

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

**А. С. Тамбовцев**<sup>1,2</sup>, **Г. Р. Грек**<sup>1</sup>, **В. В. Козлов**<sup>1,2</sup>, **М. В. Литвиненко**<sup>1,2</sup>,  
**Ю. А. Литвиненко**<sup>1</sup>, **А. Г. Шмаков**<sup>3,4</sup>

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

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет  
Новосибирск, Россия*

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

<sup>4</sup> *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

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

A. S. Tambovtsev<sup>1,2</sup>, G. R. Grek<sup>1</sup>, V. V. Kozlov<sup>1,3</sup>, M. V. Litvinenko<sup>1,2</sup>  
Yu. A. Litvinenko<sup>1</sup>, A. G. Shmakov<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS  
Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>2</sup> *Novosibirsk State University  
Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>3</sup> *Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS  
Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>4</sup> *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 ( $U_0 \leq 150$  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 ( $U_0 > 150$  м/с).

3. Отрыв турбулентного пламени от области перетяжки пламени ( $U_0 > 200$  м/с).

4. Прекращение горения турбулентного участка микроструи при сохранении горения в области перетяжки пламени. При этом 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] ( $U_0 > 331$  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 запираания 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÷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.

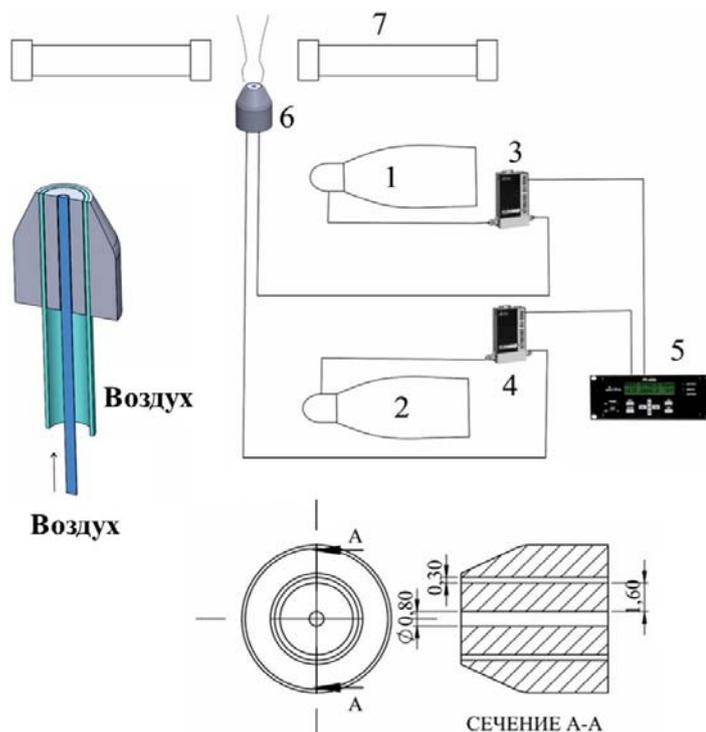
В работе [13] рассмотрены особенности горения микроструи смеси водорода не с инертными (гелий, азот) и горючим (углеводородный газ метан) газами, как в вышеизложенной ситуации, а с хорошо известным окислителем (кислородом). Показано, что добавление кислорода приводит к снижению диапазона скоростей существования 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 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.



