings of the 2014 COMSOL Conference. Cambridge, 2014.

Материал поступил в редакцию

Received

29.07.2019

Сведения об авторах / Information about the Authors

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

Alexander S. Tambovtsev, Laboratory Assistant, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
alsetams@gmail.com

Грек Генрих Рувимович, 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)

Genrich R. Grek, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
grek@itam.nsc.ru

Козлов Виктор Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, 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)

Viktor V. Kozlov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, 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)
kozlov@itam.nsc.ru

Литвиненко Мария Викторовна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия); ученый секретарь физического факультета, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия)

Maria V. Litvinenko, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Scientific Secretary Faculty of Physics, Novosibirsk State University (2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
litmar@itam.nsc.ru

Литвиненко Юрий Алексеевич, 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)

Yuriy A. Litvinenko, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Senior Scientist, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
litur@itam.nsc.ru

Шмаков Андрей Геннадиевич, кандидат химических наук, заведующий лабораторией, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН (ул. Институтская, 3, Новосибирск, 630090, Россия); доцент, Сибирский государственный университет геосистем и технологий (ул. Плахотного, 10, Новосибирск, 630108, Россия)

Andrey G. Shmakov, Doctor of Science (Chemistry), Head of Laboratory, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS (3 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Assistant Professor, Siberian State University of Geosystem and Technology (10 Plakhotny Str., Novosibirsk, 630108, Russian Federation)
shmakov@kinetics.nsc.ru

Взаимодействие круглой микроструи воздуха с коаксиальной (спутной) струей водорода при его горении на сверхзвуковой скорости их истечения

**В. В. Козлов^{1,2}, Г. Р. Грек¹, М. В. Литвиненко^{1,2}
Ю. А. Литвиненко¹, А. С. Тамбовцев^{1,2}, А. Г. Шмаков^{3,4}**

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

² *Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия*

³ *Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН
Новосибирск, Россия*

⁴ *Сибирский государственный университет геосистем и технологий
Новосибирск, Россия*

Аннотация

Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей взаимодействия круглой микроструи воздуха с коаксиальной (спутной) струей водорода при его горении на сверхзвуковой скорости их истечения. Обнаружено, что горение коаксиальной (спутной) струи водорода с ростом скорости ее истечения сопровождается всеми сценариями, наблюдаемые при исследовании диффузионного горения круглой и плоской микроструй водорода. Однако область «перетяжки» пламени претерпевает значительные геометрические деформации из-за специфики пламени коаксиальной струи. Показано, что область перетяжки пламени трансформируется от Y-образной к сферической форме в процессе роста скорости истечения коаксиальной струи. Установлено, что взаимодействие круглой микроструи воздуха с коаксиальной струей водорода при ее горении сопровождается целым рядом новых явлений: наличием конусообразной области горения коаксиальной струи вблизи среза сопла; наличием мелкомасштабных сверхзвуковых ячеек на результирующем пламени; отсутствием горения водорода, истекающего из области горения коаксиальной струи вблизи среза сопла; прорывом пламени из области горения коаксиальной струи вблизи среза сопла, что приводит к поджиганию водорода вниз по потоку, его интенсивному горению и резкому акустическому шуму; наличием турбулентного пламени, его отрыва от среза сопла и выхода на сверхзвуковое горение результирующей струи.

Ключевые слова

круглая микроструя воздуха, спутная коаксиальная струя водорода, взаимодействие струй, область перетяжки пламени, до - и сверхзвуковое горение

Источник финансирования

Работа поддержана грантом РНФ № 16-19-10330

Для цитирования

Козлов В. В., Грек Г. Р., Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Тамбовцев А. С., Шмаков А. Г. Взаимодействие круглой микроструи воздуха с коаксиальной (спутной) струей водорода при его горении на сверхзвуковой скорости их истечения // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 3. С. 53–63. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-53-63

Air Round Microjet Interaction with Coaxial Hydrogen Jet at Its Combustion for Supersonic Speed Jets Efflux

V. V. Kozlov^{1,3}, G. R. Grek¹, M. V. Litvinenko^{1,2}
Yu. A. Litvinenko¹, A. S. Tambovzev^{1,2}, A. G. Shmakov^{3,4}

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

² Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

³ Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

⁴ Siberian State University of Geosystem and Technology
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

Results of experimental studies of the round air microjet interaction with a coaxial hydrogen jet at its combustion for supersonic speed jets efflux are presented in this work. It is revealed that combustion of the coaxial hydrogen jet with growth of its speed efflux is accompanied by all scenarios, observed at study of the round and plane hydrogen microjets diffusion combustion. However, “bottleneck flame region” undergoes considerable geometrical deformations because of specifics of a flame of a coaxial jet. It is shown that “bottleneck flame region” is transformed from Y-shaped to spherical shape in the activity of growth of a coaxial jet speed efflux. It is found that a round air microjet interaction with a coaxial hydrogen jet at its combustion is accompanied by several new phenomena: existence of cone-shaped area a coaxial jet combustion near a nozzle exit; existence of small-scale supersonic cells on a resultant flame; absence of the hydrogen combustion efflux from combustion region of a coaxial jet near nozzle exit; flame-out from combustion region of a coaxial jet near nozzle exit that leads to hydrogen ignition downstream, its intensive combustion and sharp acoustic noise occurrence; existence of a turbulent flame, to its separation from a nozzle exit and transition to supersonic combustion of a resultant jet.

Keywords

air round microjet, coaxial hydrogen jet, interaction of jets, “bottleneck flame region”, subsonic and supersonic combustion

Funding

This work was supported by the Russian Science Foundation, project number 16-19-10330

For citation

Kozlov V. V., Grek G. R., Litvinenko M. V., Litvinenko Yu. A., Tambovzev A. S., Shmakov A. G. Air Round Microjet Interaction with Coaxial Hydrogen Jet at Its Combustion for Supersonic Speed Jets Efflux. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 3, p. 53–63. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-53-63

Введение

Экспериментальные исследования диффузионного горения круглой микроструи водорода [1–5] показали наличие различных сценариев протекания данного процесса в зависимости от нарастания скорости истечения микроструи в диапазоне диаметров выходного отверстия от 0,25 до 1 мм. Обнаружены следующие сценарии диффузионного горения круглой микроструи водорода.

1. Горение чисто ламинарной микроструи с наличием ламинарного пламени большой дальности (U₀ ≤ 150 м/с).

2. Возникновение сферической области «перетяжки» пламени с наличием в ней ламинарной микроструи и ламинарного пламени с турбулизацией микроструи и пламени при преодолении ламинарной микроструи узкой области градиента плотности газа (U₀ > 150 м/с).

3. Отрыв турбулентного пламени от области перетяжки пламени (U₀ > 200 м/с).

4. Прекращение горения турбулентного участка микроструи при сохранении горения в области перетяжки пламени. Причем в данной ситуации горение в области перетяжки пла-

мени сохраняется, вплоть до трансзвуковых скоростей ее истечения, однако при наличии такого явления, как «запирание сопла» [5; 6] ($U_0 > 331$ м/с).

5. Прекращение горения микроструи ($U_0 \approx 331$ м/с).

Аналогичные сценарии горения были обнаружены и при диффузионном горении плоской микроструи водорода [2; 7]. Следует заметить, что запирание сопла происходило при достижении скорости истечения микроструи водорода близкой к скорости звука в воздухе ($U_0 \approx 331$ м/с). Стабилизация горения как круглой, так и плоской микроструи обеспечивалась в данной ситуации наличием области перетяжки пламени и существованием в ней горения.

Тем не менее нам не удалось выйти на сверхзвуковое диффузионное горение микроструи водорода по причине запирания сопла областью перетяжки пламени, которая приводила к нагреву выхода микросопла и предотвращала отрыв пламени от его среза. Одной из характеристик сверхзвукового горения струйного течения, наряду с рядом других, является наличие сверхзвуковых ячеек как в струе, так и в пламени, но в ситуации отрыва пламени от среза сопла. Это детально продемонстрировано в работах [6; 8] при поджигании круглой микроструи водорода вдали от среза сопла. В данной ситуации можно было наблюдать наличие сверхзвуковых ячеек как в струе, так и в оторвавшемся от среза сопла пламени. Результаты экспериментальных и численных исследований горения круглых струй водорода при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях их истечения детально представлены в работах [9–11].

С другой стороны, важно изучить влияние различных газообразных добавок в микрострую водорода на режимы ее горения. В работе [12] представлены результаты экспериментальных исследований диффузионного горения смесей водорода с метаном, а также с гелием или азотом в круглой микроструе. Показано, что механизм и характеристики развития микроструи и пламени при диффузионном горении смесей водорода с одним из газов – метаном, гелием или азотом, связаны с образованием области перетяжки пламени, как и в ситуации диффузионного горения микроструи чистого водорода. Установлено, что область перетяжки пламени имеет сферическую форму, где идет процесс смешения ламинарной струи смеси с окружающим воздухом и их горение. При преодолении узкой области мощного градиента плотности на границе сферической области ламинарная микроструя и пламя мгновенно турбулизуются. Обнаружено, что процесс диффузионного горения смеси водород/метан в круглой микроструе сопровождается поэтапными стадиями отрыва пламени при сохранении горения в области перетяжки пламени, срыва пламени при сохранении горения в области перетяжки пламени и, наконец, прекращения горения, что коррелирует с процессом горения аналогичной микроструи чистого водорода. Установлено, что все перечисленные стадии горения смеси водород/метан реализуются в диапазоне значительно меньших скоростей истечения микроструи (200–500 м/с), чем в аналогичной ситуации горения микроструи чистого водорода (600–800 м/с). Обнаружено повышение устойчивости горения микроструи смеси водород/метан по сравнению с неустойчивым горением микроструи чистого метана, что говорит о возможности за счет добавок водорода расширить диапазон условий (скоростей потока газов) устойчивого турбулентного горения метана и других углеводородов. Показано, что при диффузионном горении смеси водорода с метаном, гелием или азотом в круглой микроструе для стабилизации горения с ростом скорости истечения микроструи необходимо увеличивать долю водорода (или уменьшать долю примеси) в смеси газов.

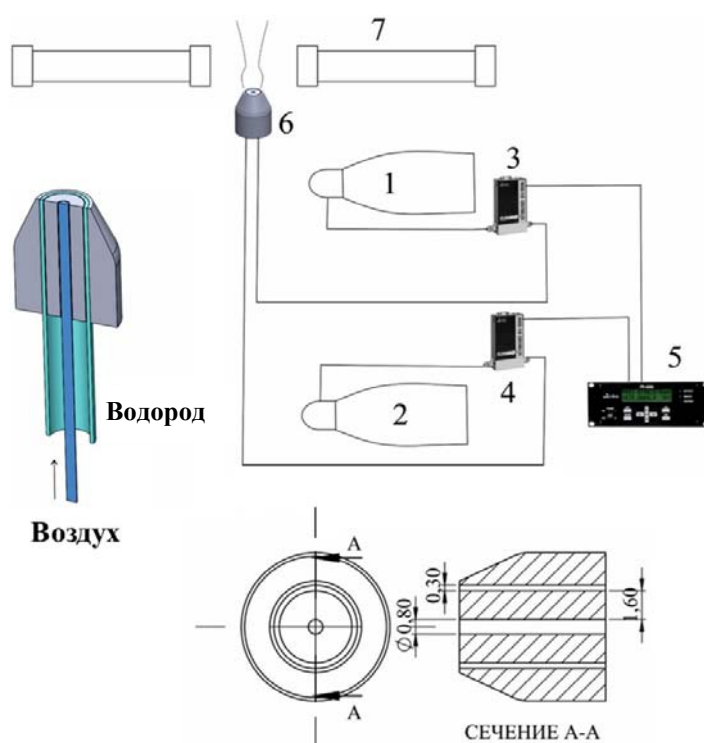
В работе [13] рассмотрены особенности горения микроструи смеси водорода не с инертными (гелий, азот) и горючим (углеводородный газ метан) газами, как в вышеизложенной ситуации, а с хорошо известным окислителем (кислородом). Показано, что добавление кислорода приводит к снижению диапазона скоростей существования горения микроструи по сравнению с аналогичным параметром при диффузионном горении чистого водорода. Установлено, что с ростом скорости истечения микроструи прекращение ее горения связано с уменьшением доли кислорода в смеси. Обнаружено, что сферическая форма области перетяжки пламени трансформируется в узкую и вытянутую область ламинарного пламени цилиндрической формы, процесс утонения (уменьшения поперечного сечения области пере-

тяжки пламени) которой растет с ростом скорости истечения микроструи. Следует заметить, что исследования горения микроструи смеси водорода с различными газами проведено в условиях их смешения до введения смеси в сопловой аппарат.

Исследованию коаксиальных струй и особенно их взаимодействию посвящено значительно меньше работ, особенно экспериментальных. В теоретической работе [14] показано развитие коаксиальной струи на до- и сверхзвуковой скорости и численно смоделировано наличие сверхзвуковых ячеек при сверхзвуковом истечении коаксиальной щелевой струи. Цель настоящей работы состоит в экспериментальных исследованиях особенностей развития и взаимодействия круглой микроструи воздуха и коаксиальной (спутной) струи водорода при его горении на сверхзвуковой скорости их истечения.

Экспериментальное оборудование и процедура исследования

На рис. 1 представлена схема эксперимента.



S_1 – площадь круглого отверстия ввода воздуха
 S_2 – площадь коаксиальной щели ввода спутной струи водорода
 $S_1 = 0,005 \text{ см}^2$
 $S_2 = 0,04 \text{ см}^2$

Рис. 1. Схема эксперимента взаимодействия круглой микроструи воздуха и коаксиальной (спутной) струи водорода при его горении на сверхзвуковой скорости их истечения (1 – сжатый водород; 2 – сжатый воздух; 3, 4 – клапан расходомера; 5 – контроллер расходомера; 6 – сопло горелки; 7 – теневой прибор ИАБ-451). Внизу представлено сопло в разрезе

Fig. 1. Experimental sketch: 1 – hydrogen, 2 – air flow, 3, 4 – flow-meter valve, 5 – flow-meter controller, 6 – nozzle section, 7 – schlieren device; cross-section of the nozzle is shown in the bottom

В сопловое устройство через блок управления электромагнитными клапанами типа 179В фирмы *MKS Instruments* объемного расхода газа подавался водород из баллона 100 атм. через центральное круглое отверстие горелки, а также сжатый воздух через коаксиальную щель горелки. Установка объемного расхода газов осуществлялась блоком управления, а показания расхода газов регистрировались электронным табло расходомеров. Процедура проведения исследований состояла из видеосъемки непосредственно процесса диффузионного горения микроструи чистого водорода в отсутствие и при наличии спутной струи воздуха, а также видеосъемки теневой картины данного процесса (теневой метод Теплера на базе ИАБ-451) с помощью цифровой видеокамеры *Olympus SZ-17* с разрешением 12 МП.

Горение круглой микроструи чистого водорода и при наличии спутной струи воздуха исследовалось при различных скоростях истечения как микроструи водорода, так и спутной струи воздуха. Объемный расход газов Q (см³/с) измерялся с помощью прецизионных расходомеров *MKS Instruments* (США) с точностью $\pm 0,7\%$. Скорость истечения микроструи определялась по формуле $U_0, \text{ м/с} = Q, \text{ см}^3/\text{с} / S, \text{ см}^2$, где S – площадь поперечного сечения круглого отверстия для водорода и коаксиальной щели для спутной струи воздуха на выходе из горелки. Следует заметить, что определение скорости истечения газа на сверхзвуковой скорости из микросопла таким способом не совсем корректно, поскольку не учитывается целый ряд параметров, в том числе сжимаемость газа. В данной ситуации был использован еще один метод определения скорости истечения микроструи по разности давления (ΔP , кгс/м²) на входе ($P_{\text{редуктор}}$) и выходе ($P_{\text{атмосфера}}$) водорода из микросопла ($\Delta P = P_{\text{редуктор}} - P_{\text{атмосфера}}$). При этом $U_0, \text{ м/с} = \sqrt{2\Delta P / \rho}$, где ρ , кг/м³ – плотность водорода.

Результаты экспериментов

Сценарий горения спутной (коаксиальной) струи водорода с ростом скорости ее истечения вплоть до сверхзвуковой скорости

Сценарий горения спутной (коаксиальной) струи водорода с ростом скорости ее истечения вплоть до сверхзвуковой скорости показан на рис. 2.

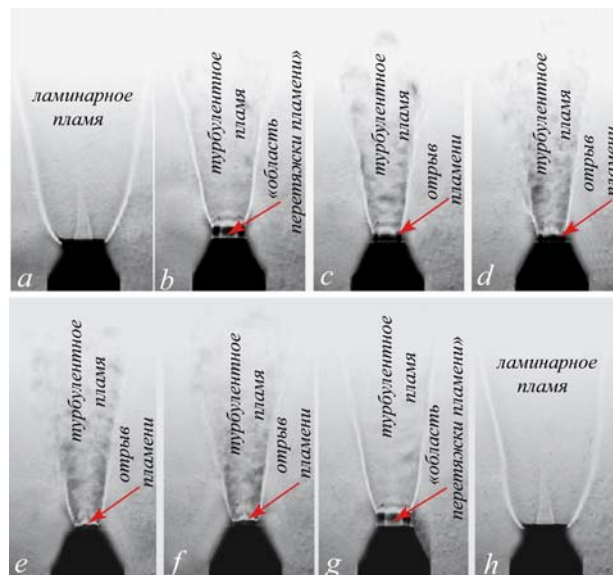


Рис. 2. Теневые картины развития горячей коаксиальной струи водорода при сверхзвуковом истечении из выходного сопла № 0

Fig. 2. Shadow patterns of the flame evolution at the diffusion combustion of coaxial jet of hydrogen at supersonic flowing from the nozzle № 0

Теневые картины горения коаксиальной (спутной) струи водорода в отсутствие ввода круглой микроструи воздуха демонстрируют следующие особенности данного процесса.

1. При низкой скорости истечения струи можно наблюдать наличие ламинарного пламени (см. рис. 2, *a, h*).

2. С ростом скорости струи появляется область перетяжки пламени (см. рис. 2, *b, g*), детали исследования которой представлены в работах [1–5], но при горении круглых и плоских микроструй. Однако в данной ситуации мы наблюдаем возникновение области перетяжки пламени при горении коаксиальной струи, т. е. струи, представляющей собой полый цилиндр со всеми особенностями трансформации его пламени в данной области в некую специфическую геометрическую форму.

3. Далее можно наблюдать исчезновение области перетяжки пламени и отрыв пламени от среза сопла (см. рис. 2, *c–f*), что указывает на сверхзвуковое горение коаксиальной струи, наличие турбулентного пламени, но при отсутствии характерных сверхзвуковых ячеек.

Более детально процесс развития области перетяжки пламени, ее специфической формы и ее трансформации с ростом скорости истечения коаксиальной струи показан на рис. 3 в ситуации взаимодействия круглой микроструи воздуха и коаксиальной (спутной) струи водорода при ее горении. Видно, что форма области перетяжки пламени трансформируется из Y-образной в шарообразную с уменьшением ее геометрического размера и ростом скорости истечения струи. Можно также наблюдать наличие сверхзвуковых ячеек на круглой микроструе воздуха.

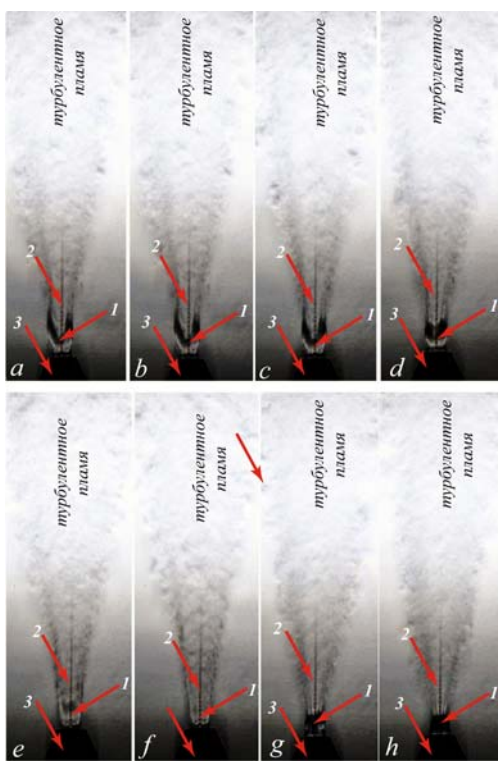


Рис. 3. Теневые картины взаимодействия горячей коаксиальной струи водорода и круглой микроструи воздуха при их до- и сверхзвуковом истечении из выходного сопла № 0: 1 – область перетяжки пламени; 2 – сверхзвуковые ячейки на круглой микроструе; 3 – сопло горелки

Fig. 3. Shadow images of the burning coaxial hydrogen jet interacting with the cocurrent round air microjet at subsonic and supersonic their flowing from nozzle № 0: 1 – bottleneck-flame region; 2 – supersonic cells on the round microjet; 3 – nozzle of the burner

Сценарий взаимодействия круглой микроструи воздуха и спутной (коаксиальной) струи водорода при ее горении на сверхзвуковой скорости истечения струй

Схема эксперимента № 1 представлена на рис. 1. Теневые картины взаимодействия горячей коаксиальной струи водорода и круглой микроструи воздуха при их сверхзвуковом истечении из выходного сопла № 0 демонстрируют следующие особенности данного процесса (рис. 4, 5).

1. Наличие сверхзвуковых ячеек на круглой микроструе воздуха на всем протяжении нарастания скорости истечения сверхзвуковых струй.
2. Наличие горения смеси водород / воздух вблизи выходной щели коаксиальной струи, но его отсутствие вниз по потоку.
3. Прорыв пламени из области вблизи выходной щели, воспламенение смеси водород / воздух с резким акустическим шумом при ее горении и нарастании скорости истечения.
4. Отрыв пламени от среза сопла, сверхзвуковое горение смеси водород / воздух.

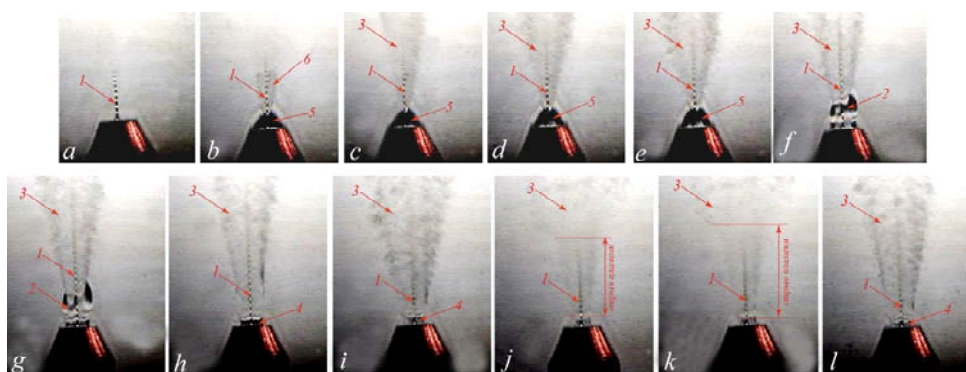


Рис. 4. Теневые картины взаимодействия горячей коаксиальной струи водорода и круглой микроструи воздуха при их сверхзвуковом истечении из выходного сопла № 0: 1 – сверхзвуковые ячейки на круглой микроструе воздуха; 2 – области перетяжки пламени; 3 – турбулентное пламя; 4 – отрыв пламени от среза сопла; 5 – область горения водорода коаксиальной струи вблизи среза сопла; 6 – выход водорода из области 5, но в отсутствие его горения

Fig. 4. Shadow images of the burning coaxial hydrogen jet interacting with the cocurrent round air microjet at supersonic flowing from the nozzle № 0: 1 – supersonic cells on the round air microjet; 2 – bottleneck-flame region; 3 – turbulent flame; 4 – flame separation from the nozzle exit; 5 – region of coaxial jet hydrogen combustion near the nozzle exit; 6 – output of hydrogen from region 5 but without its combustion

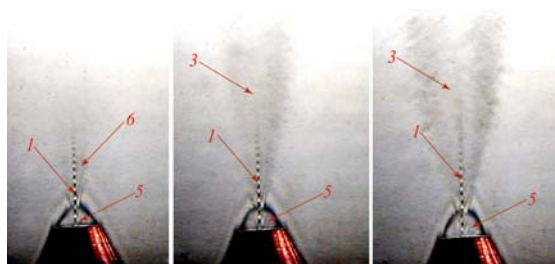


Рис. 5. Теневые картины взаимодействия горячей коаксиальной струи водорода и круглой микроструи воздуха при их сверхзвуковом истечении: 1 – сверхзвуковые ячейки на круглой микроструе воздуха; 3 – турбулентное пламя; 5 – область горения водорода коаксиальной струи вблизи среза сопла; 6 – выход водорода из области 5, но в отсутствие его горения

Fig. 5. Shadow images of the burning coaxial hydrogen jet interacting with the cocurrent round air microjet at supersonic flowing: 1 – supersonic cells on the round air microjet; 3 – turbulent flame; 5 – region of coaxial jet hydrogen combustion near the nozzle exit; 6 – output of hydrogen from region 5 but without its combustion

Заключение

Обнаружено, что горение коаксиальной (спутной) струи водорода с ростом скорости ее истечения сопровождается всеми сценариями, наблюдаемые в работах [1–5] при исследовании диффузионного горения круглой и плоской микроструй водорода. Однако область перетяжки пламени претерпевает значительные геометрические деформации из-за специфики пламени коаксиальной струи. Показано, что область перетяжки пламени трансформируется от Y-образной к сферической форме в процессе роста скорости истечения коаксиальной струи. Установлено, что взаимодействие круглой микроструи воздуха с коаксиальной струей водорода при ее горении сопровождается целым рядом новых явлений: 1) наличием конусообразной области горения коаксиальной струи вблизи среза сопла; 2) наличием мелкомасштабных сверхзвуковых ячеек на результирующем пламени; 3) отсутствием горения водорода, истекающего из области горения коаксиальной струи вблизи среза сопла; 4) прорывом пламени из области горения коаксиальной струи вблизи среза сопла, что приводит к поджиганию водорода вниз по потоку, его интенсивному горению и резкому акустическому шуму; 5) наличием турбулентного пламени, его отрывом от среза сопла и выходом на сверхзвуковое горение результирующей струи.