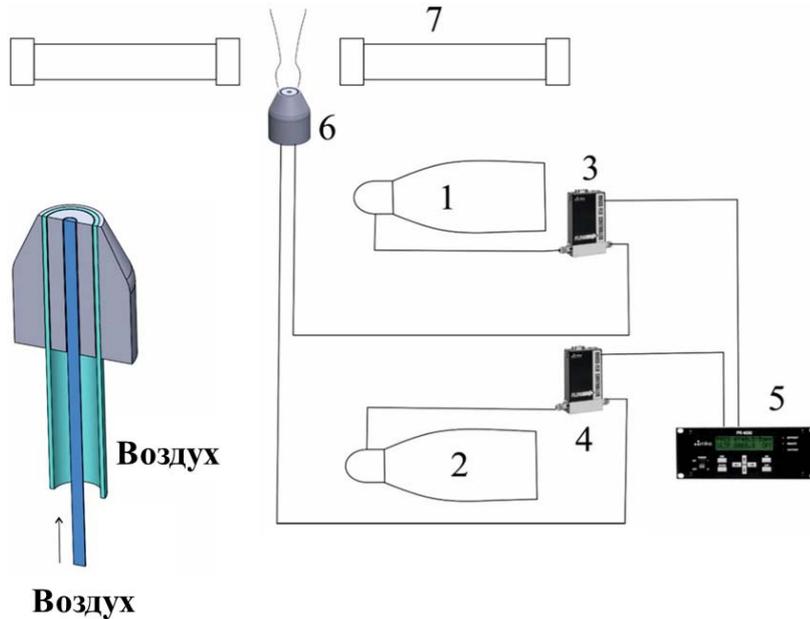
$S_1$  – площадь круглого отверстия ввода воздуха  
 $S_2$  – площадь коаксиальной щели ввода спутной струи воздуха  
 $S_1 = 0,005 \text{ см}^2$   
 $S_2 = 0,04 \text{ см}^2$

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  $Q$  ( $\text{см}^3/\text{с}$ ) 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 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 ( $\Delta P, \text{ кгс/м}^2$ ) на входе ( $P_{\text{редуктор}}$ ) и выходе ( $P_{\text{атмосфера}}$ ) воздуха из микросопла ( $\Delta P = P_{\text{редуктор}} - P_{\text{атмосфера}}$ ). При этом  $U_0, \text{ м/с} = \sqrt{(2\Delta P / \rho)}$ , где  $\rho, \text{ кг/м}^3$  – 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,  $S = 0,04$  см<sup>2</sup>) и coaxиальную щель ( $S = 0,005$  см<sup>2</sup>) 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).

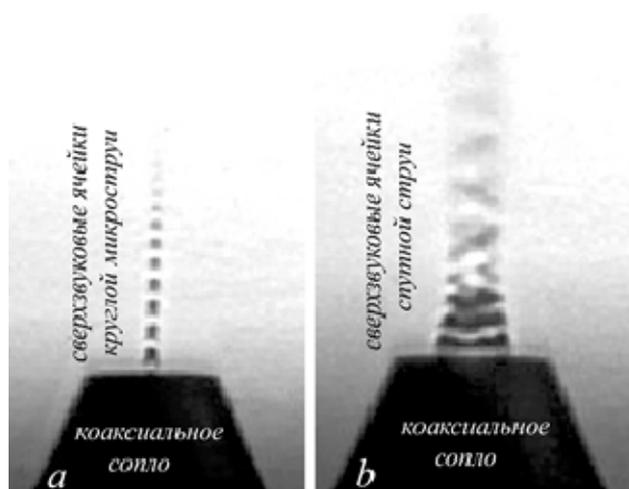


Рис. 3. Теневые картины сверхзвукового истечения круглой (а) и coaxиальной (б) микроструи воздуха при наличии сверхзвуковых ячеек при скорости истечения  $U_0 > 340$  м/с

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  $U_0 > 340$  м/с

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 микроструя),  $U_0$  ( $b-h$ ) =  $\sqrt{(2\Delta P/\rho)} > 320$  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)

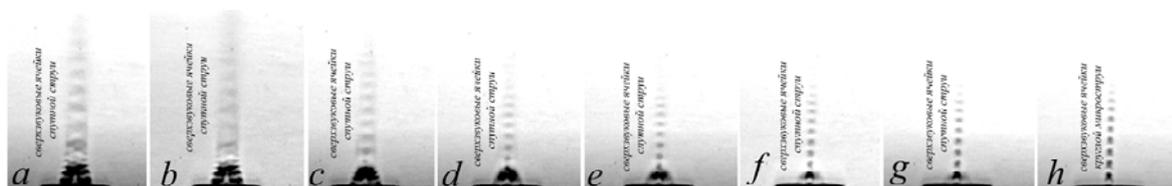


Рис. 6. Теневые картины взаимодействия круглой и коаксиальной струй воздуха при сверхзвуковом их истечении и при наличии сверхзвуковых ячеек в зависимости от уменьшения скорости истечения,  $U_0$  ( $a-g$ ) =  $\sqrt{(2\Delta P/\rho)} < 500$  м/с,  $U_0$  ( $h$ ) = 320 м/с (круглая микроструя)