Список литературы

1. Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А. Различные режимы диффузионного горения круглой струи водорода в воздухе // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, № 2. С. 27–41.
2. Литвиненко Ю. А., Грек Г. Р., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Шмаков А. Г. Структура присоединенного диффузионного пламени микроструи водорода, истекающей из щелевого сопла // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, № 2. С. 52–66.
3. Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов Г. В., Литвиненко М. В. Диффузионное горение водорода (круглое скошенное сопло) // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, № 2. С. 42–51.
4. Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Combustion of a high-velocity hydrogen microjet effluxing in air. *Doklady Physics*, 2016, vol. 61, iss. 9, p. 457–462.
5. Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А. Экспериментальное исследование диффузионного горения высокоскоростной круглой микроструи водорода. Часть 1. Присоединенное пламя, дозвуковое течение // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 2. С. 28–45.
6. Kozlov V. V., Grek G. R., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Experimental study on diffusion combustion of high-speed hydrogen round microjets. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, iss. 1, p. 457–468.
7. Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Features of diffusion combustion of hydrogen in the round and plane high-speed microjets (Part II). *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, vol. 41, iss. 44, p. 20240–20249.
8. Козлов В. В., Грек Г. Р., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Экспериментальное исследование диффузионного горения круглой микроструи водорода при ее зажигании вдали от среза сопла // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 3. С. 62–73.
9. Kalghatgi G. T. Lift-off heights and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air. *Combust. Sci. Technol.*, 1984, vol. 41, iss. 1–2, p. 14–29.
10. Аннушкин Ю. М., Свердлов Е. Д. Исследование устойчивости диффузионных затопленных пламен при дозвуковом и нерасчетном сверхзвуковом истечениях газообразных

- топлив // Химическая физика. Водород, параметры горения и взрыва. М.: Физматлит, 2008. С. 53–63.
11. **Shentsov V., Sakatsume R., Makarov D., Takeno K., Molkov V.** Lift-off and blow-out of under-expanded jets: experiments versus simulations. In: 8th International Seminar on Fire and Explosion. Hefei, China, 2016.
 12. **Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В., Литвиненко Ю. А., Коробейничев О. П.** Диффузионное горение круглой микроструи смесей водорода с метаном, гелием и азотом // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2016, Т. 11, № 2. С. 56–76.
 13. **Шмаков А. Г., Вихорев В. В., Грек Г. Р., Козлов В. В., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А.** Горение круглой микроструи смеси водорода с кислородом, истекающей из прямолинейного микросопла // Сибирский физический журнал. 2018. Т. 13, № 1. С. 54–67.
 14. **Guariglia D., Schram C.** Numerical Simulations of a Subsonic / Supersonic Coaxial Jet for an Efficient Design of Experimental Setup. In: Proceedings of the 2014 COMSOL Conference. Cambridge, 2014.

References

1. **Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov V. V., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A.** Different Conditions of the Round Hydrogen Jets Diffusion Combustion in Air. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10, no. 2, p. 27–41. (in Russ.)
2. **Litvinenko Yu. A., Grek G. R., Kozlov V. V., Korobeinichev O. P., Shmakov A. G.** Structure of the Attached Flame during Diffusion Hydrogen Microjet Combustion (Slotted Nozzle). *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10, no. 2, p. 52–66. (in Russ.)
3. **Grek G. R., Katasonov M. M., Kozlov V. V., Litvinenko Yu. A.** Diffusion Hydrogen Microjet Combustion (Round Bevelled Nozzle). *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10, no. 2, p. 42–51. (in Russ.)
4. **Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Combustion of a high-velocity hydrogen microjet effluxing in air. *Doklady Physics*, 2016, vol. 61, iss. 9, p. 457–462.
5. **Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov V. V., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A.** Experimental Study of the Diffusion Combustion of a High-Speed Round Hydrogen Microjet. Part 1. Attached Flame, Subsonic Flow. *Siberian Journal of Physics*, 2017, vol. 12, no. 2, p. 28–45. (in Russ.)
6. **Kozlov V. V., Grek G. R., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Experimental study on diffusion combustion of high-speed hydrogen round microjets. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, iss. 1, p. 457–468.
7. **Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Features of diffusion combustion of hydrogen in the round and plane high-speed microjets (Part II). *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, vol. 41, iss. 44, p. 20240–20249.
8. **Kozlov V. V., Grek G. R., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Experimental Study of the Diffusion Combustion of a Round Hydrogen Microjet at Its Ignition Far from the Nozzle Exit. *Siberian Journal of Physics*, 2017, vol. 12, no. 3, p. 62–73. (in Russ.)
9. **Kalghatgi G. T.** Lift-off heights and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air. *Combust. Sci. Technol.*, 1984, vol. 41, iss. 1–2, p. 14–29.
10. **Annushkin Yu. M., Sverdlov E. D.** Investigation of the stability of diffusion flooding flame at subsonic and supersonic off-design nozzle at flowing of gaseous fuels. In: Chemical Physics. Hydrogen, combustion and explosion parameters. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, p. 53–63. (in Russ.)
11. **Shentsov V., Sakatsume R., Makarov D., Takeno K., Molkov V.** Lift-off and blow-out of under-expanded jets: experiments versus simulations. In: 8th International Seminar on Fire and Explosion. Hefei, China, 2016.

12. **Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov V. V., Litvinenko Yu. A., Korobeinichev O. P.** Diffusion Combustion of the Round Microjet Mixture of Hydrogen with Metane, Helium and Nitrogen. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2016, vol. 11, no. 2, p. 56–76. (in Russ.)
13. **Shmakov A. G., Vikhorev V. V., Grek G. R., Kozlov V. V., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A.** Combustion of the Round Microjet Premixed Hydrogen with Oxygen Efflux from the Linear Channel. *Siberian Journal of Physics*, 2018, vol. 13, no. 1, p. 54–67. (in Russ.)
14. **Guariglia D., Schram C.** Numerical Simulations of a Subsonic / Supersonic Coaxial Jet for an Efficient Design of Experimental Setup. In: *Proceedings of the 2014 COMSOL Conference*. Cambridge, 2014.

Материал поступил в редколлегию

Received

29.07.2019

Сведения об авторах / Information about the Authors

Козлов Виктор Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, 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)

Viktor V. Kozlov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, 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)
kozlov@itam.nsc.ru

Грек Генрих Рувимович, 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)

Genrich R. Grek, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
grek@itam.nsc.ru

Литвиненко Мария Викторовна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия); ученый секретарь физического факультета, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия)

Maria V. Litvinenko, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Scientific Secretary Faculty of Physics, Novosibirsk State University (2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
litmar@itam.nsc.ru

Литвиненко Юрий Алексеевич, 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)

Yuriy A. Litvinenko, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Senior Scientist, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
litur@itam.nsc.ru

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

Alexander S. Tambovtsev, Laboratory Assistant, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
alsetams@gmail.com

Шмаков Андрей Геннадиевич, кандидат химических наук, заведующий лабораторией, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН (ул. Институтская, 3, Новосибирск, 630090, Россия); доцент, Сибирский государственный университет геосистем и технологий (ул. Плеханова, 10, Новосибирск, 630108, Россия)

Andrey G. Shmakov, Doctor of Science (Chemistry), Head of Laboratory, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS (3 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Assistant Professor, Siberian State University of Geosystem and Technology (10 Plakhotny Str., Novosibirsk, 630108, Russian Federation)
shmakov@kinetics.nsc.ru

**Изучение пределов устойчивого горения
диффузионного пламени микроструи водорода,
истекающей из круглого микросопла, при введении в водород
или воздух инертных и реагирующих газов**

А. Г. Шмаков^{1,2}, В. В. Козлов^{2,3}, М. В. Литвиненко^{2,3}, Ю. А. Литвиненко³

¹ *Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН
Новосибирск, Россия*

² *Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия*

³ *Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
Новосибирск, Россия*

Аннотация

Экспериментально изучено влияние добавок инертных (He, N₂, Ar, CO₂) и реагирующих (CH₄, O₂, CF₃Br, (CH₃O)₃PO) газов в поток водорода или в окружающий воздух на условия отрыва диффузионного пламени микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла. С помощью теневого метода измерена критическая скорость потока водорода, при которой происходит отрыв пламени микроструи водорода от сопла при введении исследуемых газов как в воздух, так и в водород. Установлено, что добавка всех исследуемых газов в поток водорода приводит к уменьшению диапазона скорости микроструи, при которой возможна стабилизация пламени, вне зависимости от того, являются вводимые в водород газы инертными или реагирующими. Показано, что в случае добавки исследуемых газов в поток водорода основным фактором, определяющим критическую скорость отрыва пламени от микросопла, является средний молекулярный вес газовой смеси H₂ с добавками. В случае введения исследуемых газов в окружающий диффузионное пламя воздух критическая скорость отрыва определяется их способностью воздействовать на химические реакции окисления водорода (ингибирующей способностью), а также снижением концентрации кислорода за счет разбавления воздуха вводимой добавкой. Полученные данные представляют интерес для водородной энергетики с точки зрения определения пределов устойчивого горения микроструи водорода, а также определения минимальных флегматизирующих концентраций добавок ингибиторов и пламегасителей в воздухе, предотвращающих воспламенение и горение водорода при его утечке в случае нештатной ситуации.

Ключевые слова

микроструя водорода, отрыв пламени, спутный поток воздуха, круглое микросопло, ингибитор горения, флегматизатор

Источник финансирования

Работа поддержана грантом РФФИ № 16-19-10330

Для цитирования

Шмаков А. Г., Козлов В. В., Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А. Изучение пределов устойчивого горения диффузионного пламени микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла, при введении в водород или воздух инертных и реагирующих газов // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 3. С. 64–75. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-64-75

Study of Stable Combustion Ranges of Diffusion Flame Microjet of Hydrogen Effluent from around Micronozzle at Addition of Inert and Reactive Gases into Hydrogen or Air

A. G. Shmakov^{1,2}, V. V. Kozlov^{2,3}, M. V. Litvinenko^{2,3}, Yu. A. Litvinenko³

¹ Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

³ Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

The effect addition of inert (He, N₂, Ar, CO₂) and reacting (CH₄, O₂, CF₃Br, (CH₃O)₃PO) gases in a hydrogen or in coflowing air stream on lift-off diffusion flame conditions of hydrogen micro jet effluxed from the round micro nozzle was experimentally studied. Using the schlieren technique a critical hydrogen flow rate was established at which the flame of the hydrogen microjet detaches from the nozzle when introducing additives of the studied gases into both air and hydrogen. It has been established that the addition of all the studied gases to the hydrogen leads to a decrease in the velocity range of its microjet at which flame stabilization is possible, regardless of whether the gases introduced into hydrogen are inert or reactive. It is shown that in the case of the addition of various gases to the hydrogen, the main factor determining the critical flow rate at flame lift-off from the micro nozzle is the average molecular weight of the H₂ gas mixture with additives. At addition of the studied gases into the coflowing air, the critical flow rate of H₂ is determined by their affect on the chemical reactions of hydrogen oxidation (inhibition effectiveness), as well as by a decrease in oxygen concentration due to dilution of air by additives. The data obtained are of interest to hydrogen energy in terms of determining the limits of sustainable combustion of the hydrogen microjet, as well as determining the minimum phlegmatizing concentrations of additives of inhibitors and fire suppressant in the air, preventing the ignition and explosion of hydrogen in case of emergency at its leak.

Keywords

hydrogen microjet, flame detachment, coflow air stream, round micronozzle, fire retardant, phlegmatizer

Funding

This work was supported by the Russian Science Foundation, project number 16-19-10330

For citation

Shmakov A. G., Kozlov V. V., Litvinenko M. V., Litvinenko Yu. A. Study of Stable Combustion Ranges of Diffusion Flame Microjet of Hydrogen Effluent from around Micronozzle at Addition of Inert and Reactive Gases into Hydrogen or Air. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 3, p. 64–75. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-64-75

Введение

Микрогорелочные устройства находят широкое применение в сфере производства тепла, электроэнергии, освещения, получения различных веществ и материалов. Такие устройства по сравнению с крупномасштабными горелочными установками более безопасны, а также позволяют легко управлять режимами их работы. Кроме того, путем изменения числа микрогорелок в устройстве можно легко масштабировать процесс в целом.

Водород является экологически чистым топливом, обладающим широкими концентрационными пределами горения в смеси с воздухом, поэтому устройства с микрогорелками на водороде перспективны для практического использования. При изучении диффузионного горения высокоскоростной микроструи водорода, истекающей в неподвижный воздух, было установлено, что при характерных размерах круглых и плоских сопел от 0,1 до 3 мм пламя имеет двухзонную структуру, горение в этих последовательных зонах может происходить независимо друг от друга [1–3]. Однако существование первой зоны, представляющей собой присоединенное ламинарное диффузионное пламя, обеспечивает стабилизацию горения вплоть до звуковых скоростей истечения потока водорода. В связи с этим важно изучить за-

кономерности процесса стабилизации пламени на микрогорелке, обусловленные влиянием добавки исследуемых газов как в микрострую топлива, так и в окружающий ее воздух. Такие исследования позволяют найти режимы устойчивого горения пламени, что дает ключ к управлению подобными процессами. Например, ранее было предложено использовать добавку метана в водород для управления режимом горения микроструи и предотвращения перегрева и разрушения микросопла. В работе [4] путем численного моделирования было рассчитано температурное поле в пламени микроструи водорода, истекающего со скоростью 1–2 м/с из металлического сопла с внутренним диаметром 0,8 мм и толщиной стенок 0,2 мм. На основе полученных расчетных данных проведен анализ влияния состава горючей смеси на температурный режим микросопла. Кроме того, результаты расчетов показали, что структура пламени имеет близкую к сферической форму, в нижней части пламени наблюдается «ведущая кромка», характерная для так называемого «тройного пламени». Стабилизация пламени на сопле в этих условиях обусловлена тепловым потоком из зоны ведущей кромки пламени в боковую поверхность сопла.

В работе [5] с помощью спектроскопических методов была экспериментально изучена тепловая и химическая структура диффузионного пламени водорода при истечении его потока в воздух из круглых металлических сопел диаметром 0,2 и 0,48 мм с скоростью 16,48 и 7,16 м/с соответственно. Полученные данные были сопоставлены с результатами численного расчета с использованием детального химико-кинетического механизма окисления водорода. Сопоставление показало, что в области среза сопла модель не предсказывает подмешивание окружающего воздуха в поток водорода, наблюдаемое в эксперименте, поэтому требуется дальнейшая доработка модели как в плане кинетики реакций, так и в отношении уточнения параметров молекулярного переноса веществ. Эта работа показывает, что, несмотря на большой прогресс в области численного моделирования, пока не все особенности структуры диффузионного пламени водорода удастся адекватно описать путем проведения компьютерных расчетов.

В работе [6] экспериментально с помощью оптической спектроскопии изучена структура пламени водорода (профили температуры и концентрации веществ) при истечении его в воздух из круглого металлического сопла с внутренним диаметром 1 мм и толщиной стенки 0,17 мм при скорости потока 36 и 3,3 м/с. Численные расчеты структуры пламени с использованием 5 различных детальных химико-кинетических механизмов окисления водорода показали удовлетворительное согласие с результатами измерений. Таким образом, было показано, что при определенных условиях (большой диаметр сопла, высокая скорость потока водорода) результаты численного моделирования структуры пламени слабо чувствительны к выбору кинетической схемы реакции окисления водорода, и на этот факт нужно обратить особое внимание, так как это довольно неожиданно.

Ранее нами было исследовано влияние добавок кислорода, метана, гелия, азота в водород на условия отрыва диффузионного пламени, стабилизированного на круглом металлическом микросопле [7–9]. Как было установлено, добавка этих газов в водород приводит к уменьшению скорости потока горючего, при котором происходит отрыв пламени. Систематические исследования влияния добавок других газов в поток топлива или в окружающий воздух при горении микроструи водорода в настоящее время в литературе отсутствуют.

Одной из важных проблем для водородной энергетики является пожаро- и взрывобезопасность, так как сжатый водород при хранении и транспортировке представляет серьезную опасность, заключающуюся в воспламенении и горении водорода при его утечке в случае нештатной ситуации. Поэтому нахождение способов тушения пожаров и предотвращения взрывов в случае микроутечек водорода также является актуальной научной задачей.

Задачей данной работы является получение новых экспериментальных данных по влиянию добавок различных инертных и реагирующих газов в водород или в окружающий воздух на пределы горения (условия отрыва пламени от микросопла) высокоскоростной струи

газообразного топлива, истекающего из круглого микросопла, а также обобщение этих данных с ранее полученными результатами для выявления общих закономерностей.

Экспериментальная часть

Пламя стабилизировали на круглом цилиндрическом микросопле, представляющем собой трубку из нержавеющей стали внутренним диаметром $0,5 \pm 0,01$ мм, толщиной стенки $0,1 \pm 0,01$ мм и длиной 30 мм. Нижний конец этой стальной трубки был соединен с медной трубкой диаметром 3 мм. Медная трубка имеет электрический нагреватель для нагрева потока водорода до $90\text{--}100$ °С. Для создания спутного потока воздуха, обдувающего микросопло, была использована труба из нержавеющей стали диаметром 70 мм, имеющая на конце сужение до диаметра 44 мм. Для предотвращения конденсации паров добавки триметилфосфата труба имеет двойные стенки, между которыми прокачивается с вода с температурой 86 °С. Внутри трубы на расстоянии 100 и 150 мм от ее выходного среза расположены две диафрагмы из пористого материала для выравнивания скорости потока воздуха по сечению трубы. Схема горелки приведена на рис. 1.

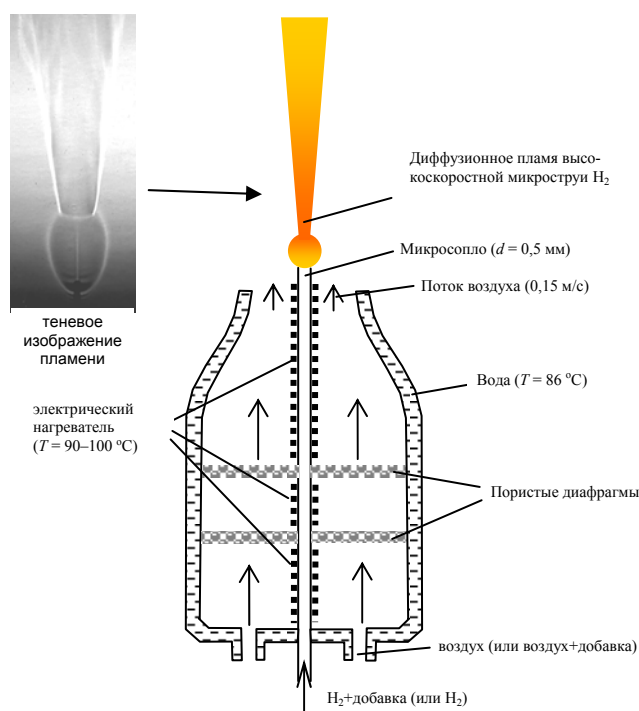


Рис. 1. Схема горелки с цилиндрическим микросоплом для измерения скорости отрыва пламени высокоскоростной микроструи H_2 при введении в нее (или в спутный поток воздуха) добавок различных газов

Fig. 1. Sketch of the microburner for measuring the speed of the hydrogen microjet separating from the nozzle upon injection of gas additives to the microjet and ambient air

Ингибиторы горения CF_3Br (фреон 13B1, $T_{кип} = -58$ °С), триметилфосфат (далее – ТМФ, $(CH_3O)_3PO$, $T_{кип} = 197$ °С), инертные вещества (He , N_2 , Ar , CO_2) вводились либо в поток H_2 либо в поток воздуха. Реагирующие газы (O_2 или CH_4) вводились только в поток H_2 . Смеси-

вание газов происходило непосредственно в линии подачи газовой смеси в горелку (трубки диаметром 6 мм), расстояние от места смешивания до горелки составляло около 1,5 м. Концентрация CF_3Br , He, N_2 , Ar, CO_2 , CH_4 , O_2 в смеси с H_2 или с воздухом задавалась с помощью регуляторов массового расхода газов (MSK Instruments, USA), в которые эти компоненты подавались из баллонов с редукторами. Относительная погрешность задания концентрации газообразных добавок в смеси составляет $\pm 1\%$.

Для введения паров ТМФ в поток H_2 (или в поток воздуха) использовался испаритель, представляющий собой цилиндрический сосуд из термостойкого стекла (диаметр 25 мм, длина 100 мм) с двумя патрубками для ввода и вывода газов и одним патрубком для ввода жидкого ТМФ. Испаритель заполнен стальными шариками (диаметром 3 мм) для увеличения поверхности испарения жидкости. Через один из патрубков в испаритель подается поток газа-носителя (H_2 или воздух), а из другого выходит смесь паров ТМФ с газом-носителем. Испаритель нагревается до 200–220 °С с помощью электрического нагревателя, расположенного вокруг испарителя. Поток жидкого ТМФ, подаваемого в испаритель через тонкую металлическую трубку внутренним диаметром 1 мм, задавался с помощью шприца, поршень которого приводится в движение шаговым двигателем. Относительная погрешность задания концентрации паров ТМФ в смеси составляет $\pm 2\%$. Для предотвращения конденсации паров ТМФ в линии подачи газов, трубки от испарителя до горелки нагревались с помощью отдельного электрического нагревателя до 90 °С.

Для измерения скорости отрыва пламени устанавливали некоторый расход H_2 через микросопло. После этого поджигали пламя и постепенно увеличивали концентрацию вводимой в водород (или в воздух) добавки исследуемых газов до достижения момента полного погасания пламени (т. е. момента отрыва пламени). Факт отрыва пламени от микросопла фиксировали теневым методом. Скорость потока микроструи в момент отрыва пламени оценивали исходя из объемного расхода газовой смеси через сопло и площади его сечения. Каждое измерение проводили не менее трех раз. После этого изменяли расход H_2 , и всю процедуру повторяли. Объемный расход спутного потока воздуха был постоянным, при этом скорость потока воздуха на срезе сопла составляла 0,15 м/с. При такой относительно низкой (относительно скорости истечения микроструи водорода) величине скорости потока воздуха условия эксперимента можно считать эквивалентными горению микроструи H_2 в неподвижном воздухе.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлена измеренная в эксперименте зависимость объемной концентрации добавок CF_3Br , ТМФ, He, N_2 , Ar, CO_2 , CH_4 , O_2 от скорости микроструи смеси H_2 + добавка в момент отрыва пламени. Как можно видеть из этого рисунка, введение добавок любых из исследованных газов в поток H_2 приводит к уменьшению скорости потока, при котором происходит отрыв пламени от среза микросопла.

Приведенные на рис. 2 данные позволяют расположить исследованные вещества в порядке величины их эффекта (величины концентрации добавки, при которой происходит отрыв пламени при фиксированной скорости потока истекающей из микросопла смеси) на условия отрыва пламени следующим образом:

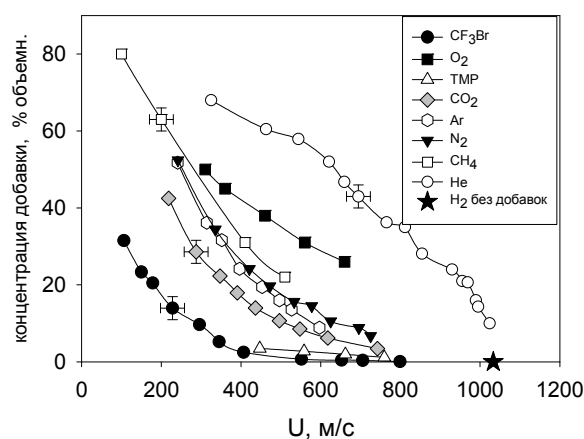


Если предположить, что эффективность добавок зависит от их молекулярной массы, то для исследованных веществ этот ряд можно представить следующим образом:

$$4 < \underline{32} < 16 < 28 < 40 < 44 < 140 < 149.$$

Рис. 2. Зависимость объемной концентрации добавок CF_3Br , ТМФ, He, N_2 , Ar, CO_2 , CH_4 , O_2 в смеси с H_2 от скорости микроструи этой смеси (U) в момент отрыва пламени от среза сопла

Fig. 2. Bulk concentration of CF_3Br , ТМФ, He, N_2 , Ar, CO_2 , CH_4 and O_2 in the mixture with hydrogen versus microjet velocity at the moment of flame separation from the nozzle



Как видно, исключением для представленной закономерности является только O_2 . По всей видимости, O_2 , в отличие от всех других исследованных добавок, является окислителем, и это может способствовать дополнительной стабилизации пламени. По этой причине O_2 немного отклоняется от общей закономерности соответствия эффективности молекулярной массе добавки. Также обращает на себя внимание то, что для He характер зависимости качественно отличается от всех других кривых, особенно при высокой скорости потока смеси H_2 + добавка. Видно, что при небольших концентрациях добавки He (10–20 %) он слабо уменьшает скорость отрыва пламени по сравнению с величиной, измеренной для чистого H_2 , составляющей 1033 ± 20 м/с. Малое увеличение концентрации добавки ТМФ и CF_3Br при высокой скорости потока смеси H_2 + добавка приводит к очень сильному уменьшению величины скорости отрыва пламени. Из литературы известно, что ТМФ и CF_3Br являются эффективными ингибиторами горения, влияющими на химию и кинетику процессов окисления различных видов топлива [10–12]. Поэтому представляет интерес, насколько существенным может быть вклад физических и химических процессов в эффект снижения скорости отрыва пламени при введении ТМФ и CF_3Br . В упрощенном случае условия отрыва диффузионного пламени могут рассматриваться в терминах так называемого «ведущего края тройного пламени». Для этой конфигурации диффузионного пламени градиенты концентрации и скорости вблизи среза микросопла оказывают влияние на распространение пламени вдоль линии максимальной скорости горения, что непосредственно связано с условиями отрыва пламени. Структура и скорость распространения тройного пламени в системе « H_2 – воздух» ранее исследовалась прямым численным моделированием (2D) с использованием детальных химико-кинетических механизмов окисления [13; 14]. Результаты такого моделирования качественно согласуются с выводами упрощенного подхода для рассмотрения условий отрыва пламени.