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,  $S_1 - S_4 = 0,008; 0,005; 0,011; 0,0038$  см<sup>2</sup>; коаксиальная щель:  $S_1 - S_4 = 0,009; 0,008; 0,009; 0,008$  см<sup>2</sup>. 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)**

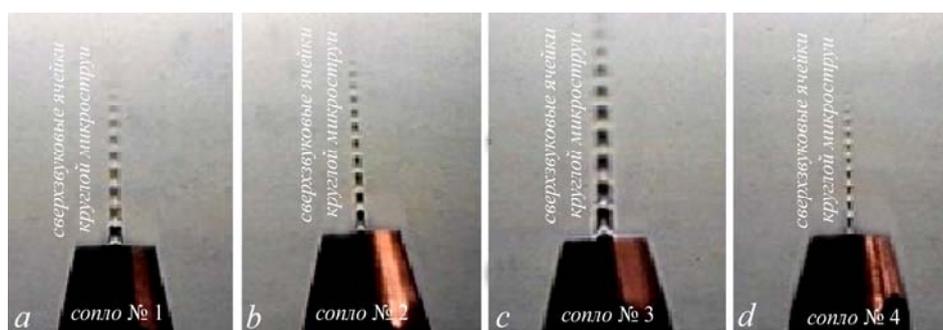


Рис. 7. Теневые картины круглой микроструи воздуха при ее сверхзвуковом истечении в зависимости от площади выходного сопла и при наличии сверхзвуковых ячеек ( $S_1 - S_4 = 0,008; 0,005; 0,011; 0,0038$  см<sup>2</sup>;  $U_0 = S_4 > S_2 > S_1 > S_3$ )

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 ( $S_1 - S_4 = 0,008; 0,005; 0,011; 0,0038$  см<sup>2</sup>;  $U_0 = S_4 > S_2 > S_1 > S_3$ )

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

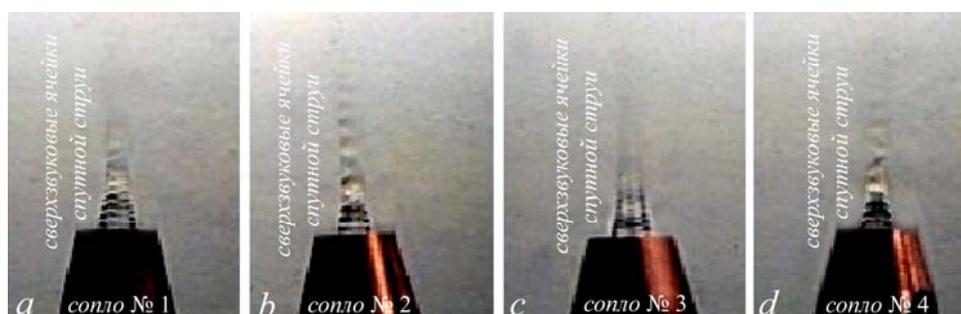


Рис. 8. Теневые картины коаксиальной струи воздуха при ее сверхзвуковом истечении в зависимости от площади выходного сопла и при наличии сверхзвуковых ячеек ( $S_1 - S_4 = 0,009; 0,008; 0,009; 0,008$  см<sup>2</sup>;  $U_0 \approx S_1 = S_3; S_2 = S_4$ )

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  $S_1 - S_4 = 0,009; 0,008; 0,009; 0,008$  см<sup>2</sup>;  $U_0 \approx S_1 = S_3; S_2 = S_4$ )

### Взаимодействие струй с ростом скорости (сопло № 1)

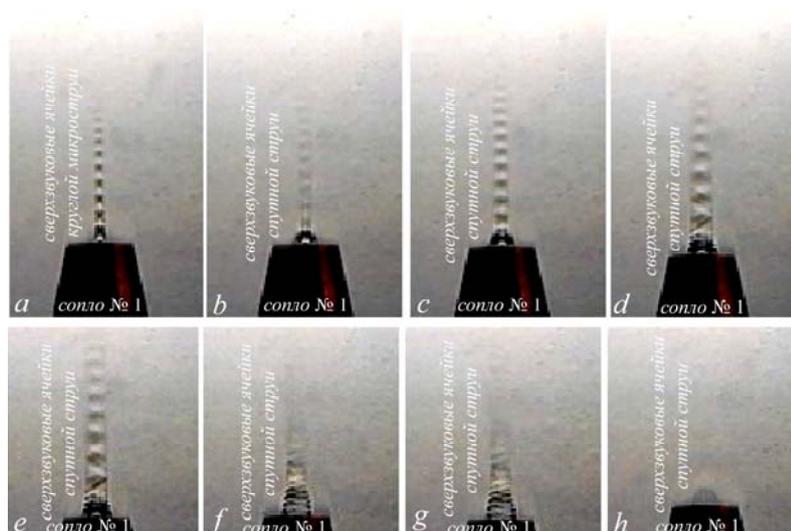


Рис. 9. Теневые картины взаимодействия коаксиальной и круглой струи воздуха при их сверхзвуковом истечении из выходного сопла № 1 и при наличии сверхзвуковых ячеек,  $U_0(a) = \sqrt{2\Delta P/\rho} = 320$  м/с, (круглая микроструя),  $U_0(b-h) > 320$  м/с (коаксиальная струя)

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,  $U_0(a) = \sqrt{2\Delta P/\rho} = 320$  m/s, (round microjet),  $U_0(b-h) > 320$  m/s (coaxial jet)

### Взаимодействие струй с ростом скорости (сопло № 3)

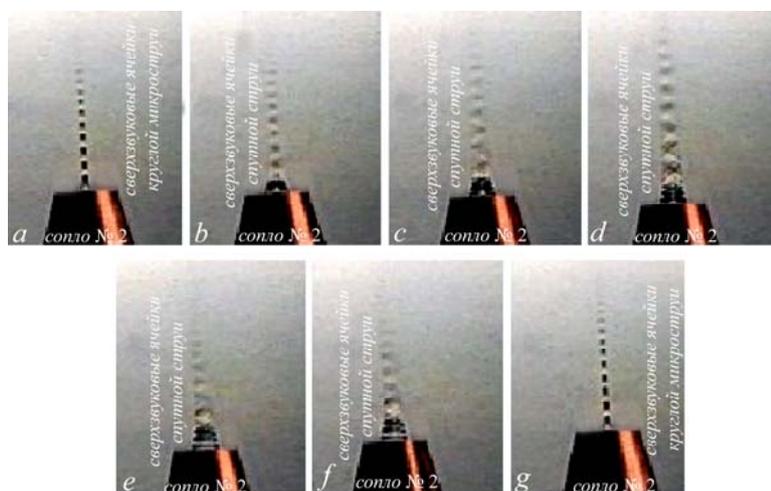


Рис. 10. Теневые картины взаимодействия коаксиальной и круглой струи воздуха при их сверхзвуковом истечении из выходного сопла № 2 и при наличии сверхзвуковых ячеек,  $U_0(a, g) = \sqrt{2\Delta P/\rho} = 320$  м/с, (круглая микроструя),  $U_0(b-f) > 320$  м/с (коаксиальная струя)

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,  $U_0(a, g) = \sqrt{2\Delta P/\rho} = 320$  m/s (round microjet),  $U_0(b-f) > 320$  m/s (coaxial jet)