Таким образом, условия отрыва диффузионного пламени от сопла определяются локальной скоростью газа вблизи его среза и условиями смешения горючего с окислителем на границе их потоков. Поэтому одной из определяющих характеристик условий отрыва пламени является кинетическая энергия истекающего из сопла газового потока, передаваемая вовлекаемому в область горения окружающему воздуху. Очевидно, что чем выше кинетическая энергия микроструи смеси H_2 + добавка, тем выше локальная скорость газовой смеси в области ведущего края тройного пламени, а условия ближе к критическим условиям отрыва пламени. Кинетическая энергия газового потока пропорциональна $M_r \cdot U^2$, где M_r – средняя молекулярная масса газовой смеси, U – скорость газовой смеси на выходе из сопла. Таким образом, можно предположить, что в случае существования связи между скоростью потока и его молекулярной массой должно выполняться соотношение $U \sim 1/M_r^{0.5}$. На рис. 3 представлена зависимость параметра $1/M_r^{0.5}$ от U для смесей H_2 + добавка при отрыве пламени

от сопла. Как можно видеть, представленные в этих координатах зависимости $1/M_r^{0.5}$ от U имеют практически линейный характер, а данные для CO_2 , N_2 и Ar совпадают между собой в пределах ошибки эксперимента. Также видно, что наклон кривых для O_2 , He , CH_4 заметно отличается от наклона кривых для CO_2 , N_2 и Ar . Зависимость для CF_3Br имеет сложный характер – при высоких концентрациях его добавки она совпадает с результатами для CO_2 , N_2 и Ar , а при более низких концентрациях ($< 10\%$) наблюдается расхождение. Важно отметить, что для ТМФ значения параметра $1/M_r^{0.5}$ в диапазоне скоростей потока смеси H_2 + добавка 450–760 м/с с хорошей точностью также совпадают с данными для CO_2 , N_2 и Ar . Так как CO_2 , N_2 и Ar являются химически инертными добавками и действуют на условия отрыва пламени в основном за счет эффекта разбавления и изменения теплофизических параметров горючей смеси, то подобное совпадение данных для ТМФ с данными для CO_2 , N_2 и Ar может трактоваться как отсутствие химического эффекта добавки ТМФ на процесс горения H_2 . С другой стороны, H_2 является основным компонентом горючей смеси и имеет значительно более высокие значения коэффициента диффузии, чем большинство исследованных в данной работе добавок. Поэтому можно предположить, что концентрация добавок с большой молекулярной массой в области ведущего края тройного пламени достаточно мала из-за их низкого коэффициента диффузии, чтобы оказать заметное влияние на условия отрыва пламени. Тем не менее, эти добавки имеют большой молекулярный вес, поэтому даже при их низких концентрациях смеси ее средний молекулярный вес значительно изменяется по сравнению с чистым H_2 . В данной работе для анализа полученных результатов использован достаточно упрощенный подход, поэтому для детального установления причин, по которым зависимость параметра $1/M_r^{0.5}$ от U для CF_3Br , He , O_2 , CH_4 заметно отличаются от результатов для CO_2 , N_2 и Ar , в дальнейшем необходим более глубокий анализ на основе сопоставления экспериментальных результатов и данных численного моделирования параметров пламени H_2 .

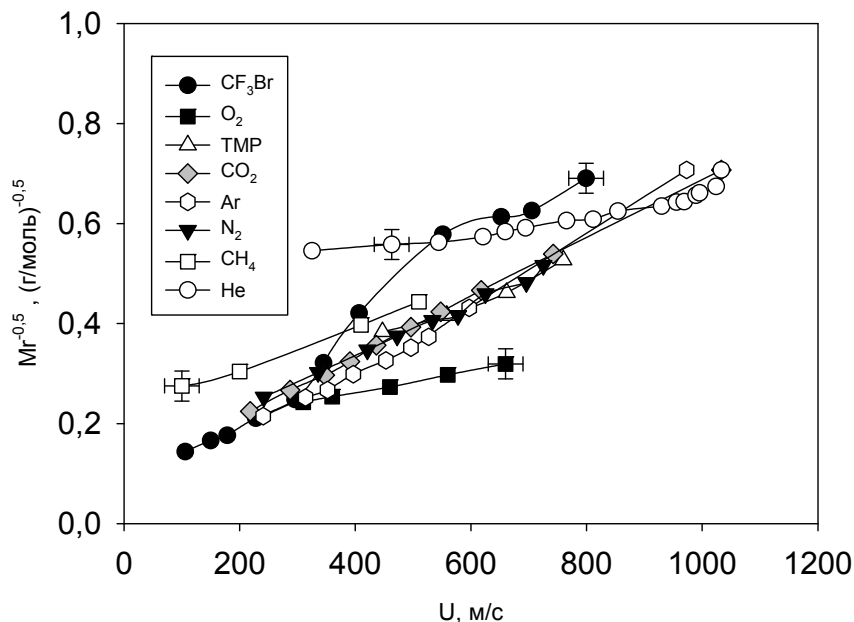


Рис. 3. Зависимость параметра $1/M_r^{0.5}$ в смесях H_2 с различной концентрацией добавок от скорости микроструи этих смесей (U) в момент отрыва пламени от сопла

Fig. 3. Variation of $1/M_r^{0.5}$ at different concentration of the additives versus microjet velocity at the moment of flame separation from the nozzle

На рис. 4 приведены результаты измерения скорости отрыва пламени H_2 от сопла при введении добавок исследуемых газов в поток спутного воздуха. Полученные зависимости скорости потока H_2 в момент отрыва пламени от микросопла имеют практически линейную зависимость от концентрации добавки. Это возможно в том случае, если эффект добавок связан с разбавлением воздуха добавкой, а следовательно, с уменьшением концентрации O_2 в спутном потоке.

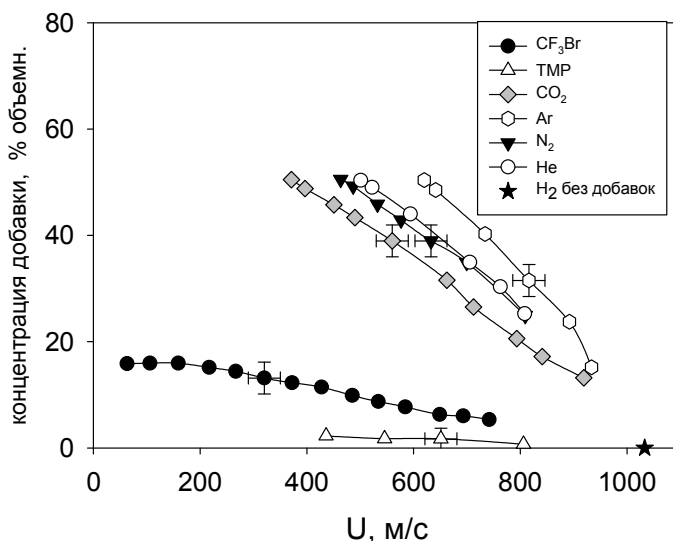


Рис. 4. Зависимость объемной концентрации добавок CF_3Br , ТМФ, He, N_2 , Ar, CO_2 в смеси с воздухом от скорости микроструи H_2 (U) в момент отрыва пламени

Fig. 4. Bulk concentration of CF_3Br , ТМФ, He, N_2 , Ar, and CO_2 mixed with air vs velocity of the hydrogen microjet at the moment of flame separation

Исследуемые газы по величине эффекта на скорость отрыва пламени микроструи H_2 можно ранжировать в следующем порядке:

$$Ar < He < N_2 < CO_2 < CF_3Br < ТМФ.$$

Как можно видеть, в этом ряду не просматривается явной тенденции влияния молекулярного веса добавки. Также нет явной зависимости от удельной молярной теплоемкости, вязкости и коэффициента диффузии исследованных газов. Наименьший эффект на критическую скорость потока в момент отрыва пламени от сопла имеет добавка Ar. Кривые для He, N_2 лежат достаточно близко друг к другу. Добавка CO_2 несколько более сильно влияет на отрыв пламени по сравнению с добавками He и N_2 . Более высокую эффективность по сравнению с инертными газами имеют добавки CF_3Br и ТМФ. Для одинакового снижения скорости потока H_2 в момент отрыва пламени требуется ввести их в смесь в 10 раз более низкой концентрации, чем инертные газы.

Если экстраполировать полученные зависимости для N_2 и CO_2 к оси ординат, то можно видеть, что гашение пламени микроструи водорода при низких значениях скорости потока происходит при концентрации этих добавок около 60–80 % объема. Согласно литературным данным, минимальная взрывоопасная концентрация кислорода (МВСК) при его разбавлении N_2 , при которой возможно воспламенение водорода, составляет 5 % [15]. Этой величине соответствует смесь воздуха и азота в пропорции 1 : 3, т. е. концентрация добавки N_2 в воздухе составляет 75 %. Для CO_2 , согласно данным [15], горение смесей водорода прекращается при

концентрации CO_2 выше 62 % в смеси с O_2 . Как можно видеть, для N_2 и CO_2 данные величины коррелируют с представленными на рис. 4 данными.

В случае добавок CF_3Br и ТМФ существенный вклад в их эффективность дает способность этих веществ ингибировать процесс горения, т. е. замедлять химический процесс окисления топлива. Из литературы известно, что эффективность действия добавки ТМФ на диффузионное пламя, в случае его введения со стороны окислителя, заметно выше, чем эффект добавки CF_3Br [16; 17]. Представленные на рис. 4 результаты подтверждают этот факт, в то время как, согласно приведенным на рис. 2 и 3 данным, эти же соединения при введении в поток H_2 оказывают в основном физическое воздействие на пламя (за счет увеличения плотности (средней молекулярной массы) горючей смеси).

Если сравнить эффект одних и тех же добавок при их введении в поток водорода или воздуха, то можно видеть, что наиболее сильное влияние (определенное по объемной концентрации этих добавок в смеси) наблюдается в случае введения этих вещества в водород. Например, для CF_3Br отрыв пламени происходит при скорости потока горючей смеси 500 и 300 м/с при введении 10 % этой добавки в поток воздуха или в H_2 соответственно, т. е. скорости потоков отличаются почти в 1,7 раза.

Для N_2 отрыв пламени происходит при скорости 800 и 400 м/с при введении 25 % этой добавки в поток воздуха или в H_2 соответственно, что дает отличие в скорости потоков в 2 раза.

Заключение

В работе экспериментально изучено влияние газообразных добавок – CF_3Br , ТМФ ($((\text{CH}_3\text{O})_3\text{PO})$), He , N_2 , Ar , CO_2 , CH_4 , O_2 на условия отрыва пламени высокоскоростной микроструи H_2 , истекающей из круглого микросопла в воздух. Показано, что в случае добавления исследованных газов в поток H_2 условия отрыва пламени определяются физическими параметрами топливной смеси, а именно ее средним молекулярным весом (или плотностью). Эффект добавок химически активных ингибиторов горения (CF_3Br и ТМФ) и реагирующих газов (CH_4 и O_2) в поток H_2 также обусловлен изменением среднего молекулярного веса топливной смеси в результате добавки исследуемых газов.

В случае добавления исследованных газов в воздух их эффект на условия отрыва пламени высокоскоростной микроструи H_2 , большей частью обусловлен снижением концентрации O_2 из-за разбавления воздуха добавкой. В случае добавления CF_3Br и ТМФ, помимо эффекта разбавления, существенное влияние на условия отрыва пламени оказывает способность этих веществ замедлять цепные процессы окисления H_2 . Для детального анализа особенностей влияния изученных газов на критические параметры устойчивого горения высокоскоростной микроструи H_2 в дальнейшем необходимо проведение численного моделирования тепловой и химической структуры пламени.

Список литературы

1. Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Features of diffusion combustion of hydrogen in the round and plane high-speed microjets (part II). *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, vol. 41, iss. 44, p. 20240–20249.
2. Kozlov V. V., Vikhorev V. V., Grek G. R., Litvinenko Y. A., Shmakov A. G. Diffusion Combustion of a Hydrogen Microjet at Variations of its Velocity Profile and Orientation of the Nozzle in the Field of Gravitation. *Combustion Science and Technology*, 2019, vol. 191, iss. 7, p. 1219–1235.
3. Kozlov V. V., Grek G. R., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Experimental study on diffusion combustion of high-speed hydrogen round microjets. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, p. 457–468.

4. **Gao J., Hossain A., Nakamura Y.** Flame base structures of micro-jet hydrogen / methane diffusion flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, vol. 36, p. 4209–4216.
5. **Cheng T. S., Chao Y.-C., Wu C.-Y., Li Y.-H., Nakamura Y., Lee K.-Y., Yuan T., Leu T. S.** Experimental and numerical investigation of microscale hydrogen diffusion flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, vol. 30, p. 2489–2497.
6. **Cheng T. S., Wu C. Y., Chen C. P., Li Y.-H., Chao Y.-C., Yuan T., Leu T. S.** Detailed measurement and assessment of laminar hydrogen jet diffusion flames. *Combustion and Flame*, 2006, vol. 146, iss. 1–2, p. 268–282.
7. **Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В., Литвиненко Ю. А., Коробейничев О. П.** Диффузионное горение круглой микроструи смесей водорода с метаном, гелием и азотом // Вестник Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2016. Т. 11, № 2. С. 56–76.
8. **Вихорев В. В., Грек Г. Р., Козлов В. В., Литвиненко Ю. А., Литвиненко М. В., Шмаков А. Г.** Горение круглой микроструи смеси водорода с кислородом, истекающей из криволинейного микросопла // Сибирский физический журнал. 2018. Т. 13, № 1. С. 68–79.
9. **Шмаков А. Г., Вихорев В. В., Грек Г. Р., Козлов В. В., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А.** Горение круглой микроструи смеси водорода с кислородом, истекающей из прямолинейного микросопла // Сибирский физический журнал. 2018. Т. 13, № 1. С. 54–67.
10. **Jayaweera T. M., Melius C. F., Pitz W. J., Westbrook C. K., Korobeinichev O. P., Shvartsberg V. M., Shmakov A. G., Rybitskaya I. V., Curran H. J.** Flame Inhibition by Phosphorus-Containing Compounds over a Range of Equivalence Ratios. *Combustion and Flame*, 2005, vol. 140, p. 103–115.
11. **Babushok V., Noto T., Burgess D. R., Hamins A., Tsang W.** Influence of CF_3I , CF_3Br , and CF_3H on High-Temperature Combustion of Methane. *Combustion and Flame*, 1996, vol. 107, p. 351–367.
12. **Noto T., Babushok V. V., Hamins A., Tsang W.** Inhibition Effectiveness of Halogenated Compounds. *Combustion and Flame*, 1998, vol. 112, p. 147–160.
13. **Im H. G., Chen J. H.** Structure and propagation of triple flames in partially premixed hydrogen-air mixtures. *Combustion and Flame*, 1999, vol. 119, p. 436–454.
14. **Im H. G., Chen J. H.** Effect of flow strain on triple flame propagation. *Combustion and Flame*, 2001, vol. 126, p. 1384–1392.
15. **Баратов А. Н., Корольченко А. Я., Кравчук Г. Н. и др.** Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справ. изд.: В 2 кн. М: Химия, 1990. Кн. 2. 384 с.
16. **MacDonald M. A., Jayaweera T. M., Fisher E. M., Gouldin F. C.** Variation of Chemically Active and Inert Flame-Suppression Effectiveness with Stoichiometric Mixture Fraction. *27th Symposium (International) on Combustion*, 1998, vol. 27, p. 2749–2756.
17. **MacDonald M. A., Jayawera T. M., Fisher E. M., Gouldin F. C.** Inhibition of Non-Premixed Flames by Phosphorus-Containing Compounds. *Combustion and Flame*, 1999, vol. 116, p. 166–176.

References

1. **Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Features of diffusion combustion of hydrogen in the round and plane high-speed microjets (part II). *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, vol. 41, iss. 44, p. 20240–20249.
2. **Kozlov V. V., Vikhorev V. V., Grek G. R., Litvinenko Y. A., Shmakov A. G.** Diffusion Combustion of a Hydrogen Microjet at Variations of its Velocity Profile and Orientation of the Nozzle in the Field of Gravitation. *Combustion Science and Technology*, 2019, vol. 191, iss. 7, p. 1219–1235.

3. **Kozlov V. V., Grek G. R., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Experimental study on diffusion combustion of high-speed hydrogen round microjets. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, p. 457–468.
4. **Gao J., Hossain A., Nakamura Y.** Flame base structures of micro-jet hydrogen / methane diffusion flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, vol. 36, p. 4209–4216.
5. **Cheng T. S., Chao Y.-C., Wu C.-Y., Li Y.-H., Nakamura Y., Lee K.-Y., Yuan T., Leu T. S.** Experimental and numerical investigation of microscale hydrogen diffusion flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, vol. 30, p. 2489–2497.
6. **Cheng T. S., Wu C. Y., Chen C. P., Li Y.-H., Chao Y.-C., Yuan T., Leu T. S.** Detailed measurement and assessment of laminar hydrogen jet diffusion flames. *Combustion and Flame*, 2006, vol. 146, iss. 1–2, p. 268–282.
7. **Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov V. V., Litvinenko Yu. A., Korobeinichev O. P.** Diffusion Combustion of the Round Microjet Mixture of Hydrogen with Metane, Helium and Nitrogen. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2016, vol. 11, no. 2, p. 56–76. (in Russ.)
8. **Vikhorev V. V., Grek G. R., Kozlov V. V., Litvinenko Yu. A., Litvinenko M. V., Shmakov A. G.** Combustion of the Round Microjet of Hydrogen with Oxygen Mixture Efflux from the Curved Micronozzle. *Siberian Journal of Physics*, 2018, vol. 13, no. 1, p. 68–79. (in Russ.)
9. **Shmakov A. G., Vikhorev V. V., Grek G. R., Kozlov V. V., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A.** Combustion of the Round Microjet Premixed Hydrogen with Oxygen Efflux from the Linear Channel. *Siberian Journal of Physics*, 2018, vol. 13, no. 1, p. 54–67. (in Russ.)
10. **Jayaweera T. M., Melius C. F., Pitz W. J., Westbrook C. K., Korobeinichev O. P., Shvartsberg V. M., Shmakov A. G., Rybitskaya I. V., Curran H. J.** Flame Inhibition by Phosphorus-Containing Compounds over a Range of Equivalence Ratios. *Combustion and Flame*, 2005, vol. 140, p. 103–115.
11. **Babushok V., Noto T., Burgess D. R., Hamins A., Tsang W.** Influence of CF_3I , CF_3Br , and CF_3H on High-Temperature Combustion of Methane. *Combustion and Flame*, 1996, vol. 107, p. 351–367.
12. **Noto T., Babushok V. V., Hamins A., Tsang W.** Inhibition Effectiveness of Halogenated Compounds. *Combustion and Flame*, 1998, vol. 112, p. 147–160.
13. **Im H. G., Chen J. H.** Structure and propagation of triple flames in partially premixed hydrogen-air mixtures. *Combustion and Flame*, 1999, vol. 119, p. 436–454.
14. **Im H. G., Chen J. H.** Effect of flow strain on triple flame propagation. *Combustion and Flame*, 2001, vol. 126, p. 1384–1392.
15. **Baratov A. N., Korolchenko A. Ya., Kravchuk G. N. et al.** Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya. Spravochnik [Fire and explosion hazard of substances and materials and means of extinguishing. Reference book]. Moscow, Khimiya Publ., 1990, book 2, 384 p. (in Russ.)
16. **MacDonald M. A., Jayaweera T. M., Fisher E. M., Gouldin F. C.** Variation of Chemically Active and Inert Flame-Suppression Effectiveness with Stoichiometric Mixture Fraction. *27th Symposium (International) on Combustion*, 1998, vol. 27, p. 2749–2756.
17. **MacDonald M. A., Jayawera T. M., Fisher E. M., Gouldin F. C.** Inhibition of Non-Premixed Flames by Phosphorus-Containing Compounds. *Combustion and Flame*, 1999, vol. 116, p. 166–176.

Материал поступил в редколлегию
Received
01.02.2019

Сведения об авторах / Information about the Authors

Шмаков Андрей Геннадиевич, кандидат химических наук, заведующий лабораторией, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН (ул. Институтская, 3, Новосибирск, 630090, Россия); старший преподаватель, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия)

Andrey G. Shmakov, Doctor of Science (Chemistry), Head of Laboratory, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS (3 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Chief Instructor, Novosibirsk State University (2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
shmakov@kinetics.nsc.ru

Козлов Виктор Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, 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)

Viktor V. Kozlov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, 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)
kozlov@itam.nsc.ru

Литвиненко Мария Викторовна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия); ученый секретарь физического факультета, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия)

Maria V. Litvinenko, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Scientific Secretary Faculty of Physics, Novosibirsk State University (2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
litmar@itam.nsc.ru

Литвиненко Юрий Алексеевич, 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)

Yuriy A. Litvinenko, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Senior Scientist, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
litur@itam.nsc.ru

УДК 543.427.4:581.192

DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-76-85

**Применение метода РФА СИ для изучения зависимости
между содержанием химических элементов и биологически
активными фенольными соединениями жимолости синей**

И. Г. Боярских^{1,2}, А. И. Сысо², О. В. Чанкина³

¹ *Центральный сибирский ботанический сад СО РАН
Новосибирск, Россия*

² *Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
Новосибирск, Россия*

³ *Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН
Новосибирск, Россия*

Аннотация

Методом РФА СИ с высокой чувствительностью (10^{-10} г/г) в широком диапазоне концентраций в образцах малой массы (10–30 мг) определены пределы варьирования микро- и макроэлементов в листьях жимолости синей в контрастных геохимических условиях Горного Алтая в связи с вторичным метаболизмом. Увеличение основных классов биологически активных фенольных соединений наблюдалось в местообитаниях с высоким содержанием Са и Sr, вызывающим снижение величины соотношения К/Са в почве. В этих же местообитаниях отмечалось увеличение соотношений Cu/Zn и Fe/Zn и снижение – Fe/Cu и Fe/Ni.

Ключевые слова

РФА СИ метод, химические элементы, жимолость синяя, флавоноиды и гидроксикоричные кислоты

Источник финансирования

Работа выполнена с использованием инфраструктуры ЦКП «СЦСТИ» на базе ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН, под-держанного Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62117X0012)

Для цитирования

Боярских И. Г., Сысо А. И., Чанкина О. В. Применение метода РФА СИ для изучения зависимости между содержанием химических элементов и биологически активными фенольными соединениями жимолости синей // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 3. С. 76–85. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-76-85

**The Use of X-Ray Fluorescence Analysis Using Synchrotron Radiation
to Study the Relationship between Chemical Elements
and Phenolic Compounds in the Blue Honeysuckle Plants**

I. G. Boyarskikh^{1,2}, A. I. Syso², O. V. Chankina³

¹ *The Central Siberian Botanical Garden SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation*

² *Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS
Новосибирск, Россия*

³ *Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation*

Abstract

Macro- and trace elements variation limits in the blue honeysuckle leaves, collected in the geochemically contrasting environments in the Altai Mountains, were determined by X-ray fluorescence analysis using synchrotron radiation, and their relationship with plant secondary metabolism analyzed. In content of main classes of biologically active

© И. Г. Боярских, А. И. Сысо, О. В. Чанкина, 2019

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2019. Том 14, № 3
Siberian Journal of Physics, 2019, vol. 14, no. 3

plant phenols were found in habitats with increased Ca and Sr contents, resulting in decreased soil K/Ca ratio. The same habitats were found to have increased Cu/Zn and Fe/Zn ratios and decreased Fe/Cu and Fe/Ni ratios.

Keywords

SR XRF method, chemical elements, blue honeysuckle, flavonoids and hydroxycinnamic acids

Funding

The work, relating to the measurement of spectra was done using the infrastructure of the Shared research facility “Siberian Synchrotron and Terahertz Radiation Center (SSTRC)” based on complex “VEPP-4 – VEPP-2000”

For citation

Boyarskikh I. G., Syso A. I., Chankina O. V. The Use of X-Ray Fluorescence Analysis Using Synchrotron Radiation to Study the Relationship between Chemical Elements and Phenolic Compounds in the Blue Honeysuckle Plants. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 3, p. 76–85. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-76-85

Видовая специфичность элементного состава растений, синтезирующих различные классы биологически активных веществ, представляет существенный интерес для познания механизма биохимических процессов жизнедеятельности растений. Многочисленными исследованиями показано, что синтез в растениях отдельных групп физиологически активных веществ и концентрирование микроэлементов, характерных для разных видов растений, находятся в корреляционной зависимости и представляют единый интегральный фактор их видовой специфичности [1]. Вопросы участия макро- и микроэлементов в биогенезе различных классов биологически активных фенольных соединений (ФС) в лекарственных растениях в настоящее время остаются актуальными в связи с их большим разнообразием и специфичностью функций в физиологических процессах.

Жимолость синяя (*Lonicera caerulea* L. s.l.) сем. *Caprifoliaceae* Juss. – очень пластичный вид, обладающий широкой экологической амплитудой, повсеместно распространен в природе в зоне бореальных лесов. Полезные свойства этого вида определяются набором ФС, основными среди которых являются гидроксикоричные кислоты (ГКК) и флавоноиды – антоцианы, флавонолы, флавоны [2–4], а также содержанием комплекса микро- и макроэлементов [5; 6], причем в листьях уровень накопления ФС за счет высоких концентраций ГКК значительно выше, чем в плодах, что позволяет использовать их в качестве фармацевтического и пищевого сырья. Методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА СИ) определена концентрация 26 элементов в листьях *L. caerulea* [5].

Сравнительное изучение индивидуально-группового состава флавоноидов и гидроксикоричных кислот в плодах и листьях растений природной популяции *L. caerulea* Курайского хребта Горного Алтая, проведенное нами ранее [4], показало значительные различия микропопуляций этого вида по содержанию ФС в геоботанически сходных условиях произрастания. Для выявления возможного влияния элементного состава почв на содержание микро- и макроэлементов, а также уровня накопления различных классов ФС в листьях растений было проведено определение содержания химических элементов в системе «почва – растение» методом РФА СИ.

Методика и экспериментальная часть

Исследования проводили в популяции *L. caerulea* на 4-х участках Курайского хребта Горного Алтая (Улаганский р-он, Республика Алтай), северный макросклон, долина реки Сарыачик (левый приток р. Кубадру), на 1 530–1 850 м над уровнем моря (местообитания 1–4).

Для исследований использовался гербарный материал *L. caerulea*, собранный в фазе созревания плодов на выделенных участках и исследованный ранее на содержание ФС. Средняя (репрезентативная) проба составлялась из 20–30 растений *L. caerulea* на каждой пробной площадке. Содержание химических элементов в системе «почва – растение» изучалось методом сопряженного отбора и анализа почвенных и растительных образцов.

Валовое содержание элементов в почвах и растениях определялось методом рентгено-флуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения на станции элементного анализа Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (накопитель ВЭПП-3) [7–9]. Для возбуждения флуоресценции использовалось монохроматизированное синхротронное излучение с энергией 23 кэВ. Время облучения каждого образца составляло от 150 до 400 секунд. Для получения характеристического рентгеновского спектра, относительно энергии квантов, рассчитываются индивидуальные энергетические пики, соответствующие измеряемым элементам, и площади пиков, которые, в свою очередь, соответствуют концентрациям элементов. Концентрацию элементов определяли с использованием метода «внешнего стандарта». В качестве образцов сравнения использовали российские стандарты травяно-злаковой смеси ГСО СОМ1 8242_2003 и байкальского ила БИЛ-1 [10]. Для РФА СИ анализа навеску воздушно-сухого растительного сырья, а также почвы (1 г) измельчали в агатовой ступке. Затем образцы прессовали в форме таблетки диаметром ~ 1 см, весом 30 мг (с поверхностной плотностью $0,04 \text{ г/см}^2$). Величина ошибки результатов анализа, полученная путем 15-ти параллельных измерений 3-х одинаковых образцов, для большинства элементов в растительных образцах колеблется в основном в пределах 3–11 %, для V, Co, Ni и Zr – 17, 18, 40 и 60 % соответственно и для почвенных образцов составляет 3–20 % в зависимости от элемента. В этих исследованиях были определены 19 элементов (K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Br, Rb, Sr, Zr, Nb, Mo, Pb). Возможности метода РФА СИ, конструкция станции и измерительного комплекса описаны А. В. Дарьиным и Я. В. Ракшун [11] в паспорте станции ¹.

Содержание подвижных форм K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Li, Sr (экстрагент ацетатно-аммонийный буферный раствор с pH 4,8) в почвах анализировали атомно-абсорбционным методом.

Результаты и обсуждение

Исследование разных по высоте местообитаний жимолости синей в долине р. Сарыачик показало значительные различия сформировавшихся в них почв по валовому содержанию макроэлементов Ca, Fe и микроэлементов Ti, Mn, Sr, Zr, V, Zn, Rb, Ni, Cu, Pb, Co, As, Cr, Br и Mo (рис. 1). Эти различия были обусловлены различием почв по составу и свойствам, прежде всего содержанию глинистых частиц и органического вещества. Обогащенные последними почвы местообитаний 1 и 4 отличались наибольшими концентрациями Fe, Ti, Mn, V, Zn, Ni, Cu, As, Co. Для местообитания 4 было характерно высокое содержание в почве Ca ($32\,353 \text{ мг/кг}$), для местообитания 3 наибольшая концентрация Mo ($1,3 \text{ мг/кг}$) и самое низкое содержание Br.

Различие состава и свойств почв разных местообитаний отразилось на содержании в почвах подвижной формы K, Ca, Fe, Mn, Sr, Zn, Ni, Cu, Pb, Co (табл. 1), что предопределяет изменение питания ими растений в зависимости от места произрастания. Выявлена достоверная корреляционная зависимость между валовым содержанием элементов и содержанием их подвижной формы в почве для Ca, Fe и Pb (табл. 2), у других элементов такая зависимость не обнаружена, вероятно, из-за существенного влияния на концентрацию их подвижной формы других факторов, ее определяющих.

Преимуществом метода РФА СИ является возможность анализировать образцы малой массы (10–30 мг), что позволило использовать гербарный материал растений, в образцах которого ранее изучалось содержание полифенолов. В листьях жимолости синей с высокой чувствительностью (10^{-10} г/г) в широком диапазоне концентраций было определено 19 элементов (рис. 2). Из них макроэлементы Ca, K, Fe и микроэлементы Cu, Co, Mn, Zn, Rb, V, Ni, Mo, Sr и Br относятся к биофильным (эссенциальным) элементам. Микроэлементы Cr, Nb и As отмечались в листьях *L. caerulea* отдельных местообитаний в низких концентрациях.

¹ <http://ssrc.inp.nsk.su/CKP/stations/passport/3/>

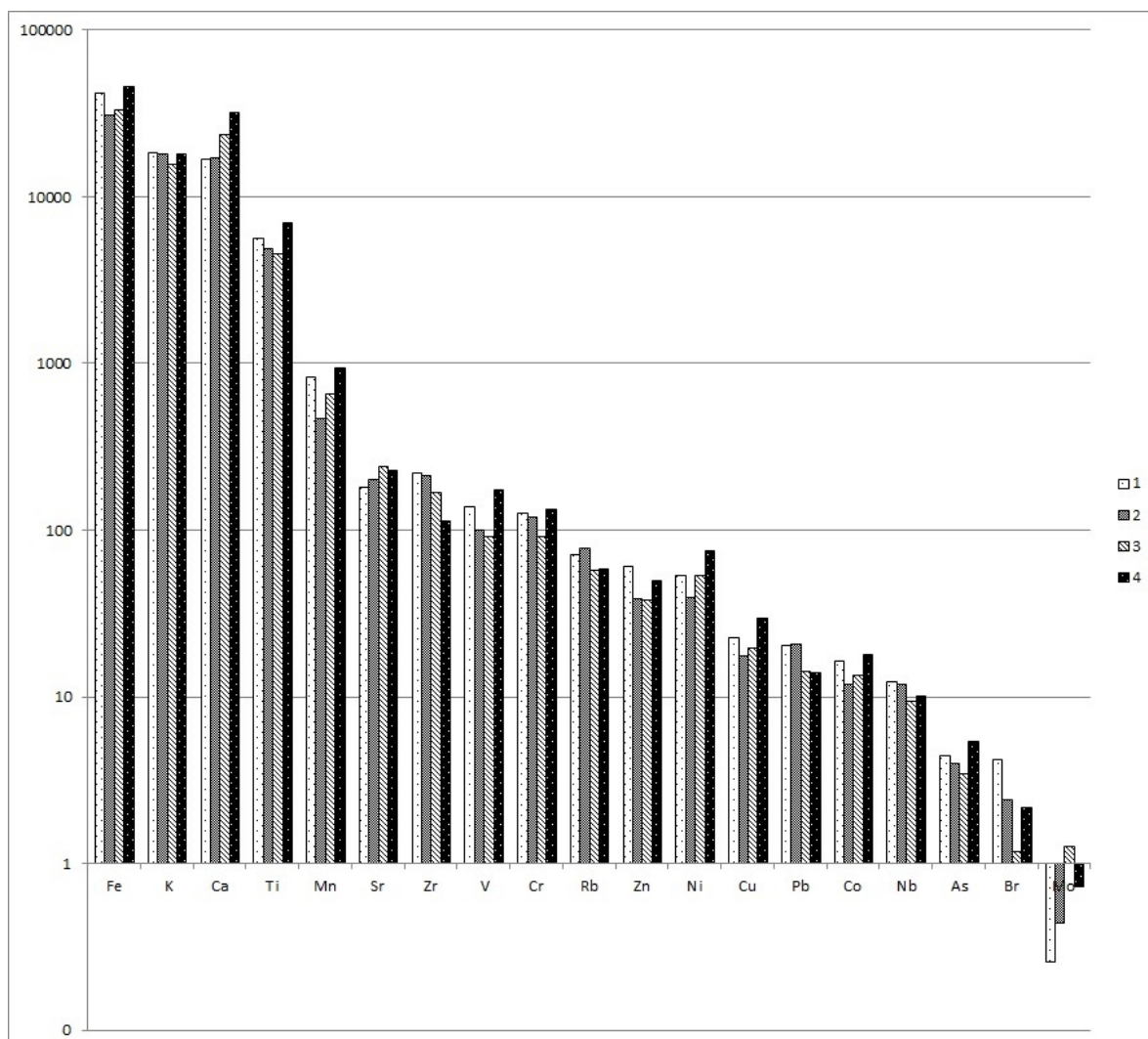


Рис. 1. Валовое содержание макро- и микроэлементов (логарифмическая шкала) в почвах местообитаний (1–4) *L. caerulea* в долине р. Сарыачик

Fig. 1. The total macro- and trace element contents (logarithmic scale) in soils of *L. caerulea* habitats (1–4) in the Saryachik Valley

Таблица 1

Содержание подвижной формы макро- и микроэлементов в почвах различных местообитаний (1–4) жимолости синей (мг/кг воздушно-сухой почвы)

Table 1

The contents of mobile forms of macro- and trace elements in soils of the different habitats of blue honeysuckle (mg/kg of air-dried soil)

Местообитание	K	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu	Ni	Pb	Sr	Co
1	77	1067	310	40	0,6	0,21	1,0	0,00	11,0	0,26
2	50	1232	180	34	0,3	0,24	0,0	0,00	11,0	0,24
3	58	1034	116	17	0,5	0,09	0,1	0,13	8,8	0,10
4	38	350	440	12	0,8	0,23	0,0	0,17	1,5	0,13

Таблица 2

Корреляционная зависимость между валовым содержанием элементов
и содержанием их подвижной формы в почве

Table 2

The correlation coefficients between total
and mobile forms of chemical elements in soil

K	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu	Ni	Pb	Sr	Co
-0,03	-0,94	0,94	-0,34	0,57	0,30	-0,10	-0,99	-0,59	-0,16

Примечание: жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, достоверные на 1–5 %-м уровне значимости.

Note: statistically significant ($P \leq 0.05$) correlation coefficients are highlighted in bold.

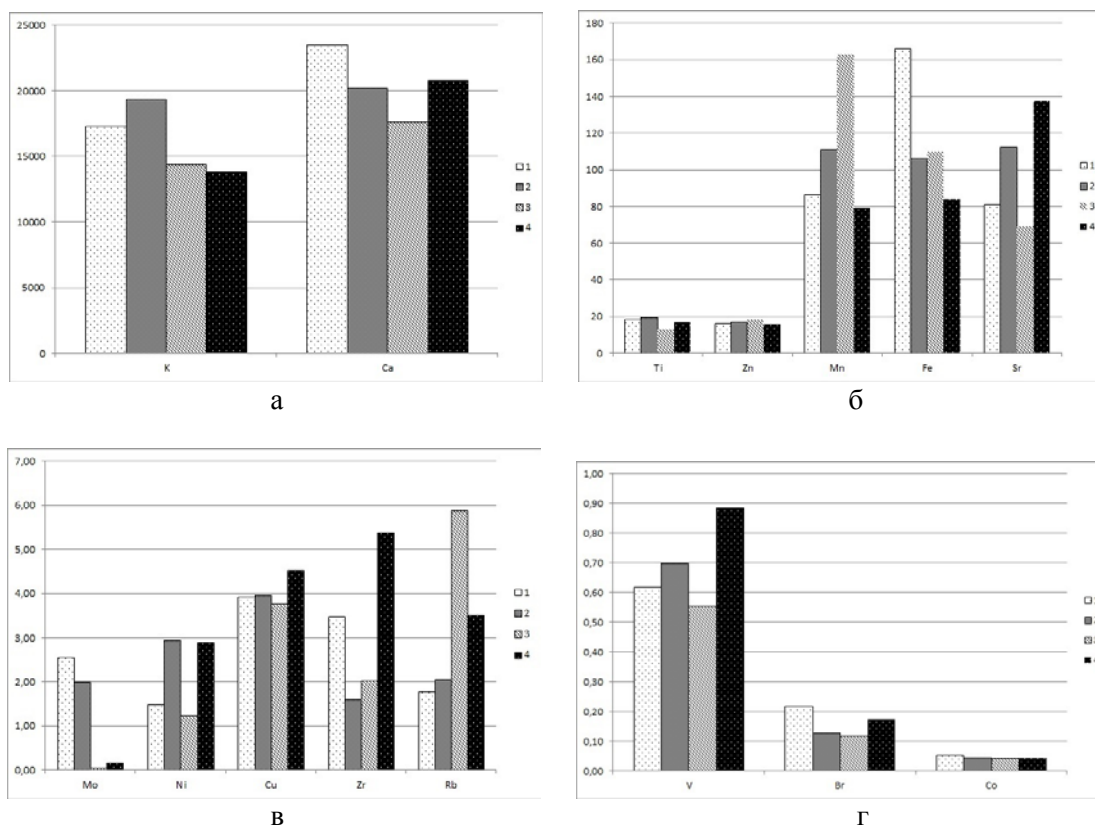


Рис. 2. Содержание макро- и микроэлементов в листьях *L. caerulea* из различных местообитаний (1–4):
а – K, Ca; б – Ti, Zn, Mn, Fe, Sr; в – Mo, Ni, Cu, Zr, Rb; г – V, Br, Co

Fig. 2. Macro- and trace elements' contents in leaves of *L. caerulea* from different habitats (1–4):
а – K, Ca; б – Ti, Zn, Mn, Fe, Sr; в – Mo, Ni, Cu, Zr, Rb; г – V, Br, Co.

Анализ содержания изученных макро- и микроэлементов в листьях растений *L. caerulea*, произрастающих в разных по высоте местообитаниях, показал его значительное варьирование (см. рис. 2). Местообитание 1 отличалось наибольшим содержанием в листьях растений Ca, Fe, Mo и Br, местообитание 2 – K, Ti и Ni, местообитание 3 – Zn, Mn, Rb, местообитание 4 – Sr, Cu, Zr и V.

Соотношение химических элементов является более информативным для физиологии растительного организма по сравнению с количественным содержанием макро- и микроэлементов.

тов [12], наиболее важные соотношения приведены в табл. 3. Соотношение K/Ca характеризуется достаточно постоянной величиной и определяет тип минерального питания растений. В контрастных по элементному составу почвенных условиях соотношение K/Ca в листьях растений изменяется в пределах 0,74–0,96, что позволяет отнести *L. caerulea* к растениям с кальциотрофным типом минерального обмена [13]. Соотношение Fe/Mn, характеризующее взаимосвязь этих элементов-антагонистов в их метаболических функциях в растениях, наиболее адекватным для многих из них считается в диапазоне 1,5–2,5 [12]. Результаты наших исследований выявили минимальную величину соотношения Fe/Mn = 0,7 в листьях *L. caerulea* из местообитания 3, обусловленную высокой концентрацией в них Mn, способного негативно сказаться на выполнении железом его метаболических функций.

Таблица 3

Соотношения микро- и макроэлементов в листьях *L. caerulea*
в зависимости от местообитания (1–4)

Table 3

The ratio of some macro- and trace elements in *L. caerulea* leaves
in different habitats

Местообитание	K/Ca	K/Rb	Fe/Mn	Fe/Zn	Fe/Cu	Fe/Ni	Cu/Zn
1	0,74	9739	1,9	10	42	113	0,24
2	0,96	9496	1,0	6	27	36	0,23
3	0,82	2451	0,7	6	29	89	0,20
4	0,67	3955	1,1	5	19	29	0,28

Биологическое для растений значение рубидия и соотношения K/Rb слабо изучено. Нами обнаружено, что в листьях растений местообитаний 1 и 2 соотношение K/Rb в 2,5–4 раза выше, чем в местообитаниях 3 и 4, из-за большей концентрации K и меньшей – Rb.

Положительная достоверная корреляционная зависимость установлена между валовым содержанием в почве и листьях растений V, Cu и Br, отрицательная – между Zn, Rb и Mo (табл. 4). Корреляционный анализ содержания микро- и макроэлементов в листьях и содержания подвижной формы химических элементов в почве показал существование достоверной зависимости только по Ni.

Среди вторичных метаболитов флавоноиды и гидроксикоричные кислоты занимают особое место и рассматриваются как один из элементов взаимодействия растений со средой. Известно, что они принимают активное участие в окислительно-восстановительных процессах, фотосинтезе и дыхании, передаче сигналов, мужской фертильности, транспорте ауксина, защищают растения от УФ-излучений [14]. ФС участвуют в защите растений от действия множества неблагоприятных экологических факторов, таких как повышенная интенсивность света, низкие и высокие температуры, тяжелые металлы, водный дефицит и т. д. [15; 16].

Для выявления взаимосвязи содержания макро- и микроэлементов с изменением уровня накопления ФС был проведен корреляционный анализ зависимости между суммарным содержанием в органах *L. caerulea* производных ГKK, флавонолов, флавонов и концентрацией отдельных химических элементов, а также величиной ключевых в физиологии растений отношений K/Ca, Fe/Mn, K/Rb, Cu/Zn, Fe/Zn, Fe/Cu и Fe/Ni (табл. 5). В результате было установлено, что увеличение содержания производных ГKK (в частности хлорогеновой кислоты), флавонов и суммы ФС в листьях достоверно связано со значительным уменьшением содержания Mo в листьях и увеличением концентрации Mo в почве. Достоверные корреляционные зависимости выявлены между содержанием производных ГKK и содержанием Cu, Rb и V в листьях растений, значительное уменьшение соотношения K/Rb в листьях также достоверно связано с увеличением хлорогеновой кислоты.

Таблица 4

Корреляционная зависимость между валовым содержанием микро- и макроэлементов в почве и их содержанием в листьях *L. caerulea*

Table 4

Correlation coefficients between the total macro- and trace element contents in *L. caerulea* leaves and soil

К	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Br	Rb	Sr	Zr	Mo	Pb
0,48	-0,30	0,26	0,80	-0,55	0,07	0,25	0,11	0,88	-0,80	0,87	-0,82	0,08	-0,68	-0,88	-0,24

Примечание: жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, достоверные на 5 %-м уровне значимости.
Note: statistically significant ($P \leq 0.05$) correlation coefficients are highlighted in bold.

Таблица 5

Корреляционная зависимость между содержанием различных классов биологически активных соединений и содержаниями макро-и микроэлементов в листьях *L. caerulea* и почвах

Table 5

Correlation coefficients between different biologically active compounds and macro- and trace element contents in *L. caerulea* leaves and soil

Элементы	К	Ca	V	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Mo	Pb	Fe/Mn	K/Rb	Cu/Zn	Fe/Zn	Fe/Cu	Fe/Ni	K/Ca
Листья																				
ГКК	-0,78	-0,50	0,64	0,02	-0,88	-0,81	0,38	0,69	-0,01	0,57	0,57	-0,90	0,59	-0,63	-0,81	0,45	-0,83	-0,90	-0,63	-0,43
ХК	-0,78	-0,85	-0,16	0,71	-0,52	-0,78	-0,35	-0,06	0,63	0,99	-0,24	-0,92	0,15	-0,74	-0,96	-0,31	-0,61	-0,44	0,00	-0,18
ДХК	-0,52	-0,12	0,92	-0,41	-0,81	-0,56	0,69	0,93	-0,41	0,13	0,87	-0,60	0,65	-0,35	-0,46	0,77	-0,69	-0,88	-0,80	-0,45
Флавонолы	-0,73	-0,39	0,74	-0,11	-0,87	-0,74	0,47	0,78	-0,14	0,45	0,67	-0,83	0,60	-0,55	-0,73	0,56	-0,80	-0,91	-0,68	-0,47
Флавоны	-0,75	-0,73	0,42	0,31	-0,83	-0,93	0,25	0,46	0,28	0,75	0,37	-0,97	0,61	-0,81	-0,90	0,17	-0,90	-0,87	-0,56	-0,23
Сумма ФС	-0,76	-0,63	0,53	0,18	-0,90	-0,89	0,32	0,58	0,15	0,67	0,47	-0,94	0,61	-0,74	-0,86	0,31	-0,88	-0,90	-0,61	-0,32
Почва																				
ГКК	-0,24	0,96	0,42	0,38	0,33	0,36	0,74	0,63	-0,34	-0,77	0,84	0,60	-0,89	-0,36	0,83	1	0,97	-1	-0,89	-0,95
ХК	-0,89	0,58	-0,22	0,07	-0,14	-0,02	0,34	0,08	-0,55	-0,85	0,95	0,99	-0,88	-0,43	0,50	0,67	0,73	-0,61	-0,88	-0,82
ДХК	0,23	0,89	0,68	0,45	0,51	0,48	0,75	0,76	-0,10	-0,47	0,50	0,17	-0,61	-0,20	0,77	0,87	0,80	-0,91	-0,62	-0,71
Флавонолы	-0,10	0,97	0,52	0,43	0,41	0,42	0,78	0,70	-0,25	-0,71	0,76	0,49	-0,84	-0,34	0,84	0,98	0,94	-0,99	-0,84	-0,90
Флавоны	-0,48	0,86	0,14	0,16	0,06	0,12	0,56	0,39	-0,57	-0,78	0,95	0,79	-0,91	-0,26	0,69	0,97	0,99	-0,95	-0,91	-0,94
Сумма ФС	-0,37	0,92	0,27	0,26	0,18	0,23	0,65	0,50	-0,47	-0,77	0,91	0,70	-0,91	-0,30	0,76	1	1	-0,98	-0,91	-0,95

Примечание: жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, достоверные на 1–5 %-м уровне значимости.
Note: statistically significant ($P \leq 0.05$) correlation coefficients are highlighted in bold.

Увеличение основных классов ФС и их суммы наблюдалось в местообитаниях с высоким валовым содержанием Sr и Ca, вызывающим снижение величины соотношения K/Ca в почве. Также в этих местообитаниях отмечалось достоверное увеличение значений соотношений Cu/Zn и Fe/Zn, снижение – Fe/Cu и Fe/Ni (см. табл. 5). Достоверные зависимости были установлены между основными классами ФС и содержанием подвижной формы Mn и Mg в почве.

Заключение

Результаты изучения изменчивости содержания макро- и микроэлементов в растениях и почвах различных местообитаний жимолости синей свидетельствуют о влиянии состава и свойств почв местообитаний растений на их элементный химический и биохимический состав. Кроме того, они позволяют предположить участие биологически активных полифенолов в регуляции поступления эссенциальных микро- и макроэлементов в органы растений. Таким образом, использование РФА СИ метода позволило оценить в образцах малой массы изменение содержания и отношения широкого спектра микро- и макроэлементов в листьях растений, произрастающих на почвах различного элементного состава. Метод подтвердил свою эффективность при изучении физиолого-биохимических эффектов.

Список литературы

1. Бузук Г. Н., Ловкова М. Я., Соколова С. М. Универсальный характер м-образной зависимости между основным и специализированным обменом у лекарственных растений // Вестник фармации. 2006. № 1. С. 22–33.
2. Palikova I., Heinrich J., Bednar P. et al. Constituents and Antimicrobial Properties of Blue Honeysuckle: A Novel Source for Phenolic Antioxidants. *J. Agric. Food Chem.*, 2008, no. 56, p. 11883–11889.
3. Jurikova T., Rop O., Mlcek J. et al. Phenolic Profile of Edible Honeysuckle Berries (Genus *Lonicera*) and Their Biological Effects. *Molecules*, 2012, vol. 17, p. 61–79.
4. Боярских И. Г., Васильев В. Г., Кукушкина Т. А. Содержание флавоноидов и гидроксикоричных кислот в *Lonicera caerulea* (*Caprifoliaceae*) в популяциях Горного Алтая // Раст. ресурсы. 2014. Вып. 1. С. 105–121.
5. Боярских И. Г., Чанкина О. В., Худяев С. А., Сысо А. И. Исследование элементного состава системы почва-растение на примере *Lonicera caerulea* // Изв. РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77 (2). С. 212–215.
6. Боярских И. Г., Чанкина О. В., Сысо А. И., Васильев В. Г. Тренды содержания химических элементов в листьях *Lonicera caerulea* (*Caprifoliaceae*) в связи с их вторичным метаболизмом в природных популяциях Горного Алтая // Изв. РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79 (1). С. 106–110.
7. Kulipanov G. N., Mezentsev N. A., Pindyurin V. F. Synchrotron radiation in Novosibirsk: The first 13 years. *Journal of Structural Chemistry*, 2016, vol. 57, no. 7, p. 1277–1287. DOI 10.1134/S0022476616070015
8. Piminov P. A., Baranova G. N., Bogomyagkov A. V. et al. Synchrotron Radiation applications in the Siberian Synchrotron and Terahertz Radiation Center. *Physics Procedia*, 2016, vol. 84, p. 19–26. DOI 10.1016/j.phpro.2016.11.005
9. Trounova V. A., Zolotarev K. V., Baryshev V. B., Phedorin M. A. Analytical possibilities of SRXRF station at VEPP-3 SR source. *Nucl. Instr. Meth. Phys.*, 1998, vol. A405, p. 532–536.
10. Арнаутов Н. А. Стандартные образцы химического состава природных минеральных веществ: Метод. рекомендации. Новосибирск, 1990. 220 с.
11. Дарьин А. В., Ракшун Я. В. Методика выполнения измерений при определении элементного состава образцов горных пород методом рентгенофлуоресцентного анализа с

использованием синхронного излучения из накопителя ВЭПП-3 // Научный вестник НГТУ. 2013. Т. 2 (51). С. 112–118.

12. **Kabata-Pendias A.** Trace Elements in Soils and Plants. 4th ed. CRC Taylor and Francis Group, 2011, 505 p.
13. **Horak O., Kinzel H.** Typen des Mineralstoffwechsels bei den höheren Pflanzen. *Osterr. Bot. Z.*, 1971, vol. 119, no. 4–5, p. 475–495.
14. **Falcone Ferreyra M. L., Rius S. P., Casati P.** Flavonoids: biosynthesis, biological functions, and biotechnological applications. *Front Plant Sci.*, 2012, vol. 3, p. 1–15.
15. **Michalak A.** Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress review. *Pol. J. Environ. Stud.*, 2006, vol. 15, p. 523–530.
16. **Edreva A., Velikova V., Tsonev T. et al.** Stress-protective role of secondary metabolites: diversity of functions and mechanisms. *Gen. Appl. Plant Physiol.*, 2008, vol. 34, p. 67–78.

References

1. **Buzuk G. N., Lovkova M. Ya., Sokolova S. M.** Universal character of M-shaped dependence between basic and specialized metabolism in officinal plants. *Vestn. Farm.*, 2006, no. 1, p. 1–11. (in Russ.)
2. **Palikova I., Heinrich J., Bednar P. et al.** Constituents and antimicrobial properties of blue honeysuckle: a novel source for phenolic antioxidants. *J. Agric. Food Chem.*, 2008, no. 56, p. 11883–11889.
3. **Jurikova T., Rop O., Mlcek J. et al.** Phenolic profile of edible honeysuckle berries (genus *Lonicera*) and their biological effects. *Molecules*, 2012, vol. 17, p. 61–79.
4. **Boyarskikh I. G., Vasiliev V. G., Kukushkina T. A.** The content of flavonoids and hydroxycinnamic acids in *Lonicera caerulea* (Caprifoliaceae) in populations of Altai Mountains. *Rastit. Resur.*, 2014, iss. 1, p. 105–121. (in Russ.)
5. **Boyarskikh I. G., Chankina O. V., Khudyaev S. A., Syso A. I.** Investigating the elemental composition of a soil–plant system, based on the example of *Lonicera caerulea*. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2013, vol. 77 (2), p. 191–194. (in Russ.)
6. **Boyarskikh I. G., Chankina O. V., Syso A. I., Vasiliev V. G.** Trends in the content of chemical elements in leaves of *Lonicera caerulea* (Caprifoliaceae) in connection with their secondary metabolism in the natural populations of the Altai Mountains. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2015, vol. 79 (1), p. 94–97. (in Russ.)
7. **Kulipanov G. N., Mezentsev N. A., Pindyurin V. F.** Synchrotron radiation in Novosibirsk: The first 13 years. *Journal of Structural Chemistry*, 2016, vol. 57, no. 7, p. 1277–1287. DOI 10.1134/S0022476616070015
8. **Piminov P. A., Baranova G. N., Bogomyagkov A. V. et al.** Synchrotron radiation research and application at VEPP-4. *Physics Procedia*, 2016, vol. 84, p. 19–26. DOI 10.1016/j.phpro.2016.11.005
9. **Trounova V. A., Zolotarev K. V., Baryshev V. B., Phedorin M. A.** Analytical possibilities of SRXRF station at VEPP-3 SR source. *Nucl. Instr. Meth. Phys.*, 1998, vol. A405, p. 532–536.
10. **Arnautov N. A.** Standartnye obraztsy khimicheskogo sostava prirodnikh mineral'nykh veshchestv. Metodicheskie rekomendatsii (Nature Minerals: Standard Samples of Chemical Composition. Methodological Recommendations). Novosibirsk, 1990, 220 p. (in Russ.)
11. **Dariin A. V., Rakshun Ya. V.** Method of measurement during determination of the elemental composition of rock samples by X-ray fluorescence analysis using synchrotron radiation from the VEPP-3 storage ring. *Nauchn. Vestn. Novosib. Gos. Tekhn. Uni.*, 2013, vol. 2 (51), p. 112–118. (in Russ.)

12. **Kabata-Pendias A.** Trace Elements in Soils and Plants. 4th ed. CRC Taylor and Francis Group, 2011, 505 p.
13. **Horak O., Kinzel H.** Typen des Mineralstoffwechsel bei den höheren Pflanzen. *Osterr. Bot. Z.*, 1971, vol. 119, no. 4–5, p. 475–495.
14. **Falcone Ferreyra M. L., Rius S. P., Casati P.** Flavonoids: biosynthesis, biological functions, and biotechnological applications. *Front Plant Sci.*, 2012, vol. 3, p. 1–15.
15. **Michalak A.** Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress review. *Pol. J. Environ. Stud.*, 2006, vol. 15, p. 523–530.
16. **Edreva A., Velikova V., Tsonev T. et al.** Stress-protective role of secondary metabolites: diversity of functions and mechanisms. *Gen. Appl. Plant Physiol.*, 2008, vol. 34, p. 67–78.

Материал поступил в редколлегию

Received

02.09.2019

Сведения об авторах / Information about the Authors

Боярских Ирина Георгиевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Центральный сибирский ботанический сад СО РАН (ул. Золотодолинская, 101, Новосибирск, 630090, Россия)

Irina G. Boyarskikh, The Central Siberian Botanical Garden of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (101 Zolotodolinskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
irina_2302@mail.ru

Сысо Александр Иванович, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 8/2, Новосибирск, 630090, Россия)

Aleksandr I. Syso, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (8/2 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
syso@mail.ru

Чанкина Ольга Васильевна, научный сотрудник, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН (ул. Институтская, 3, Новосибирск, 630090, Россия)

Olga V. Chankina, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS (3 Institutetskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
chankina@ns.kinetics.nsc.ru

Элементный состав растений Горного Алтая

Е. П. Храмова¹, О. В. Чанкина², С. Я. Сыева³, В. А. Костикова¹
Я. В. Ракшун⁴, Д. С. Сороколетов⁴

¹ Центральный сибирский ботанический сад СО РАН
Новосибирск, Россия

² Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН
Новосибирск, Россия

³ Горно-Алтайский научно-исследовательский институт сельского хозяйства –
филиал Федерального Алтайского научного центра агробиотехнологий
Барнаул, Россия

⁴ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

Аннотация

Впервые проведены исследования элементного состава шести видов кустарников из трех семейств, произрастающих в Горном Алтае, и в образцах почв из мест их обитания методом РФА СИ. Наиболее высокое накопление макро- и микроэлементов свойственно растениям рода *Caragana* из сем. Fabaceae, низкое – представителям *Potentilla* и *Sibiraea* из сем. Rosaceae. Показано, что содержание Br, Y, Mo, Nb, Zr, Ti, Rb, Co, Sr, Fe, Ni и V в надземных органах представителей разных таксонов варьирует на высоком уровне (величина их соотношения $C_{\max}/C_{\min} > 5$), а содержание Mn, Cu и Pb – на малом ($1,5 \leq C_{\max}/C_{\min} \leq 2,5$) и очень малом уровне ($C_{\max}/C_{\min} \leq 1,5$).

Ключевые слова

элементный состав, рентгенофлуоресцентный анализ с синхротронным излучением, кустарники, Горный Алтай

Источник финансирования

Часть работы выполнена в ИЯФ СО РАН с использованием оборудования ЦКП "СЦСТИ" на базе УНУ "Комплекс ВЭПП-4М – ВЭПП-2000", в рамках государственного задания ЦСБС СО РАН «Оценка морфогенетического потенциала популяций растений Северной Азии экспериментальными методами», при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-44-040204 p_a.

Для цитирования

Храмова Е. П., Чанкина О. В., Сыева С. Я., Костикова В. А., Ракшун Я. В., Сороколетов Д. С. Элементный состав растений Горного Алтая // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 3. С. 86–96. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-86-96

The Element Composition of the Mountain Altai Plants

E. P. Khramova¹, O. V. Chankina², S. Ya. Syeva³, V. A. Kostikova¹
Ya. V. Rakshun⁴, D. S. Sorokoletov⁴

¹ The Central Siberian Botanical Garden SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

² Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

³ Federal Altai Scientific Center of Agrobiotechnologies, Russia, Barnaul
Barnaul, Russian Federation

⁴ Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

A study has been first made on the element composition of both the plants of six species, belonging to three families, growing in the Mountain Altai, and the samples of soil from their habitat using the method of X-ray fluorescence analysis, involving synchrotron radiation (SRXRF). The highest accumulation of macro- and microelements is typical of the representatives of *Caragana* of the *Fabaceae* family, the lowest content was recorded for the representatives of *Potentilla* and *Sibirea* of the *Rosaceae* family. The amount of elements - Br, Y, Mo, Nb, Zr, Ti, Rb, Co, Sr, Fe, Ni and V varies within a wide range ($C_{\max}/C_{\min} > 5$), Mn, Cu and Pb - within small ($1.5 \leq C_{\max}/C_{\min} \leq 2.5$) and with very small ($C_{\max}/C_{\min} \leq 1.5$) range.

Keywords

element composition, X-ray fluorescence analysis with synchrotron radiation, bushes, the Mountain Altai

Funding

The part of the work was done using the infrastructure of the Shared research facility "Siberian Synchrotron and Terahertz Radiation Center (SSTRC)" based on complex "VEPP-4 - VEPP-2000" of BINP SB RAS, and as part of the state assignment of the CSBG SB RAS "Estimation of the morphogenetic potential of plant populations of North Asia using experimental methods" and with partial supported by RFBR (Grant N 16-44-040204 p_a).

For citation

Khramova E. P., Chankina O. V., Syeva S. Ya., Kostikova V. A., Rakshun Ya. V., Sorokoletov D. S. The Element Composition of the Mountain Altai Plants. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 3, p. 86–96. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-86-96

Введение

Растения являются наилучшим источником макро- и микроэлементов и оказывают несомненный терапевтический эффект в лечении как человека, так и животных в усваиваемой форме и в наборе, свойственном живой природе в целом. Недостаток или избыток микроэлементов приводит к ряду эндемий.

Сведения по содержанию минеральных веществ кустарников *Potentilla*, *Sibirea*, *Caragana* и *Myricaria*, обитающих в Горном Алтае, в литературных источниках, на наш взгляд, отсутствуют либо носят разрозненный характер и не дают объективного представления о видах растений разных таксонов. Также следует учитывать, что в процессе эволюции у каждого вида растений генетически закрепились определенные концентрации химических элементов, что позволяет считать элементный состав растений важным систематическим признаком [1–5]. Растения, отобранные для изучения, принадлежат к 3-м семействам – *Rosaceae*, *Tamaricaceae* и *Fabaceae*, характеризуются высокой биологической активностью, используются в современной фармации, пищевой промышленности, а также служат кормовой базой для скота в Республике Алтай [6; 7].

Появление нового поколения измерительной аппаратуры позволяет определять в биологических объектах химические элементы почти всей периодической системы Д. И. Менделеева, роль и значение большинства из которых в жизни растений еще предстоит раскрыть.

В зарубежной и отечественной практике метод рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) биологических объектов используется редко, обычно для этих целей применяют другие аналитические методы (ААС, АЭА, ИСП-МС и др.) [8–10]. Однако растительный материал является наиболее сложным объектом в плане селективности, содержание элементов варьирует в широком диапазоне, а все эти методы подразумевают химическое или термическое воздействие на пробу, что не исключает потерю элементов при вскрытии или загрязнение материала реактивами [11]. Следует отметить несомненные преимущества РФА перед другими методами: неdestructивность, панорамность, возможность использования малых навесок, относительно несложная пробоподготовка, которые особенно важны при исследовании новых видов. Возможность одновременного определения многих элементов с достаточно высокой чувствительностью, хорошей точностью и воспроизводимостью [12–14] вкупе с относительной простотой обработки экспериментальных спектров позволяют достаточно оперативно получать данные о составе образцов.

Существенный вклад в развитие источников синхротронного излучения внес ИЯФ СО РАН (Новосибирск), а институты СО РАН – в развитие методов его применения для решения задач химии, катализа, биологии, геологии и материаловедения [15].

Сравнительно редкое использование метода РФА для анализа растительного материала связано, главным образом, с недостаточным количеством паспортизированных образцов, которые могут служить образцами сравнения при анализе методом «внешнего стандарта». Поэтому поиск оптимальных образцов сравнения (стандартов) может послужить развитию метода РФА. Использование синхротронного излучения (СИ) существенно улучшает возможности метода. Во-первых, высокая яркость источников СИ позволяет значительно сократить время набора экспериментального спектра, повысив экспрессность метода, а поляризация излучения увеличивает чувствительность, что важно при поиске оптимальных стандартов. Во-вторых, возможность перестройки энергии возбуждения в диапазоне рабочих энергий станции [16] открывает дополнительные перспективы при анализе концентрации тех химических элементов, которые могут служить маркерами различных видов растений¹.

Цель работы – выявление особенностей состава и содержания элементов видов растений разных таксонов, установление видов с высоким содержанием макро- и микроэлементов и оценка возможности использования растительных образцов в качестве стандартов.

Пробоподготовка и эксперимент

Материалом исследований служили образцы растений 6-ти видов растений из 3-х семейств, собранные в июле 2017 г.: *Potentilla fruticosa* L. (лапчатка кустарниковая) из сем. Rosaceae и *Myricaria longifolia* (Willd.) Ehrenb. (мирикария длиннолистная) из сем. Tamaricaceae собраны в Юго-Восточном Алтае в окрестности с. Бельтир (Кош-Агачский район) в долине р. Талдура ($H = 2\,084$ м над ур. м.). *Sibiraea altaiensis* (Laxm.) Schneid. (сибирка алтайская) из сем. Rosaceae встречается в России только на территории Алтая, является эндемиком. Образцы собраны в 2-х популяциях в Центральном Алтае: в Онгудайском районе в окрестности с. Ело в урочище Берозёк в долине р. Ело ($H = 1\,250$ м над ур. м.) и в Усть-Коксинском районе в окрестности с. Сугаш, в отрогах Коргонского хребта у подножья Кырлыкского перевала ($H = 1\,270$ м над ур. м.). Растения рода *Caragana* из сем. Fabaceae представлены 3-мя видами: *Caragana bungei* Ledeb. (карагана Бунге), *Caragana pygmaea* (L.) DC. subsp. *altaica* (Kom.) Bongareva (карагана алтайская), произрастающие в Юго-Восточном Алтае в Чуйской степи в окрестности с. Кош-Агач ($H = 2\,207$ м над ур. м.), и *Caragana pygmaea* (L.) DC (карагана карликовая), обитающая в окрестности с. Чуй-Оозы Онгудайского района.

¹ Экспериментальная станция: <http://ssrc.inp.nsk.su/CKP/stations/passport/3/>.

Анализировали листья и стебли кустарников *Potentilla*, *Sibireae*, *Caragana* и *Myricaria*, а также образцы почв из 4-х местообитаний изучаемых растений. Средний образец составляли 20–30 особей в стадии цветения – начала плодоношения. Образцы почвы были взяты из корнеобитаемого слоя (10–15 см) общеизвестным методом «конверта» согласно ГОСТу 17.4.4.02-2017².

Навеску воздушно-сухого растительного сырья и почв (1 г) измельчали в агатовой ступке. Затем образцы прессовали в форме таблетки диаметром ~ 1 см, весом 30 мг (с поверхностной плотностью 0,04 г/см²). Определение элементов проводили методом РФА СИ на станции элементного анализа (накопитель ВЭПП-3) Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения ИЯФ СО РАН. Измерения образцов проводились при энергии возбуждающего излучения 23 кэВ, время каждого измерения составляло от 300 до 500 с для растительных и почвенных навесок. Монохроматизация синхротронного излучения осуществлялась при помощи монохроматора на основе кремниевого кристалла типа «бабочка» с рабочими плоскостями (111). Регистрация флуоресцентного излучения осуществлялась при помощи детектора PentaFET (Oxford Instruments) с энергетическим разрешением ~ 135 эВ (на K α линии Fe – 5,9 кэВ). Основные характеристики экспериментальной станции и методические аспекты работы описаны в [16].

Обработка полученных спектров проводилась в программе AXIL методом наименьших квадратов. Концентрация элементов была определена с использованием метода «внешнего стандарта». Предел обнаружения составлял от 10⁻⁸ г/г. В качестве образцов сравнения использовали российские стандарты травяно-злаковой смеси ГСО СОРМ1 и байкальского ила БИЛ-1 [17]. Величина ошибки – воспроизводимость результатов анализа получена путем измерения 10-ти параллельных измерений стандартного образца СОРМ1 и 5-ти – образца БИЛ-1 в 3-х повторностях одинаковых образцов. Для большинства элементов в растительных образцах воспроизводимость по образцу СОРМ1 колебалась в основном в пределах 5–11 %, для титана, ванадия и иттрия – 19–26 %, для свинца, кобальта, ниобия и никеля – 35–40 %, для хрома – 64 %. При этом предел обнаружения составлял 0,01–0,07 ppm для Co, Br, Mo, Rb и Pb, 0,1–0,9 ppm – для Sr, Cu, Zn, Ni, Zr, Fe Mn и свыше 1 ppm для остальных элементов. Для стандартного образца БИЛ-1 воспроизводимость варьировала для большинства элементов от 3 до 12 %, для Pb и Mo – 14 %, для Zr – 16 %. Предел обнаружения Mo, Nb, Co, Zr, Sr, Br, Y, Rb и Pb составил от 0,1 до 0,5 ppm, для остальных элементов – выше 1 ppm.

Результаты и обсуждение

При анализе различий между образцами почв из разных местообитаний использовали отношения максимальных и минимальных значений содержания *i*-го элемента ($v = C_{\max}/C_{\min}$), характеризующие ширину выборки (рис. 1). Наименьшую изменчивость в этом плане представляют концентрации Ti, K, Cr, Pb, Fe, Mn и Co, наибольшую – Br, As и Mo. Количественной мерой различий послужили отношения кларков элементов, предложенные Н. С. Касимовым и Д. В. Власовым [18]. По величине показателя химические элементы разделены ими на 4 группы с большим ($C_{\max}/C_{\min} > 5$), средним ($2,5 \leq C_{\max}/C_{\min} \leq 5$), малым ($1,5 \leq C_{\max}/C_{\min} \leq 2,5$) и очень малым ($C_{\max}/C_{\min} \leq 1,5$) диапазоном.

По высокому содержанию Br (17 мг/кг) и Mo (0,7 мг/кг) выделяются почвы местообитаний *P. fruticosa*, As (20–50 мг/кг) – *C. bungei* и *C. pygmaea subsp. altaica* (табл. 1). Содержание остальных элементов в образцах достаточно стабильно, различия варьируют в диапазоне 1,5–2,5 раза.

² ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.

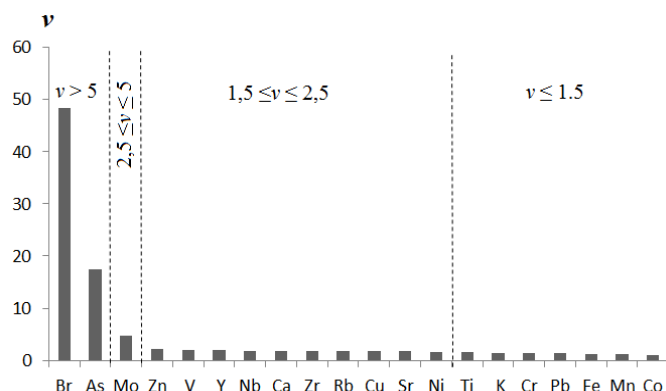


Рис. 1. Соотношения максимальных к минимальным значениям концентраций ($v = C_{\max}/C_{\min}$) в образцах почв из разных местообитаний растений

Fig. 1. Ratios of maximal and minimal concentrations ($v = C_{\max}/C_{\min}$) in the samples of soil taken from the different ecotopes of plants

Таблица 1

Содержание элементов в почве из точек отбора растений в Горном Алтае
(K, Ca, Fe даны в мг/г от сухой массы, остальные элементы – мг/кг)

Table 1

Contents of elements in the soils of the habitats of the Mountain Altai plants
(K, Ca, and Fe are given in mg/g of dry solid matter, the other elements are in mg/kg)

Элемент	Точки отбора почвенных образцов			
	№ 1 ¹	№ 2	№ 3	№ 4
K	18 ± 1 ²	12 ± 1	14 ± 1	12 ± 1
Ca	36 ± 3	21 ± 2	38 ± 3	28 ± 2
Ti	2916 ± 146	2145 ± 107	3253 ± 163	3211 ± 161
V	65 ± 5	46 ± 4	94 ± 8	66 ± 5
Cr	43 ± 3	36 ± 2	49 ± 3	47 ± 3
Mn	701 ± 28	579 ± 23	675 ± 27	724 ± 29
Fe	27 ± 1	23 ± 1	29 ± 1	26 ± 1
Co	12 ± 1	11 ± 1	12 ± 1	12 ± 1
Ni	36 ± 1	32 ± 1	25 ± 1	41 ± 2
Cu	33 ± 2	20 ± 1	26 ± 1	19 ± 1
Zn	82 ± 4	39 ± 2	52 ± 3	52 ± 3
As	6,0 ± 0,2	2,8 ± 0,1	49,7 ± 1,5	20,0 ± 0,6
Br	16,9 ± 1,4	0,4 ± 0,0	1,0 ± 0,1	1,6 ± 0,1
Rb	60 ± 5	35 ± 3	59 ± 5	62 ± 6
Sr	234 ± 16	200 ± 14	160 ± 11	133 ± 9
Y	27 ± 3	17 ± 2	18 ± 2	33 ± 4
Zr	141 ± 23	131 ± 21	80 ± 13	112 ± 18
Nb	8 ± 1	6 ± 1	5 ± 0	9 ± 1
Mo	0,7 ± 0,1	0,2 ± 0,0	0,3 ± 0,0	0,2 ± 0,0
Pb	18 ± 2	17 ± 2	13 ± 2	13 ± 2

¹ Местообитание растений: № 1 – *Potentilla fruticosa*; № 2 – *Myricaria longifolia*; № 3 – *Caragana bungei*; № 4 – *Caragana pygmaea subsp. altaica* [Plant habitats: 1 – *Dasiphora fruticosa*; 2 – *Myricaria longifolia*; 3 – *Caragana bungei*; 4 – *Caragana pygmaea subsp. altaica*]

² Среднее значение ± стандартное отклонение [Mean value ± standard deviation].

Сравнительный анализ содержания элементов в листьях растений показал, что в меньшей мере варьирует содержание Mn (рис. 2). В малом диапазоне изменяется концентрация Pb ($v = 2,3$), на среднем уровне варьируют Cr, As, Ca, Zn Cu и K. Количество остальных элементов колеблется в широком диапазоне ($v > 5$). По наибольшему содержанию Y и Cr выделяют листья *M. longifolia*, Br, Mo, Sr, Cu Ca – листья *C. pygmaea*, Fe, Ti, Co, Ni, Zn, Rb и Zn – листья *C. pygmaea subsp. altaica* (табл. 2). Наибольшая сумма макроэлементов (K + Ca) установлена в листьях *S. altaiensis* вне зависимости от местообитания (35–37 мг/г), наименьшая (16 мг/г) – в листьях *P. fruticosa*. По максимальному суммарному содержанию микроэлементов в листьях выделяется *C. pygmaea subsp. altaica* (1 126 мг/кг), несколько ниже в листьях *C. pygmaea* и *M. longifolia* (768 и 688 мг/кг соответственно). Минимальная сумма микроэлементов обнаружена в листьях *S. altaiensis* (351 мг/кг).

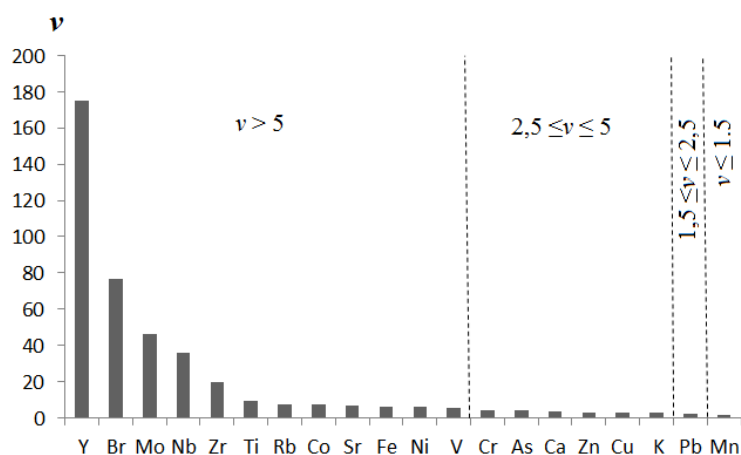


Рис. 2. Соотношения максимальных к минимальным значениям концентраций ($V = C_{\max}/C_{\min}$) в листьях растений

Fig. 2. Ratio between maximal and minimal concentrations ($V = C_{\max}/C_{\min}$) in plant leaves

Таблица 2

Содержание элементов в листьях и стеблях растений Горного Алтая
(K и Ca даны в мг/г от сухой массы, остальные элементы – мг/кг)

Table 2

Content of elements in the leaves and stems of the Mountain Altai plants
(K and Ca are given in mg/g of dry solid matter, the other elements are in mg/kg)

Элемент	<i>P. fruticosa</i>	<i>S. altaiensis</i> ¹	<i>S. altaiensis</i> ²	<i>M. longifolia</i>	<i>C. bungei</i>	<i>C. pygmaea</i>	<i>C. pygmaea subsp. altaica</i>
Листья [Leaves]							
K	8 ± 0^3	17 ± 1	21 ± 1	12 ± 1	16 ± 1	9 ± 0	11 ± 1
Ca	7 ± 1	17 ± 1	16 ± 1	10 ± 1	18 ± 1	26 ± 2	13 ± 1
Ti	14 ± 4	9 ± 2	7 ± 2	8 ± 2	5 ± 1	7 ± 2	44 ± 2
V	$0,1 \pm 0,0$	$0,5 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,0$	$0,3 \pm 0,1$
Cr	н.о. ⁴	н.о.	н.о.	5 ± 3	н.о.	н.о.	4 ± 3

Окончание табл. 2

Элемент	<i>P. fruticosa</i>	<i>S. altaiensis</i> ¹	<i>S. altaiensis</i> ²	<i>M. longifolia</i>	<i>C. bungei</i>	<i>C. pygmaea</i>	<i>C. pygmaea</i> subsp. <i>altaica</i>
Mn	80 ± 3	102 ± 4	87 ± 3	72 ± 3	77 ± 3	95 ± 4	102 ± 4
Fe	222 ± 9	146 ± 6	114 ± 5	304 ± 12	178 ± 7	179 ± 7	726 ± 29
Co	0,1 ± 0,0	н.о.	н.о.	0,1 ± 0,0	н.о.	н.о.	0,2 ± 0,1
Ni	1,6 ± 0,6	0,8 ± 0,3	0,8 ± 0,3	4,1 ± 1,6	2,1 ± 0,8	3,2 ± 0,1	4,6 ± 0,2
Cu	4,9 ± 0,2	4,9 ± 0,2	5,9 ± 0,3	9,3 ± 0,5	5,3 ± 0,3	13,3 ± 0,7	7,1 ± 0,4
Zn	25 ± 1	20 ± 1	27 ± 1	21 ± 1	23 ± 1	48 ± 2	54 ± 3
As	0,1 ± 0,0	0,6 ± 0,0	0,5 ± 0,0	0,3 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,5 ± 0,0	0,4 ± 0,0
Br	1,1 ± 0,1	0,3 ± 0,0	0,3 ± 0,03	10,8 ± 0,9	2,2 ± 0,2	20,5 ± 1,6	7,5 ± 0,6
Rb	14 ± 1	5 ± 0	5 ± 0	26 ± 2	6 ± 1	4 ± 0	28 ± 2
Sr	83 ± 6	57 ± 4	97 ± 7	189 ± 13	70 ± 5	386 ± 27	128 ± 9
Y	0,8 ± 0,1	1,1 ± 0,1	н.о.	33 ± 4	н.о.	0,4 ± 0,0	2,1 ± 0,2
Zr	4,3 ± 0,7	0,7 ± 0,1	1,1 ± 0,2	3,2 ± 0,5	3,7 ± 0,6	5,7 ± 0,9	13,3 ± 2,1
Nb	1,0 ± 0,1	1,6 ± 0,1	1,0 ± 0,1	н.о.	0,2 ± 0,0	0,1 ± 0,0	2,1 ± 0,2
Mo	0,4 ± 0,0	0,6 ± 0,1	0,7 ± 0,1	0,4 ± 0,0	н.о.	1,5 ± 0,1	0,1 ± 0,0
Pb	0,9 ± 0,1	1,0 ± 0,1	1,1 ± 0,2	1,7 ± 0,2	0,9 ± 0,1	1,9 ± 0,3	2,0 ± 0,3
Стебли [Stems]							
K	11 ± 1	7 ± 0	6 ± 0	13 ± 1	16 ± 1	12 ± 1	8 ± 0
Ca	6 ± 0	8 ± 1	6 ± 0	3 ± 0	21 ± 2	19 ± 1	23 ± 2
Ti	13 ± 1	10 ± 1	5 ± 0	5 ± 0	24 ± 1	10 ± 0	68 ± 3
V	0,4 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,1 ± 0,0	0,7 ± 0,1
Cr	1,4 ± 0,9	2,0 ± 1,3	0,6 ± 0,4	1,0 ± 0,6	6,3 ± 0,4	2,0 ± 1,3	7,4 ± 0,4
Mn	64 ± 3	37 ± 1	35 ± 1	17 ± 1	36 ± 1	56 ± 2	85 ± 3
Fe	162 ± 6	78 ± 3	59 ± 2	94 ± 4	371 ± 15	282 ± 11	1029 ± 41
Co	0,04 ± 0,01	0,04 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,04 ± 0,02	0,11 ± 0,04	0,08 ± 0,03	0,33 ± 0,12
Ni	1,7 ± 0,1	0,7 ± 0,0	0,8 ± 0,0	5,0 ± 0,2	6,6 ± 0,3	6,9 ± 0,3	4,5 ± 0,2
Cu	5,9 ± 0,3	4,5 ± 0,2	4,6 ± 0,2	8,3 ± 0,4	5,3 ± 0,3	7,7 ± 0,4	6,4 ± 0,3
Zn	40 ± 2	29 ± 1	25 ± 1	15 ± 1	28 ± 1	32 ± 2	44 ± 2
As	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0	1,1 ± 0,0	0,3 ± 0,1	0,4 ± 0,01	0,1 ± 0,0	0,4 ± 0,0
Br	3,9 ± 0,3	0,04 ± 0,0	0,1 ± 0,0	11,7 ± 0,9	6,2 ± 0,5	30,4 ± 2,4	7,2 ± 0,6
Rb	22 ± 2	4 ± 0	3 ± 0	20 ± 2	5 ± 0	4 ± 0	18 ± 2
Sr	110 ± 8	46 ± 3	64 ± 4	82 ± 6	91 ± 6	246 ± 17	200 ± 15
Y	1,5 ± 0,2	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,01	3,8 ± 0,5	0,7 ± 0,1	0,4 ± 0,0	4,5 ± 0,6
Zr	4,6 ± 0,7	0,3 ± 0,0	0,4 ± 0,1	2,2 ± 0,4	7,0 ± 1,1	8,5 ± 1,4	21,8 ± 3,5
Nb	0,4 ± 0,0	2,4 ± 0,2	1,5 ± 0,1	0,1 ± 0,0	1,5 ± 0,1	0,5 ± 0,0	1,5 ± 0,1
Mo	0,2 ± 0,0	0,3 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,1 ± 0,0	4,8 ± 0,5	0,5 ± 0,1
Pb	0,6 ± 0,1	1,0 ± 0,1	1,5 ± 0,2	1,3 ± 0,2	1,7 ± 0,2	1,0 ± 0,1	2,2 ± 0,3

¹ Растения собраны в Усть-Коксинском районе [Plants collected in Ust-Koksinsky district].² Растения собраны в Онгудайском районе [Plants collected in Ongudai district].³ Среднее значение ± стандартное отклонение [Mean value ± standard deviation].⁴ н.о. – концентрация элемента ниже предела обнаружения (0,01 мг/кг) [b.l. is element concentration below the detection limit (0,1mg/kg)].

В стеблях разных видов растений содержание Cu варьирует на малом уровне ($v = 1,8$), а остальных элементов – на среднем и высоком (рис. 3). Наиболее значительные различия отмечены в содержании Br, Zr, Y, Mo в стеблях растений, максимальное накопление этих элементов свойственно представителям рода *Caragana*. В целом наибольшая сумма макроэлементов (K + Ca) отмечена в стеблях растений рода *Caragana*, а наименьшая – в стеблях *S. altaiensis*. Суммарное содержание микроэлементов также выше в стеблях растений рода *Caragana*, ниже – в стеблях *S. altaiensis* по сравнению с остальными видами.

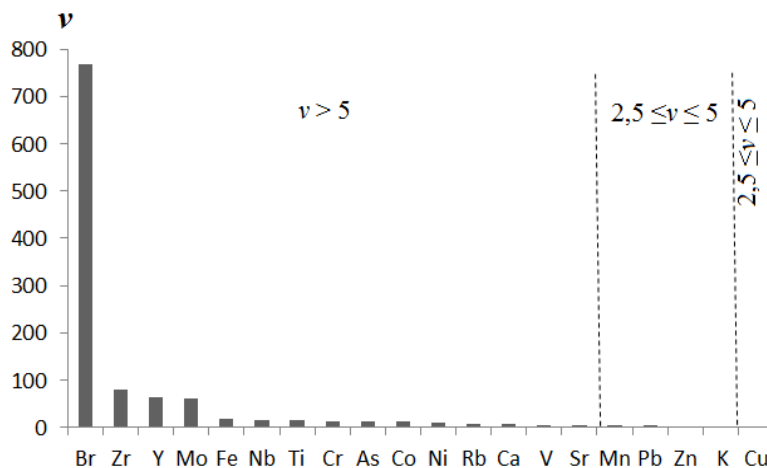


Рис. 3. Соотношения максимальных к минимальным значениям концентраций ($V = C_{\max}/C_{\min}$) в стеблях растений

Fig. 3. Ratio of maximal and minimal concentrations ($V = C_{\max}/C_{\min}$) in plant stems

Таким образом, установлено, что содержание большинства химических элементов в надземных органах представителей разных таксонов варьирует на высоком уровне. По высокому содержанию Ca, Fe, Sr, Mn, Zn, Ti, Zr, Mo и Co выделяются листья и стебли растений рода *Caragana*, преимущественно *C. pygmaea subsp. altaica*; по Y, Rb, Br, Cu, Cr и Ni – листья *M. longifolia*, K – листья *S. altaiensis*. Различия в содержании элементов в надземных органах у видов растений разных таксонов зависят от множества факторов, в том числе связаны с содержанием элементов в почве и таксономической принадлежностью.

Можно заключить, что наиболее высокое накопление макро- и микроэлементов свойственно представителям рода *Caragana* из сем. *Fabaceae*, низкое – представителям *Potentilla* и *Sibiraea* из сем. *Rosaceae*, произрастающих в обследованных местообитаниях Юго-Восточного и Центрального Алтая.

Полученные данные по содержанию 20 элементов в образцах различных видов растений достоверны и могут быть включены в базы данных химического состава растений.

Список литературы

1. Ильин В. Б., Сысо А. И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 231с.
2. Чупарина Е. В., Гуничева Т. Н. Состояние и проблемы рентгенофлуоресцентного анализа растительных материалов // Аналитика и контроль. 2004. Т. 8, № 3. С. 211–226.
3. Рождественская Т. А., Ельчинова О. А., Пузанов А. В. Элементный химический состав растений Горного Алтая и факторы, его определяющие // Биоразнообразие, про-

- блемы экологии Горного Алтая и сопредельных территорий: настоящее, прошлое и будущее: Материалы Междунар. конф. Горно-Алтайск, 2008. С. 110–114.
4. **Алексеева-Попова Н. В., Дроздова И. В.** Микроэлементный состав растений полярного Урала в контрастных геохимических условиях // *Экология*. 2013. № 2. С. 90–98.
 5. **Watanabe T., Broadley M. R., Jansen S., White P. J., Takada J., Satake K., Takamatsu T., Tuah S. J., Osaki M.** Evolutionary control of leaf element composition in plants. *New Phytologist.*, 2007, vol. 174, p. 516–523.
 6. Растительные ресурсы России: Дикорастущие цветковые растения, их компонентный состав и биологическая активность. Семейства Actinidiaceae – Malvaceae, Euphorbiaceae – Haloragaceae / Отв. ред. А. Л. Буданцев. СПб.; М.: Тов-во научных изданий КМК, 2009. Т. 2. С. 207–208.
 7. Растительные ресурсы России: Дикорастущие цветковые растения, их компонентный состав и биологическая активность. Семейства Fabaceae – Apiaceae / Отв. ред. А. Л. Буданцев. СПб.; М.: Тов-во научных изданий КМК, 2009. Т. 3. С. 28.
 8. **Masson P., Dalix T. & Bussière S.** Determination of Major and Trace Elements in Plant Samples by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, vol. 41, no. 3, p. 231–243. DOI 10.1080/00103620903460757
 9. **Yildiz D., Kula I., Ay G., BaslaR S. and Dogan Y.** Determination of Trace Elements in the Plants of Mt. Bozdag, Izmir, Turkey. *Arch. Biol. Sci.*, 2010, vol. 62 (3), p. 731–738. DOI 10.2298/ABS1003731Y
 10. **Отмахов В. И., Рабцевич Е. С., Петрова Е. В., Шилова И. В., Шелег Е. С., Бабенков Д. Е.** Элементный анализ лекарственных растений Сибири методом дуговой атомно-эмиссионной спектроскопии с многоканальным анализатором эмиссионных спектров // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2019. Т. 85 (1 (II)). С. 60–66. DOI 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-60-66
 11. **Чупарина Е. В., Мартынов А. М.** Применение неструктивного РФА для определения элементного состава лекарственных растений // *Журнал аналитической химии*. 2011. Т. 66, № 4. С. 399–405.
 12. **Мазалов Л. Н.** Рентгеновские спектры. Новосибирск: ИНХ СО РАН, 2003. 329 с.
 13. **Trunova V. A., Sidorina A. V., Zolotarev K. V.** Using external standard method with absorption correction in SRXRF analysis of biological tissues. *X-ray spectrometry*, 2015, vol. 44, no. 4, p. 226–229.
 14. **Piminov P. A., Baranov G. N., Bogomyagkov A. V. et al.** Synchrotron Radiation Research and Application at VEPP-4. *Physics Procedia*, 2016, vol. 84, p. 19–26.
 15. **Kulipanov G. N., Mezentsev N. A., Pindyurin V. F.** Synchrotron radiation in Novosibirsk: The first 13 years. *Journal of Structural Chemistry*, 2016, vol. 57, no. 7, p. 1277–1287.
 16. **Дарьин А. В., Ракшун Я. В.** Методика выполнения измерений при определении элементного состава образцов горных пород методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. 2013. № 2 (51). С. 112–118.
 17. **Арнаутов Н. А.** Стандартные образцы химического состава природных минеральных веществ: Метод. рекомендации. Новосибирск, 1990. 220 с.
 18. **Касимов Н. С., Власов Д. С.** Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // *Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География*. 2015. № 2. С. 7–17.

References

1. **И'ин В. В., Сысо А. И.** Mikrojelementy i tjazhelye metally v pochvah i rastenijah Novosibirskoj oblasti. Novosibirsk, Nauka, 2001. 231 p. (in Russ.)

2. **Chuparina E. V., Gunicheva T. N.** Sostojanie i problemy rentgenofluorescentnogo analiza rastitel'nyh materialov [State and Problems of X-Ray fluorescence analysis of Plants materials]. *Analitika & kontrol'*, 2004, vol. 8, № 3, p. 211–226. (in Russ.)
3. **Rozhdestvenskaya T. A., El'chinina O. A., Puzanov A. V.** Elementnyj himicheskij sostav rastenij Gornogo Altaya i faktory, ego opredelyayushchie // Bioraznoobrazie, problemy jekologii Gornogo Altaja i sopredel'nyh territorij: nastojashhee, proshloe i budushhee: materialy mezhdunar. konf. Gorno-Altajsk, 2008, p. 110–114. (in Russ.)
4. **Alexeeva-Popova N. V., Drozdova I. V.** Micronutrient composition of plants in the Polar Urals under contrasting geochemical conditions. *Russian Journal of Ecology*, 2013, № 2, p. 90–98. (in Russ.)
5. **Watanabe T., Broadley M. R., Jansen S., White P. J., Takada J., Satake K., Takamatsu T., Tuah S. J., Osaki M.** Evolutionary control of leaf element composition in plants. *New Phytologist.*, 2007, vol. 174, p. 516–523.
6. Rastitel'nye resursy Rossii: Dikorastushhie cvetkovye rastenija, ih komponentnyj sostav i biologicheskaja aktivnost'. Semejstva Actinidiaceae – Malvaceae, Euphorbiaceae – Haloragaceae Vol. 2. A. L. Budancev editor. St. Peterburg: Moscow: Tovarishestvo nauchnyh izdanij KMK, 2009, p. 207–208. (in Russ.)
7. Rastitel'nye resursy Rossii: Dikorastushhie cvetkovye rastenija, ih komponentnyj sostav i biologicheskaja aktivnost'. Semejstva Fabaceae – Apiaceae. Vol. 3. A. L. Budancev editor. St. Peterburg: Moscow: Tovarishestvo nauchnyh izdanij KMK, 2010, p. 28. (in Russ.)
8. **Masson P., Dalix T. & Bussière S.** Determination of Major and Trace Elements in Plant Samples by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, vol. 41, no. 3, p. 231–243. DOI 10.1080/00103620903460757
9. **Yildiz D., Kula I., Ay G., BaslaR S. and Dogan Y.** Determination of Trace Elements in the Plants of Mt. Bozdag, Izmir, Turkey. *Arch. Biol. Sci.*, 2010, vol. 62 (3), p. 731–738. DOI 10.2298/ABS1003731Y
10. **Otmakhov V. I., Rabtsevich E. S., Petrova E. V., Shilova I. V., Sheleg E. S., Babenkov D. E.** Elemental analysis of Siberian medicinal plants using arc atomic emission spectrometry with a multichannel analyzer of emission spectra. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, 2019, vol. 85 (1 (II)), p. 60–66. (in Russ.) DOI 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-60-66
11. **Chuparina E. V., Martynov A. M.** Application of Nondestructive X-Ray Fluorescence Analysis to Determine the Element Composition of Medicinal Plants. *Journal of Analytical Chemistry*, 2011, vol. 66, № 4, p. 399–405. (in Russ.)
12. **Mazalov L. N.** Rentgenovskie spektry. Novosibirsk, 2003, 329 p. (in Russ.)
13. **Trunova V. A., Sidorina A. V., Zolotarev K. V.** Using external standard method with absorption correction in SRXRF analysis of biological tissues. *X-ray spectrometry*, 2015, vol. 44, no. 4, p. 226–229.
14. **Piminov P. A., Baranov G. N., Bogomyagkov A. V. et al.** Synchrotron Radiation Research and Application at VEPP-4. *Physics Procedia*, 2016, vol. 84, p. 19–26.
15. **Kulipanov G. N., Mezentsev N. A., Pindyurin V. F.** Synchrotron radiation in Novosibirsk: The first 13 years. *Journal of Structural Chemistry*, 2016, vol. 57, no. 7, p. 1277–1287.
16. **Darin A. V., Rakshun Y. V.** Metodika vypolnenija izmerenij pri opredelenii jelementnogo sostava obrazcov gornyh porod metodom rentgenofluorescentnogo analiza s ispol'zovaniem sinhrotronnogo izlucheniya iz nakopitelja VJePP-3 [Method of measurement during determination of the elemental composition of rock samples by X-ray fluorescence analysis using synchrotron radiation from the VEPP-3 storage ring]. *Scientific Bulletin of the Novosibirsk State University*, 2013, № 2 (51), p. 112–118. (in Russ.)
17. **Arnautov N. A.** Standartnye obrazcy himicheskogo sostava prirodnyh mineral'nyh veshhestv. Metodicheskie rekomendacii. Novosibirsk, 1990, 220 p. (in Russ.)

18. **Kasimov N. S., Vlasov D. V.** Klarki himicheskikh jelementov kak jetalony sravnenija v eko-geohimii. [Clarkes of chemical elements as comparison standards in ecogeochemistry]. *Moscow University Bulletin. Series 5. Geography*, 2015, № 2, p. 7–17. (in Russ.)

Материал поступил в редколлегию

Received

02.09.2019

Сведения об авторах / Information about the Authors

Храмова Елена Петровна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Центральный сибирский ботанический сад СО РАН (ул. Золотодолинская, 101, Новосибирск, 630090, Россия)

Elena P. Khramova, Central Siberian Botanical Gardens SB RAS (101 Zolotodolinskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

khramova@ngs.ru

Чанкина Ольга Васильевна, научный сотрудник, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН (ул. Институтская, 3, Новосибирск, 630090, Россия)

Olga V. Chankina, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS (3 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

chankina@ns.kinetics.nsc.ru

Сыева Серафима Яковлевна, кандидат биологических наук, руководитель филиала, Горно-Алтайский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий» (ул. Катунская, 2, с. Майма, Республика Алтай, 649100, Россия)

Serafima Ya. Syeva, Gorno-Altay research Institute of agriculture – branch of Federal Altai Scientific Centre of Agro-BioTechnologies (Maima village, Altai Republic, Russian Federation)

serafima-altai@mail.ru

Костикова Вера Андреевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Центральный сибирский ботанический сад СО РАН (ул. Золотодолинская, 101, Новосибирск, 630090, Россия)

Vera A. Kostikova, Central Siberian Botanical Gardens SB RAS (101 Zolotodolinskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

serebryakovava@mail.ru

Ракшун Яков Валерьевич, кандидат физико-математических наук, ученый секретарь, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Yakov V. Rakshun, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

Ya.V.Rakshun@inp.nsk.su

Сороколетов Дмитрий Сергеевич, младший научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Dmitry S. Sorokoletov, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

Использование метода РФА СИ в исследовании экологического состояния техногенной среды в Новосибирской области

**Л. Л. Седельникова¹, Е. П. Храмова¹, О. В. Чанкина²
Я. В. Ракшун³, Д. С. Сороколетов³**

¹ *Центральный сибирский ботанический сад СО РАН
Новосибирск, Россия*

² *Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН
Новосибирск, Россия*

³ *Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия*

Аннотация

С помощью метода рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА СИ) определен элементный состав в почвах и растениях *Heimerocallis hybrida* hort., произрастающих в местах с разным уровнем загрязнения в Новосибирской области. Выявлено, что основными элементами-загрязнителями в техногенной среде, накапливающимися в избыточной концентрации в листьях и корневищах растений, являются свинец, никель, цинк, железо, титан и хром. Методом РФА СИ получены достоверные данные по содержанию 20 микро- и макроэлементов в растениях *Heimerocallis hybrida* в различных промышленно-транспортных условиях загрязнения.

Ключевые слова

РФА СИ, элементный состав, почва, лист, корневище, *Heimerocallis hybrida*, урбанизированная среда

Источник финансирования

Работа выполнена с использованием инфраструктуры ЦКП «СЦСТИ» на базе ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН, под держанного Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEF162117X0012). Исследование выполнено в рамках государственного задания ЦСБС СО РАН № АААА-А17-1170126100053-9 с использованием биоресурсной научной коллекции ЦСБС СО РАН USU 440534.

Для цитирования

Седельникова Л. Л., Храмова Е. П., Чанкина О. В., Ракшун Я. В., Сороколетов Д. С. Использование метода РФА СИ в исследовании экологического состояния техногенной среды в Новосибирской области // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 3. С. 97–108. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-97-108

SR XRF Method Used to Study the Ecological State of Technogenic Surroundings in the Novosibirsk Region

L. L. Sedelnikova¹, E. P. Khramova¹, O. V. Chankina²
Ya. V. Rakshun³, D. S. Sorokoletov³

¹ The Central Siberian Botanical Garden SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

² Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

³ Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

The method of X-ray fluorescence analysis involving synchrotron radiation (SR XRAF) is used to determine the element composition of soil and plants *Heimerocallis hybrida* hort., growing in the places of different pollution level in the Novosibirsk Oblast. It has been established that the main element pollutants of a technogenic environment, accumulated in excess concentrations in plant leaves and rhizomes are lead, nickel, iron, titanium, and chromium. The SR XRF method provides the reliable data on the content of 20 micro- and macroelements of the plants *Heimerocallis hybrida*, in the various industrial and transport conditions of pollution.

Keywords

RFA SI, elemental composition, soil, leaf, rhizome, *Heimerocallis hybrida*, urban environment

Funding

The work was carried out using the infrastructure of the CCP “SCS” on the basis of VEPP-3 of the INP SB RAS, supported by the Ministry of education and science of Russia (unique project ID RFMEF 162117X0012). The study was carried out within the framework of the state task of the CSBs SB RAS No. AAAAA 17-1170126100053-9, using the bioresource scientific collection of the CSBs SB RAS USU 440534.

For citation

Sedelnikova L. L., Khramova E. P., Chankina O. V., Rakshun Ya. V., Sorokoletov D. S. SR XRF Method Used to Study the Ecological State of Technogenic Surroundings in the Novosibirsk Region. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 3, p. 97–108. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-97-108

Исследование элементного состава растений, произрастающих в крупных мегаполисах, при использовании современного метода РФА СИ [1; 2] дает объективную оценку состояния экологического загрязнения, поскольку растения выполняют важную роль в биосфере, аккумулируя макро- и микроэлементы из окружающей среды. В современных условиях урбанизированная среда подвержена комбинированному промышленно-транспортному загрязнению [3–7]. В ее очищении от избытка элементов, к числу которых относятся тяжелые металлы – наиболее распространенные и опасные для биоты загрязнители, решающее значение имеют зеленые насаждения. Экспрессность, панорамность, неdestructивность использования метода РФА СИ позволяет выявить специфику накопления химических элементов органами растений, что вносит в исследование новизну и актуальность на современном этапе развития техногенных территорий.

Цель работы заключалась в определении элементного состава растений *Heimerocallis hybrida* и почвы в местах их выращивания с разным уровнем загрязнения в Новосибирской области методом РФА СИ.

Пробоподготовка и эксперимент

Материалом исследования служили растения *Heimerocallis hybrida* hort. (сем. *Heimerocallidaceae* R. Br.) (сорт *Speak to me*), произрастающие на семи участках в 50 м от проезжих дорог в городах Новосибирск (Советский район), Бердск (город-спутник Новосибирска) и поселке городского типа Кольцово (Новосибирская обл.), различающихся по уровню про-

мышленно-транспортного загрязнения. Участок 1 – ул. Белокаменная, микрорайон Южный (Бердск); 2 – ул. Боровая (Бердск); 3 – ул. Векторное шоссе вблизи Научно-производственного объединения «Вектор» (п.г.т. Кольцово); 4 – ул. Промзона (п.г.т. Кольцово); 5 – ул. Софийская (левый берег в районе Новосибирской ГЭС вблизи ФГУП Опытный завод СО РАН, Новосибирск, Советский район); 6 – пересечение ул. Русской и Бердского шоссе (микрорайон Шлюз, Новосибирск, Советский район); 7 – ул. Плотинная (вблизи завода железобетонных изделий (ЗЖБИ), Новосибирск, Советский район); контроль – участок ЦСБС СО РАН, расположенный в зоне благоприятной экологической ситуации. Образцы почв взяты из слоя 0–15 см – основной зоны минерального питания, по общепринятой методике [8].

Для определения содержания элементов осенью одновременно брали среднюю пробу листьев, корневищ и почвы из каждого участка. Навеску воздушно-сухого растительного сырья и почв (1 г) измельчали в агатовой ступке. Далее образцы прессовали в форме таблетки диаметром ~ 1 см, весом 30 мг (с поверхностной плотностью 0,04 г/см²). Определение элементов проводили методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА СИ) на станции элементного анализа (накопитель ВЭПП-3) Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН [9]. Данный метод имеет ряд преимуществ при исследовании элементов: возможность монохроматизации, наличие поляризации пучка и малой его угловой расходимости, поляризации СИ, что значительно ускоряет время проведения данного эксперимента и уменьшает радиационную нагрузку на образцы, ведет к значительному уменьшению фона (до 10⁻¹⁰ г/г) и тем самым значительно повышает достоверность эксперимента [1; 2; 10]. Традиционные методы (ААС, АЭС, ИСП-МС) анализа химических элементов почв и растений имеют ряд недостатков и отличаются длительностью эксперимента, при котором происходит полное разрушение матрицы образца минеральными кислотами. Измерения образцов проводились при энергии возбуждающего излучения 23 кэВ, время каждого измерения составляло от 300 до 500 с. Монохроматизация синхротронного излучения осуществлялась при помощи монохроматора на основе кремниевого кристалла типа «бабочка» с рабочими плоскостями (111). Регистрация флуоресцентного излучения осуществлялась при помощи детектора PentaFET (Oxford Instruments) с энергетическим разрешением ~ 135 эВ (на K α линии Fe – 5,9 кэВ). Основные характеристики экспериментальной станции и методические аспекты работы описаны в [11–12] ¹.

Обработка полученных спектров проводилась в программе AXIL методом наименьших квадратов. Концентрация элементов была определена с использованием метода «внешнего стандарта». Предел обнаружения составлял от 10⁻⁷ г/г. В качестве образцов сравнения использовали российские стандарты травяно-злаковой смеси ГСО СОРМ1 и байкальского ила БИЛ-1 [13]. Величина ошибки – воспроизводимость результатов анализа получена путем 15-ти параллельных измерений 5-ти одинаковых образцов. Относительное стандартное отклонение для большинства элементов варьировало от 1 до 13 %, Ni, As и Zr – 20 %, Y и Pb – 40 %, Cr – более 50 %. Статистический анализ данных выполнен с использованием пакета прикладных программ Statistica 6.1 и Microsoft Office Excel 2007.

Результаты и обсуждение

В почвах обнаружено 20 элементов, содержание которых отличалось в зависимости от техногенного воздействия на данных участках (табл. 1). Наиболее загрязнена тяжелыми металлами почва на участке 6, где содержание Pb превышало фоновое значение в 45 раз, а ПДК – в 21 раз; Cu, Ni и Zn выше в 1,3–6,5 раза, чем фоновое, а Zn превышало ПДК ². Концентрация

¹ См. также: Экспериментальная станция рентгенофлуоресцентного элементного анализа. URL: <http://ssrc.inp.nsk.su/CKP/stations/passport/3/> (дата обращения 10.06.2014).

² Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы. ГН 2.17.2041-06. М., 2006. 15 с.

Са в почвах участков 2, 6 и 7 превышает фоновое значение в 10 раз. По шкале техногенного загрязнения почвы химическими веществами [14] установлено, что на участке 6 значение величины суммарного показателя концентрации (Z_c) [15] составляет 33, что соответствует высоко-опасному загрязнению почв, превышающему ПДК. На участке 2 показатель $Z_c > 16$, что соответствует умеренно-опасному, так как выше ПДК. На остальных участках $Z_c < 16$, что оценивается как допустимое загрязнение, превышающее фоновое содержание элементов, но не достигающее ПДК.

Исследование уровней накопления макроэлементов в надземных и подземных органах *H. hybrida* показало, что концентрация Са всегда выше в листьях растений, чем в корневищах. Наиболее высоким содержанием Са (24 мг/г) выделяются листья растений с участка 4 и корневища из участка 6 (16 мг/г). Калий в больших концентрациях накапливался в листьях растений (участки 1–3, 7) по сравнению с корневищами. В остальных точках отбора содержание К выше в корневищах. Распределение таких микроэлементов, как Pb, Cr, Y, As, сильно зависит от уровня техногенного стресса (табл. 2, 3). Отмечено равномерное распределение Cu, Sc и Sr по органам, Вг и Мо в больших концентрациях отмечаются в листьях, а содержание Fe, Ti, Mn, Zn, Zr, V, Ni значительно выше в корневищах.

Суммарное содержание микроэлементов выше в корневищах, чем в листьях *H. hybrida* (рис. 1), наибольшее их значение отмечено у растений, выращенных на участках 7 (7738 мг/кг), 4 (7497 мг/кг) и 5 (6896 мг/кг), где их содержание в 5,5–6,2 раза выше, чем в контроле. Максимальное накопление Fe, Ti, V, Mn, Co, Sr и Nb обнаружено в корневищах *H. hybrida* на участке 7, где основной вклад в загрязнение окружающей среды вносит ЗЖБИ (см. табл. 2). Содержание Pb, Zn, Ni и Мо в корневищах растений из участка 6, где заметное загрязнение атмосферы и почвы происходит за счет автотранспорта, возрастает в 2–5 раз по сравнению с контрольными растениями и превышает нормальные пределы. Обнаружено повышенное накопление Cr в корневищах растений на участках 2 и 3. Содержание Zr практически во всех образцах в 7–33 раза выше, чем в контроле, максимум (549 мг/кг) наблюдался в корневищах растений из участка 4 в окрестности п.г.т. Кольцово.

Наибольшее суммарное содержание микроэлементов выявлено в листьях растений из участка 5 (5696 мг/кг), несколько ниже – из участка 6 (3412 мг/кг), что в 3,5–6 раз выше, чем в контроле. В условиях усиленного техногенного стресса в листьях растений из участков 5–7 отмечено значительное накопление тяжелых металлов и As. Так, на участке 5 уровень накопления Fe возрастает в 5 раз, Mn – в 3,5 раза, Ti – в 7 раз, Zr – в 8 раз, Y – в 23 раза по сравнению с контролем. По повышенному содержанию Pb, Cu, Sc и Zn в листьях выделяются растения из участка 6. Содержание Ni повышено в листьях растений из участка 7. В селитебных зонах (участки 1 и 2) суммарное содержание микроэлементов в листьях растений сопоставимо с контролем.

При выявлении связи накопления микро- и макроэлементов с условиями выращивания *H. hybrida* установлено, что соотношения между отдельными элементами (Fe/Mn, Ca/Fe, Zn/Cu, Sr/Ca) претерпевают изменения. Выявлен сдвиг в соотношении Fe/Mn в пользу Fe для растений, подвергнутых техногенному стрессу. Его величина составила для листьев растений из наиболее загрязненных участков (5–7) от 15 до 19, тогда как в контроле равнялась 13. Подобные сдвиги в соотношении Fe/Mn известны [4; 16–18] и в большинстве случаев связаны с повышением содержания Fe. Согласно полученным данным, концентрация Mn в листьях *H. hybrida* на загрязненных участках выше, чем в контроле. Величина отношения Ca/Fe в листьях растений также зависит от условий произрастания, и в контроле она составляет 19, на наиболее загрязненных местообитаниях снижена до 3 (участок 5), 11–12 (участок 6), что связано с повышением уровня Fe в этих образцах. В листьях из участка 2 содержание Fe сопоставимо с фоновым, но возрастает содержание Са, в результате значение соотношения Ca/Fe достигает 28. Установлено, что с увеличением уровня техногенного стресса возрастает

Таблица 1

Содержание элементов в почвах в местах выращивания *Hemerocallis hybrida* в Новосибирской области в условиях техногенного загрязнения (K, Ca, Fe даны в мг/г, остальные элементы – в мг/кг)

Table 1

The content of elements in soils in places of cultivation of *Hemerocallis hybrida* in the Novosibirsk region in the conditions of technogenic pollution (K, Ca, Fe are given in mg/g, other elements – in mg/kg)

Элемент	Участок							контрольный
	1	2	3	4	5	6	7	
K	17 ± 0,3*	14 ± 0,3	14 ± 0,3	12 ± 0,3	15 ± 0,3	17 ± 0,3	11 ± 0,2	14 ± 0,3
Ca	14 ± 0,3	132 ± 3	18 ± 0,3	33 ± 0,7	26 ± 0,5	107 ± 2	123 ± 2	13 ± 0,2
As	2,9 ± 0,6	2,9 ± 0,6	2,1 ± 0,4	1,6 ± 0,3	2,2 ± 0,4	1,2 ± 0,2	0,8 ± 0,2	1,5 ± 0,3
Br	9 ± 0,1	3,3 ± 0,0	4,7 ± 0,0	6,6 ± 0,1	6,4 ± 0,1	6,7 ± 0,1	0,6 ± 0,0	4,5 ± 0,0
Co	14 ± 1	6 ± 1	12 ± 1	8 ± 1	11 ± 1	9 ± 1	5 ± 0	11 ± 1
Cr	69 ± 35	19 ± 10	49 ± 25	40 ± 20	47 ± 24	47 ± 24	21 ± 11	40 ± 20
Cu	27 ± 1	20 ± 1	24 ± 1	20 ± 1	29 ± 1	40 ± 1	13 ± 0	17 ± 1
Fe	31 ± 0,3	11 ± 0,1	28 ± 0,3	16 ± 0,2	24 ± 0,2	19 ± 0,2	9 ± 1	21 ± 0,2
Mn	764 ± 8	271 ± 3	735 ± 7	536 ± 5	655 ± 7	541 ± 5	230 ± 2	705 ± 7
Mo	0,30 ± 0,01	0,00	0,10 ± 0,00	0,30 ± 0,01	0,30 ± 0,01	0,50 ± 0,01	0,01 ± 0,00	0,40 ± 0,01
Nb	13 ± 7	4 ± 2	10 ± 5	6 ± 3	9 ± 5	5 ± 3	2 ± 1	12 ± 6
Ni	48 ± 10	18 ± 4	42 ± 8	27 ± 5	44 ± 9	49 ± 10	15 ± 3	32 ± 6
Pb	71 ± 28	160 ± 64	99 ± 40	161 ± 64	170 ± 68	675 ± 270	66 ± 26	96 ± 38
Rb	74 ± 1	51 ± 1	66 ± 1	47 ± 1	60 ± 1	53 ± 1	43 ± 1	59 ± 1
Sc	5 ± 1	57 ± 9	6 ± 1	14 ± 2	6 ± 1	50 ± 8	44 ± 7	5 ± 1
Sr	175 ± 2	161 ± 2	173 ± 2	153 ± 2	187 ± 2	160 ± 2	117 ± 1	174 ± 2
V	88 ± 9	28 ± 3	80 ± 8	48 ± 5	67 ± 7	49 ± 5	27 ± 3	67 ± 7
Ti	4001 ± 360	1128 ± 102	3885 ± 350	2104 ± 189	3353 ± 302	1807 ± 163	1051 ± 95	4009 ± 361
Y	31 ± 10	21 ± 7	27 ± 8	15 ± 5	20 ± 6	12 ± 4	5 ± 2	20 ± 6
Zn	67 ± 1	66 ± 1	57 ± 1	59 ± 1	85 ± 1	461 ± 5	29 ± 0	41 ± 0
Zr	368 ± 74	68 ± 14	298 ± 60	211 ± 42	229 ± 46	70 ± 14	37 ± 7	304 ± 61

* В табл. 1–3: среднее значение ± стандартное отклонение.

Таблица 2

Содержание элементов в корневищах растений *Hemerocallis hybrida*, выращиваемых в Новосибирской области в условиях техногенного загрязнения (K, Ca даны в мг/г, остальные элементы – в мг/кг)

Table 2

The content of elements in the rhizomes of plants *Hemerocallis hybrida* grown in the Novosibirsk region under conditions of anthropogenic pollution (K, Ca are given in mg/g, the remaining elements – in mg/kg)

Элемент	Участок							
	контрольный	1	2	3	4	5	6	7
K	12 ± 0,2	12 ± 0,2	15 ± 0,3	12 ± 0,2	12 ± 0,2	8 ± 0,2	12 ± 0,2	11 ± 0,2
Ca	7 ± 0,1	6 ± 0,1	10 ± 0,2	8 ± 0,2	11 ± 0,2	8 ± 0,2	16 ± 0,3	11 ± 0,2
As	0,09 ± 0,02	0,13 ± 0,03	0,06 ± 0,01	0,20 ± 0,04	0,2 ± 0,05	0,24 ± 0,05	0,12 ± 0,02	0,20 ± 0,04
Br	0,5 ± 0,0	1,8 ± 0,0	0,8 ± 0,0	1,4 ± 0,0	2,3 ± 0,0	1,7 ± 0,0	2,2 ± 0,0	1,3 ± 0,0
Co	0,3 ± 0,0	0,5 ± 0,0	0,2 ± 0,0	1,2 ± 0,1	1,6 ± 0,1	1,4 ± 0,1	1,5 ± 0,1	1,7 ± 0,1
Cr	23 ± 12	535 ± 268	189 ± 95	83 ± 41	121 ± 60	127 ± 64	106 ± 53	143 ± 71
Cu	5,7 ± 0,2	4,8 ± 0,1	6,4 ± 0,2	6,5 ± 0,2	5,7 ± 0,2	8,3 ± 0,3	7,9 ± 0,2	6,1 ± 0,2
Fe	924 ± 9	2527 ± 25	918 ± 9	3913 ± 39	5569 ± 56	5251 ± 53	4480 ± 45	5958 ± 60
Mn	51 ± 0,1	133 ± 0,1	72 ± 0,1	163 ± 0,2	239 ± 0,2	201 ± 0,2	181 ± 0,2	235 ± 0,2
Mo	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,5 ± 0,0	0,1 ± 0,0
Nb	2 ± 1	7 ± 4	3 ± 2	11 ± 5	21 ± 10	20 ± 10	13 ± 6	21 ± 11
Ni	3,5 ± 0,7	3,0 ± 0,6	1,8 ± 0,4	6,7 ± 1,3	6,7 ± 1,3	7,6 ± 1,5	8,4 ± 1,7	7,8 ± 1,6
Pb	н.о.	7 ± 3	4 ± 2	2 ± 1	6 ± 2	5 ± 2	17 ± 7	5 ± 2
Rb	6,0 ± 0,1	15,6 ± 0,3	7,4 ± 0,1	16,2 ± 0,3	20,5 ± 0,4	19,7 ± 0,4	17,3 ± 0,3	19,6 ± 0,4
Sc	0,01 ± 0,00	0,004 ± 0,001	0,01 ± 0,00	0,001 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,01 ± 0,00
Sr	38 ± 0,4	69 ± 1	39 ± 0,4	70 ± 1	100 ± 1	96 ± 1	72 ± 1	100 ± 1
V	1,0 ± 0,1	2,4 ± 0,2	0,7 ± 0,1	4,3 ± 0,4	8,1 ± 0,8	6,4 ± 0,6	5,5 ± 0,6	7,6 ± 0,8
Ti	141 ± 13	471 ± 42	153 ± 14	486 ± 44	789 ± 71	761 ± 69	552 ± 50	938 ± 84
Y	1 ± 0	21 ± 9	6 ± 2	6 ± 2	12 ± 5	12 ± 5	8 ± 3	15 ± 6
Zn	29 ± 0	30 ± 0	35 ± 0	38 ± 0	45 ± 0	42 ± 0	104 ± 1	32 ± 0
Zr	17 ± 3	117 ± 23	25 ± 5	162 ± 32	549 ± 110	336 ± 67	240 ± 48	247 ± 49

* Н.о. – концентрация элемента ниже предела обнаружения (0,1 мг/кг).

Таблица 3

Содержание элементов в листьях растений *Hemerocallis hybrida*, выращиваемых в Новосибирской области в условиях техногенного загрязнения (K, Ca даны в мг/г, остальные элементы – в мг/кг)

Table 3

The content of elements in the leaves of plants *Hemerocallis hybrida* grown in the Novosibirsk region under conditions of anthropogenic pollution (K, Ca are given in mg/g, the remaining elements – in mg/kg)

Элемент	Участок							
	контрольный	1	2	3	4	5	6	7
K	8 ± 0,2	24 ± 0,5	18 ± 0,4	30 ± 1	9 ± 0	6 ± 0	9 ± 0	20 ± 0
Ca	13 ± 0,3	9 ± 0,2	16 ± 0,3	11 ± 0,2	24 ± 0,5	10 ± 0,2	21 ± 0,4	18 ± 0,4
As	0,02 ± 0,0	0,08 ± 0,02	0,02 ± 0,00	0,05 ± 0,01	0,12 ± 0,02	0,19 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,08 ± 0,02
Br	2,0 ± 0,0	5,7 ± 0,1	4,5 ± 0,0	2,4 ± 0,0	2,4 ± 0,0	3,4 ± 0,0	2,9 ± 0,0	2,8 ± 0,0
Co	0,33 ± 0,03	0,130,01	0,14 ± 0,01	0,13 ± 0,01	0,57 ± 0,05	0,52 ± 0,05	0,36 ± 0,03	0,58 ± 0,05
Cr	7 ± 3	227 ± 114	138 ± 69	91 ± 46	26 ± 13	1064 ± 532	759 ± 379	36 ± 18
Cu	4,0 ± 0,1	4,5 ± 0,1	3,9 ± 0,1	5,1 ± 0,2	5,3 ± 0,2	5,4 ± 0,2	9,0 ± 0,3	66 ± 0,2
Fe	666 ± 7	557 ± 6	551 ± 6	524 ± 5	1607 ± 16	3298 ± 33	1950 ± 19	1465 ± 15
Mn	50 ± 1	53 ± 1	61 ± 1	65 ± 1	127 ± 1	173 ± 2	119 ± 1	96 ± 1
Mo	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,4 ± 0,0	0,6 ± 0,0	0,3 ± 0,0	0,4 ± 0,0	0,4 ± 0,0	0,2 ± 0,0
Nb	8 ± 4	2 ± 1	2 ± 1	2 ± 1	20 ± 10	13 ± 7	5 ± 3	18 ± 9
Ni	3, ± 0,6	2,1 ± 0,4	1,4 ± 0,3	2,5 ± 0,5	4,0 ± 0,8	3,3 ± 0,7	3,5 ± 0,7	4,9 ± 1,0
Pb	1,7 ± 0,7	1,5 ± 0,6	4,1 ± 1,6	1,0 ± 0,4	3,5 ± 1,4	16,5 ± 6,6	20,4 ± 8,2	2,7 ± 1,1
Rb	4,5 ± 0,1	9,7 ± 0,2	8,3 ± 0,2	9,7 ± 0,2	5,9 ± 0,1	21,5 ± 0,4	10,8 ± 0,2	7,3 ± 0,1
Sc	0,01 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,02 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,02 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,02 ± 0,00	0,02 ± 0,00
Sr	69 ± 1	46 ± 0	54 ± 1	46 ± 0	101 ± 1	1333 ± 1	103 ± 1	65 ± 1
V	0,7 ± 0,1	0,4 ± 0,0	0,5 ± 0,0	0,5 ± 0,1	1,6 ± 0,2	3,0 ± 0,3	1,7 ± 0,2	1,3 ± 0,1
Ti	79 ± 7	86 ± 8	88 ± 8	97 ± 4	247 ± 22	523 ± 47	263 ± 24	146 ± 13
Y	2 ± 1	3 ± 1	4 ± 2	4 ± 1	6 ± 2	39 ± 16	14 ± 5	4 ± 2
Zn	17 ± 0	20 ± 0	22 ± 0	35 ± 0	18 ± 0	39 ± 0	73 ± 1	27 ± 0
Zr	45 ± 9	13 ± 3	14 ± 3	14 ± 3	84 ± 17	359 ± 72	78 ± 16	40 ± 8

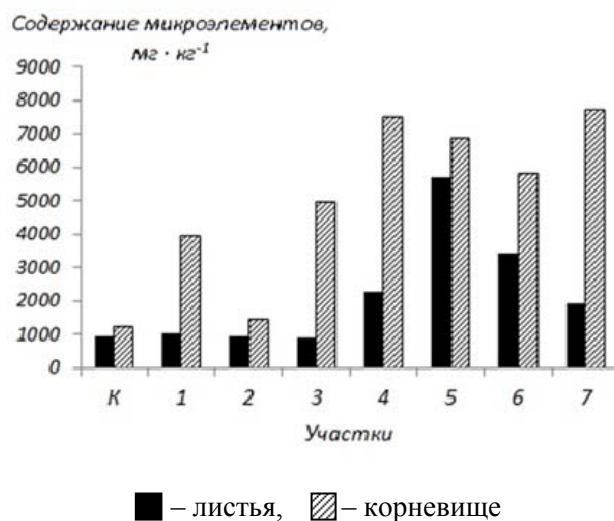


Рис. 1. Суммарное содержание микроэлементов в листьях и корневищах *Hemerocallis hybrida*, выращиваемых в Новосибирской области в условиях техногенного загрязнения.

По оси ординат – содержание микроэлементов, мг/кг;

по оси абсцисс – контрольный и техногенные участки

Fig. 1. The total content of trace elements in the leaves and rhizomes of *Hemerocallis hybrida* grown in the Novosibirsk region in conditions of man-made pollution

On the ordinate axis – the content of trace elements, mg/kg;

on the axis abscissa – control and technogenic areas

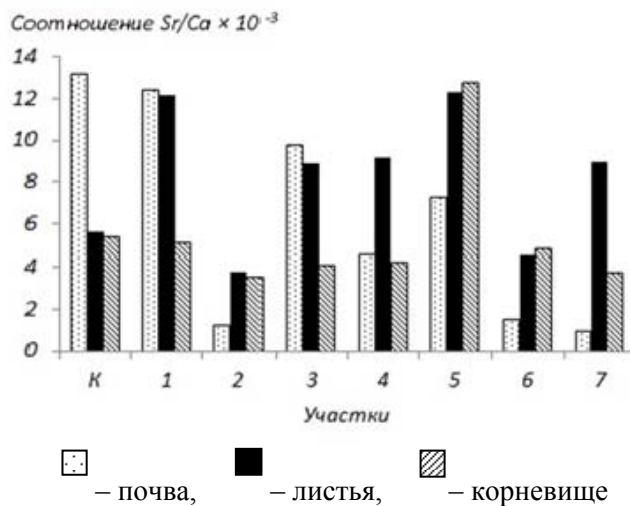


Рис. 2. Соотношение $\text{Sr/Ca} \times 10^{-3}$ в почвах, листьях и корневищах *Hemerocallis hybrida*, выращиваемых в Новосибирской области в условиях техногенного загрязнения.

По оси ординат – содержание микроэлементов, мг/кг;

по оси абсцисс – контрольный и техногенные участки

Fig. 2. The Sr/Ca ratio is 10^{-3} in soils, leaves and rhizomes of *Hemerocallis hybrida* grown in the Novosibirsk region under conditions of technogenic pollution.

On the axis ordinate – the content of trace elements, mg/kg;

on the axis abscissa – control and technogenic areas.

величина отношения Zn/Cu в листьях растений. В контроле это значение равняется 4, в загрязненном участке 6 выше в 2 раза, что свидетельствует об ухудшении экологической ситуации данного участка. Известно, что соотношение Sr/Ca является довольно постоянной величиной, но имеет тенденцию к понижению при переходе от почвы в растения [19]. По нашим данным, соотношение Sr/Ca (содержание Sr выражено в миллиграммах от сухой массы, Ca – в граммах) в почве контрольного участка составляет 13, в корневищах – 6, в листьях – 5 (рис. 2). Такая же тенденция отмечена на участках 1 и 3. В местах, подвергнутых техногенному стрессу, отмечены нарушения: при переходе от почвы к листьям величина соотношения возрастала, в отличие от контроля, от 1 до 5 на участке 6 и от 7 до 13 на участке 5. В остальных точках отбора наблюдали увеличение значения отношения Sr/Ca при переходе от почвы к корневищам, а затем снижение от корневищ к листьям. Установлена связь между величиной отношения таких элементов Fe/Mn , Ca/Fe , Zn/Cu , Sr/Ca в растениях *H. hybrida* и условиями произрастания. Выявленные сдвиги в соотношении отдельных элементов отражают степень техногенной нагрузки.

Заключение

В результате проведенного исследования с помощью многоэлементного анализа методом РФА СИ впервые получены достоверные данные по содержанию 20 элементов в почве, листьях и корневищах растений *H. hybrida* сорта *Speak to me*, выращенных в условиях промышленно-транспортного воздействия в Новосибирской области, различающихся по степени техногенной нагрузки. Показано, что уровень накопления макроэлементов (Ca и K) в надземных и подземных органах *H. hybrida* специфичен, концентрация Ca всегда выше в листьях растений, чем в корневищах, а концентрация K зависит от уровня загрязнения участка. В больших концентрациях K накапливался в листьях растений, выращенных в условиях с более благополучной экологической ситуацией по сравнению с корневищами, за исключением участка 7. Относительно суммарного содержания микроэлементов можно сказать, что оно выше в корневищах, чем в листьях *H. hybrida*. С наибольшим суммарным накоплением элементов в корневищах и листьях выделены растения, выращенные вблизи промышленных производств и вдоль автомобильных трасс, у которых их содержание в 3,5–6,2 раза выше, чем в контрольной группе растений. Показано, что Cu , Sc и Sr довольно равномерно распределены по органам растения, Bg и Mo в больших концентрациях отмечаются в листьях, а содержание Fe , Ti , Mn , Zn , Zr , V и Ni значительно выше в корневищах. Распределение таких микроэлементов, как Pb , Cr , Y и As , сильно зависит от уровня техногенного стресса. На участках с интенсивным транспортным движением основными элементами-загрязнителями, накапливающимися в листьях и корневищах растений в избыточной концентрации, являются Pb , Ni , Zn , Fe , Ti и Cr . В корневищах растений, выращенных в условиях промышленного загрязнения вблизи ЗЖБИ, в избыточных количествах обнаружены Fe , Mn , Nb , Sr , Ti , Ni и Co . Полученные данные показали, что растения *H. hybrida* сорта *Speak to me* служат биоиндикаторами промышленно-транспортного загрязнения, и метод РФА СИ перспективен и достоверен для проведения мониторинга экологической ситуации в урбанизированной среде.

Список литературы

1. Синхротронное излучение в геохимии: Сб. науч. тр. / Под ред. Г. Н. Аношина, Г. Н. Кулипанова. Новосибирск: Наука, 1989. № 752. 152 с.
2. Trounova V. A., Zolotarev K. V., Baryshev V. B., Phedorin M. A. Analytical possibilities of SRXRF station at VEPP-3 SR source. *Nucl. Instr. Meth. Phys.*, 1998, vol. A405, p. 532–536.
3. Алексеев Ю. В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат, 1987. 142 с.

4. **Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.** Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
5. **Ильин В. Б.** Тяжелые металлы в системе почва-растение. Новосибирск: Наука, 1991. 151 с.
6. **Ильин В. Б., Сысо А. И.** Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 231 с.
7. **Сиромля Т. И., Худяев С. А., Сысо А. И.** Использование метода РФА-СИ в почвенно-экологических исследованиях на территории г. Новосибирска // Изв. РАН. Сер. физическая. 2015. Т. 79, № 1. С. 101–105.
8. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами / Под ред. Н. Т. Зырина, С. Г. Малахова. М.: Гидрометеиздат, 1981. 108 с.
9. **Piminov P. A., Baranov G. N., Bogomyagkov A. V. et al.** Synchrotron Radiation Research and Application at VEPP-4. *Physics Procedia*, 2016, vol. 84, p. 19–26. DOI 10.1016/j.phpro.2016.11.005
10. **Trunova V. A., Sidorina A. V., Zolotarev K. V.** Using external standard method with absorption correction in SRXRF analysis of biological tissues. *X-ray Spectrometry*, 2015, vol. 44, no. 4, p. 226–229. DOI 10.1002/xrs.2008
11. **Дарьин А. В., Ракшун Я. В.** Методика выполнения измерений при определении элементного состава образцов горных пород методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 // Научный вестник НГТУ. 2013. № 2 (51). С. 112–118.
12. **Kulipanov G. N., Mezentsev N. A., Pindyurin V. F.** Synchrotron radiation in Novosibirsk: The first 13 years. *Journal of Structural Chemistry*, 2016, vol. 57, no. 7, p. 1277–1287. DOI 10.1134/S0022476616070015
13. **Арнаутов Н. А.** Стандартные образцы химического состава природных минеральных веществ: Метод. рекомендации. Новосибирск: Изд-во Ин-та геологии и геофизики СО РАН, 1990. 220 с.
14. **Чернов С. Ф.** Методы и приборы контроля окружающей среды и экологический мониторинг. М.: Изд-во МГУИЭ, 2006. 192 с.
15. **Сагг Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П. и др.** Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
16. Устойчивость к тяжелым металлам дикорастущих видов / Под ред. Н. В. Алексеевой-Поповой. Л.: Бот. ин-т им. В. Л. Комарова АН СССР, 1991. 214 с.
17. **Carreras H. B., Pignata M. L.** Biomonitoring of heavy metals and air quality in Cordoba City, Argentina, using transplanted lichens. *Environmental Pollution*, 2002, vol. 117, p. 77–87.
18. **Giniyatullin R. Kh., Kulagin A. A., Zaitsev G. A., Boiko A. A.** Metal Accumulation by *Betula pendula* Roth. Leaves under Conditions of the Sterlitamak Industrial Center. *Trace elements in medicine*, 2002, vol. 3, no. 2, p. 24.
19. **Blum J. D., Taliaferro E. H., Weisse M. T., Holmes R. T.** Changes in Sr/Ca, Ba/Ca and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios between trophic levels in two forest ecosystems in the northeastern U.S.A. *Biogeochemistry*, 2000, vol. 49, p. 87–101.

References

1. Synchrotron radiation in Geochemistry. Collection of scientific works. Eds. G. N. Anoshin, G. N. Kulipanov. Novosibirsk, Nauka, 1989, № 752, 152 с. (in Russ.)
2. **Trounova V. A., Zolotarev K. V., Baryshev V. B., Phedorin M. A.** Analytical possibilities of SRXRF station at VEPP-3 SR source. *Nucl. Instr. Meth. Phys.*, 1998, vol. A405, p. 532–536.

3. **Alexeev Yu. V.** Heavy metals in soils and plants. Leningrad, Agropromizdat, 1987, 142 p. (in Russ.)
4. **Kabata-Pendias A., Pendias H.** Trace Elements in soils and plants. Moscow, Mir Publishing house, 1989, 439 p. (in Russ.)
5. **Ilyin V. B.** Heavy metals in the soil-plant system. Novosibirsk, Nauka, 1991, 151 p. (in Russ.)
6. **Ilyin V. B., Syso A. I.** trace Elements and heavy metals in soils and plants of the Novosibirsk region. Novosibirsk, SB RAS, 2001, 231 p. (in Russ.)
7. **Siromlya T. I., Khudyaev S. A., Syso A. I.** The use of the RFA-SI method in soil and environmental studies in Novosibirsk. *Izvestiya RAS. Ser. Physical*, 2015, vol. 79, № 1, p. 101–105. (in Russ.)
8. Methodological recommendations for field and laboratory studies of soils and plants in the control of environmental pollution by metals. Ed. N. T. Zyrin, S. G. Malakhov. Moscow: publishing house Gidrometeoizdat, 1981, 108 p. (in Russ.)
9. **Piminov P. A., Baranov G. N., Bogomyagkov A. V. et al.** Synchrotron Radiation Research and Application at VEPP-4. *Physics Procedia*, 2016, vol. 84, p. 19–26. DOI 10.1016/j.phpro.2016.11.005
10. **Trunova V. A., Sidorina A. V., Zolotarev K. V.** Using external standard method with absorption correction in SRXRF analysis of biological tissues. *X-ray Spectrometry*, 2015, vol. 44, no. 4, p. 226–229. DOI 10.1002/xrs.2008
11. **Dariiin A. V., Rakshun Ya. V.** Method of measurements in determining the elemental composition of rock samples by x-ray fluorescence analysis using synchrotron radiation from the VEPP-3 accumulator. *Scientific Bulletin of NSTU*, 2013, № 2 (51), p. 112–118. (in Russ.)
12. **Kulipanov G. N., Mezentsev N. A., Pindyurin V. F.** Synchrotron radiation in Novosibirsk: The first 13 years. *Journal of Structural Chemistry*, 2016, vol. 57, no. 7, p. 1277–1287. DOI 10.1134/S0022476616070015
13. **Arnautov N. A.** Standard samples of chemical composition of natural mineral substances: Methodical recommendations. Novosibirsk: Institute of Geology and Geophysics, SB RAS USSR, 1990, 220 p. (in Russ.)
14. **Chernov S. F.** Methods and devices of environmental control and environmental monitoring. Moscow: mgui Publishing house, 2006, 192 p. (in Russ.)
15. **Saet Yu. E., Revich B. A., Yanin E. P.** and others. Geochemistry of the environment. Moscow, Nedra Publishing house, 335 p. (in Russ.)
16. Resistance to heavy metals of wild species. Ed. N. V. Alekseeva-Popova. Leningrad, Bot. inst. them. V. L. Komarova, USSR Academy of Sciences, 1991, 214 p. (in Russ.)
17. **Carreras H. B., Pignata M. L.** Biomonitoring of heavy metals and air quality in Cordoba City, Argentina, using transplanted lichens. *Environmental Pollution*, 2002, vol. 117, p. 77–87.
18. **Giniyatullin R. Kh., Kulagin A. A., Zaitsev G. A., Boiko A. A.** Metal Accumulation by *Betula pendula* Roth. Leaves under Conditions of the Sterlitamak Industrial Center. *Trace elements in medicine*, 2002, vol. 3, no. 2, p. 24.
19. **Blum J. D., Taliaferro E. H., Weisse M. T., Holmes R. T.** Changes in Sr/Ca, Ba/Ca and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios between trophic levels in two forest ecosystems in the northeastern U.S.A. *Biogeochemistry*, 2000, vol. 49, p. 87–101.

Материал поступил в редколлегию

Received
02.09.2019

Сведения об авторах / Information about the Authors

Седельникова Людмила Леонидовна, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, Центральный сибирский ботанический сад СО РАН (ул. Золотодолинская, 101, Новосибирск, 630090, Россия)

Lyudmila L. Sedelnikova, Central Siberian Botanical Gardens SB RAS (101 Zolotodolinskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

lusedelnikova@yandex.ru

Храмова Елена Петровна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Центральный сибирский ботанический сад СО РАН (ул. Золотодолинская, 101, Новосибирск, 630090, Россия)

Elena P. Khramova, Central Siberian Botanical Gardens SB RAS (101 Zolotodolinskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

khramova@ngs.ru

Чанкина Ольга Васильевна, научный сотрудник, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН (ул. Институтская, 3, Новосибирск, 630090, Россия)

Olga V. Chankina, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS (3 Institutetskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

chankina@ns.kinetics.nsc.ru

Ракшун Яков Валерьевич, кандидат физико-математических наук, ученый секретарь, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Yakov V. Rakshun, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

Ya.V.Rakshun@inp.nsk.su

Сороколетов Дмитрий Сергеевич, младший научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Dmitry S. Sorokoletov, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

«Сибирский физический журнал» публикует обзорные, оригинальные и дискуссионные статьи, посвященные научным исследованиям и методике преподавания физики в различных разделах науки, соответствующих направлениям подготовки на кафедрах физического факультета НГУ. Журнал издается на русском языке, однако возможна публикация статей иностранных авторов на английском языке.

1. Очередность публикации статей определяется их готовностью к печати. Рукописи, оформленные без соблюдения правил, к рассмотрению не принимаются.

Вне очереди печатаются краткие сообщения (не более четырех журнальных страниц), требующие срочной публикации и содержащие принципиально новые результаты научных исследований, проводимых в рамках тематики журнала.

Рекламные материалы публикуются при наличии гарантии оплаты, устанавливаемой по соглашению сторон.

2. В журнале печатаются результаты, ранее не опубликованные и не предназначенные к одновременной публикации в других изданиях. Публикация не должна нарушить авторского права других лиц или организаций.

Направляя свою рукопись в редакцию, авторы автоматически передают учредителям и редколлегии права на издание данной статьи на русском или английском языке и на ее распространение в России и за рубежом. При этом за авторами сохраняются все права как собственников данной рукописи. В частности, согласно международным соглашениям о передаче авторских прав за авторами остается право копировать опубликованную статью или ее часть для их собственного использования и распространения внутри учреждений, сотрудниками которых они являются. Копии, сделанные с соблюдением этих условий, должны сохранять знак авторского права, который появился в оригинальной опубликованной работе. Кроме того, авторы имеют право повторно использовать весь этот материал целиком или частично в компиляциях своих собственных работ или в учебниках, авторами которых они являются. В этих случаях достаточно включить полную ссылку на первоначально опубликованную статью.

3. Направлять рукописи в редакцию авторам рекомендуется по электронной почте либо приносить в редакцию электронную версию (в форматах MS WORD – *.doc, или *.docx, или *.rtf) на диске или флэш-памяти. Такая отправка исходных материалов значительно ускоряет процесс рецензирования.

Авторам предлагается посылать свои сообщения в наиболее сжатой форме, совместимой с ясностью изложения, в совершенно обработанном и окончательном виде, предпочтительно без формул и выкладок промежуточного характера и громоздких математических выражений. Не следует повторять в подписях к рисункам пояснений, уже содержащихся в тексте рукописи, а также представлять одни и те же результаты и в виде таблиц, и в виде графиков.

Рекомендованный объем присылаемых материалов: обзорные статьи – до 25-ти страниц, оригинальные материалы – до 12-ти страниц, краткие сообщения – до 4-х страниц. В любом случае объем рукописи должен быть логически оправданным.

Не рекомендуется предоставление электронных копий рукописей в формате LATEX. По техническим условиям издательства в этом случае рукопись будет преобразована редакцией в формат MS WORD, что может привести к значительному увеличению времени обработки рукописи и искажениям авторского текста.

Сокращений слов, кроме стандартных, применять нельзя. Все страницы рукописи должны быть пронумерованы.

4. При отправке файлов по электронной почте просим придерживаться следующих правил:

- указывать в поле subject (тема) название, номер журнала и фамилию автора;
- использовать attach (присоединение);
- в случае больших объемов информации возможно использование общеизвестных архиваторов (ARJ, ZIP, RAR);
- в состав электронной версии рукописи должны входить:

- ✓ файл, содержащий текст рукописи со вставленными в него рисунками;
- ✓ отдельные файлы с рисунками высокого качества;
- ✓ файл со сведениями об авторах (полностью фамилия, имя, отчество, ученые степень и звание, место работы, служебный адрес и телефон, адрес электронной почты для оперативной связи);
- ✓ файл с переводом на английский язык следующей информации: ФИО авторов, аффилиация, адрес, название статьи, аннотация, ключевые слова, подрисуночные подписи, названия таблиц.

Авторы вставляют рисунки и таблицы в текст рукописи так, как считают нужным. Рукопись обязательно должна быть подписана автором, а при наличии нескольких авторов – всеми соавторами.

Редакция обращает внимание авторов на возможность и целесообразность использования цветного графического материала.

5. В начале рукописи должны быть указаны индекс УДК, название статьи, инициалы и фамилии авторов, название и почтовый адрес учреждений, в которых выполнена работа, аннотация, содержащая основные результаты и выводы работы (в английском варианте не менее 1 000 знаков, русский вариант должен соответствовать английскому), ключевые слова, сведения о финансовой поддержке работы.

Например:

УДК 29.19.37; 47.03.08

Оценка конвективного массопереноса при импульсном лазерном нагреве поверхности стали

И. И. Иванов

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

Аннотация

Проведено численное моделирование процессов при легировании поверхностного слоя металла в подложке под воздействием импульсного лазерного излучения. С помощью предлагаемой математической модели, описывающей термо- и гидродинамические явления, рассматриваются процессы, включающие разогрев металла, его плавление, конвективный тепломассоперенос в расплаве и затвердевание после окончания импульса. По результатам численных экспериментов в зависимости от условий нагрева подложки определены два варианта формирования структуры течения в расплаве и распределения легирующего вещества.

Ключевые слова

термокапиллярная конвекция, конвективный тепломассоперенос, импульсное лазерное излучение, легирование металла, численное моделирование, поверхностно-активное вещество

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 18-79-00138

Evaluation of Convective Mass Transfer during Pulsed Laser Heating of Steel Surface

I. I. Ivanov

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

Abstract

Numerical modeling of the processes during the alloying of the substrate surface metal layer under pulsed laser radiation is carried out. The proposed mathematical model is used to consider the various processes, such as: heating, phase transition, heat and mass transfer in the molten metal, solidification of the melt. The surface of the substrate is covered with a layer of alloying substance that penetrates the melt. According to the results of numerical experiments, depending on the heating conditions of the substrate, two variants of the formation of the flow structure in the melt and the distribution of the alloying substance are determined.

Keywords

thermocapillary convection, convective heat and mass transfer, impulse laser radiation, metal alloying, numerical simulation, surface active component

Acknowledgements

This work was supported by the Russian Science Foundation, grant number 18-79-00138

Основной текст статьи**Список литературы / References (в порядке цитирования)**

Материал поступил в редколлегию

Received

06.06.2018

Сведения об авторе / Information about the Author

Иванов Иван Иванович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия)

Ivan I. Ivanov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

ivanov@itam.nsc.ru

ORCID 0000-0001-0005-0040

Подпись автора (авторов)

6. Параметры страницы: формат – А4; ориентация – книжная; поля (см): слева – 2,5; справа – 1; сверху – 2,5; снизу – 2,3; от края до нижнего колонтитула – 1,3.

7. Основной текст: стиль – «Обычный»: гарнитура (шрифт) Times New Roman (Суг), кегль (размер) 12 пунктов, абзацный отступ – 0,5 см, через 1,5 интервала, выравнивание – по ширине.

В тексте рукописи следует избегать аббревиатур, даже таких общепринятых, как ЭДС, ВТСП и т. п. Использование аббревиатур и простых химических формул в заголовках рукописей совершенно недопустимо. Следует писать: высокотемпературная сверхпроводимость, кремний, арсенид галлия и т. п., давая при необходимости соответствующую аббревиатуру или химическую формулу в тексте. Исключение могут составлять формулы сложных химических соединений. Каждое первое употребление аббревиатуры в тексте должно быть четко пояснено.

Не следует:

- производить табуляцию;
- разделять абзацы пустой строкой;
- использовать макросы, сохранять текст в виде шаблона и с установкой «только для чтения»;

- распределять текст по двум или более столбцам;

- расставлять принудительные переносы.

8. Таблицы должны иметь заголовки (на русском и английском языках). В таблицах обязательно указываются единицы измерения величин.

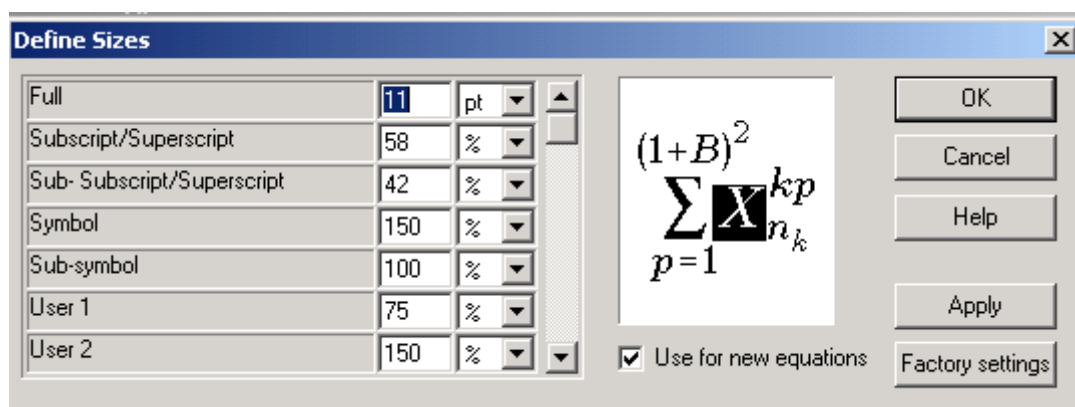
9. Число рисунков должно быть логически оправданным, качество – высоким. Файлы изображений должны находиться в том же каталоге, что и основной документ и иметь имена, соответствующие номерам рисунков в рукописи (например, 09.tif или 22a.jpg).

10. Подписи к рисункам (на русском и английском языках) в электронной версии рукописи выполняются под рисунками, точка в конце не ставится. Если имеется несколько рисунков, объединенных одной подписью, они обозначаются русскими строчными буквами: а, б, в...

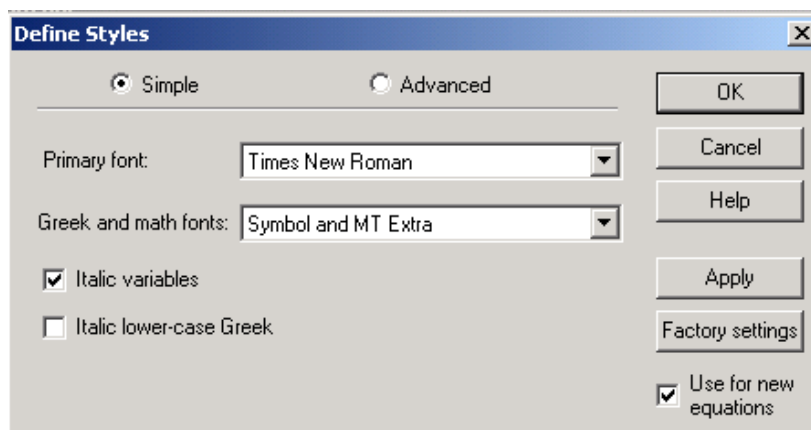
11. Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation MathType в подбор к тексту или отдельной строкой по центру, **кегель 11 пт.**

Нумерация формул сквозная, в круглых скобках, прижатых к правому полю. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

Настройки редактора формул



а



б

12. Библиографические ссылки. В тексте в квадратных скобках арабскими цифрами указывается порядковый номер научного труда в библиографическом списке, например: [2; 3], [4–6] и т. д. В конце рукописи помещается список литературы в порядке упоминания в рукописи. Ссылки на российские издания приводятся на русском языке и сопровождаются переводом на английский язык (в отдельной строке, но под тем же номером). Библиографическое описание публикации включает: фамилию и инициалы автора, полное название работы, а также издания, в котором опубликована (для статей), город, название издательства, год издания, том (для многотомных изданий), номер, выпуск (для периодических изданий), объем

публикации (количество страниц – для монографии, первая и последняя страницы – для статьи).

Ссылки на интернет-источники, базы данных и т. п. ресурсы, не поддающиеся библиографическому описанию, оформляются в виде примечаний (сносок).

13. В конце рукописи авторы могут поместить список использованных обозначений и сокращений.

14. Возвращение рукописи на доработку не означает, что рукопись уже принята к печати. Доработанный вариант необходимо прислать в редакцию в электронном виде с соблюдением всех требований вместе с ее начальной версией, рецензией и ответом на замечания рецензента не позднее двух месяцев со дня его отсылки. В противном случае первоначальная дата поступления рукописи при публикации не указывается.

15. Решение редакционной коллегии о принятии рукописи к печати или ее отклонении сообщается авторам.

В случае приема рукописи к публикации авторы должны прислать или передать в редакцию два бумажных экземпляра рукописи. Материалы печатаются на принтере на одной стороне стандартного (формат А4) листа белой бумаги. При этом тексты рукописи в бумажной и электронной версиях должны быть идентичными.

16. К рукописи прилагаются письмо от учреждения, в котором выполнена работа, и экспертное заключение о возможности ее опубликования в открытой печати. Если коллектив авторов включает сотрудников различных учреждений, необходимо представить направления от всех учреждений.

Сообщения, основанные на работах, выполненных в учреждении (учреждениях), должны содержать точное название и адрес учреждения (учреждений), публикуемые в статье.

17. После подготовки рукописи к печати редакция отправляет авторам электронную версию статьи с просьбой срочно сообщить в редакцию электронной почтой о замеченных опечатках для внесения исправлений в печатный текст.

18. После выхода журнала статьи размещаются на сайте физического факультета НГУ, а также на сайте Научной электронной библиотеки (elibrary.ru).

Адрес редакции

Физический факультет, к. 140 главного корпуса НГУ
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090,
редакция «Сибирского физического журнала»

тел. +7 (383) 363 44 25
physics@vestnik.nsu.ru