### Взаимодействие струй с ростом скорости (сопло № 3)

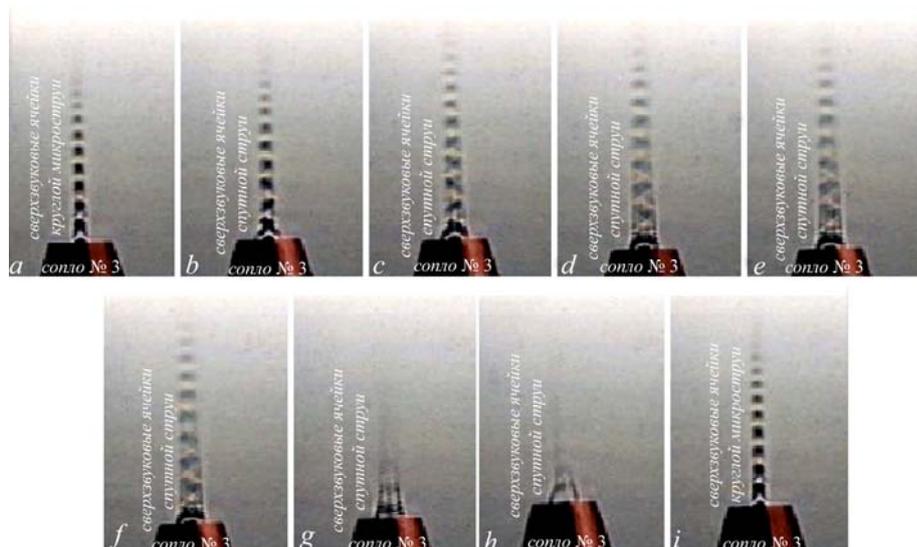


Рис. 11. Теневые картины взаимодействия коаксиальной и круглой струи воздуха при их сверхзвуковом истечении из выходного сопла № 3 и при наличии сверхзвуковых ячеек,  $U_0(a, i) = \sqrt{(2\Delta P/\rho)} = 320$  м/с (круглая микроструя),  $U_0(b-h) > 320$  м/с (коаксиальная струя)

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,  $U_0(a, i) = \sqrt{(2\Delta P/\rho)} = 320$  м/с (round microjet),  $U_0(b-h) > 320$  м/с (coaxial jet)

### Взаимодействие струй с ростом скорости (сопло № 4)

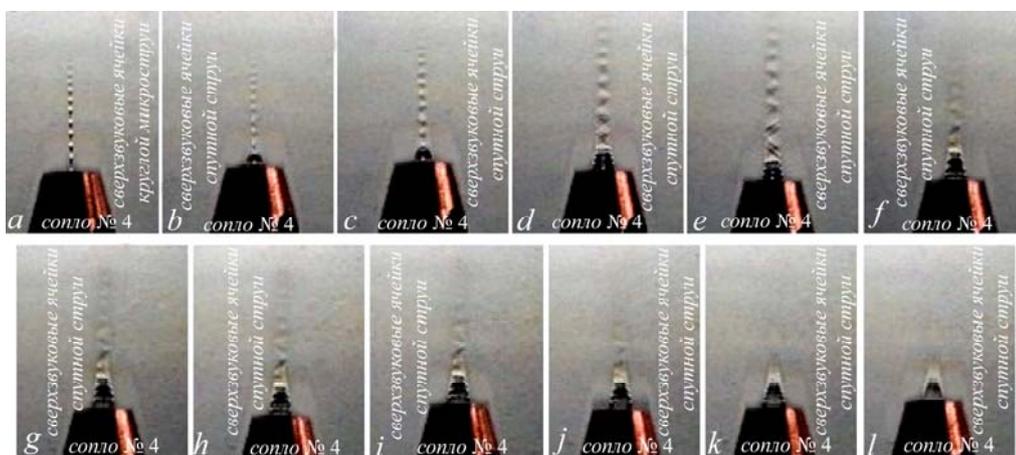


Рис. 12. Теневые картины взаимодействия коаксиальной и круглой струи воздуха при их сверхзвуковом истечении из выходного сопла № 4 и при наличии сверхзвуковых ячеек,  $U_0(a) = \sqrt{(2\Delta P/\rho)} = 320$  м/с (круглая микроструя),  $U_0(b-l) > 320$  м/с (коаксиальная струя).

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,  $U_0(a) = \sqrt{(2\Delta P/\rho)} = 320$  м/с (round microjet),  $U_0(b-l) > 320$  м/с (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: 8<sup>th</sup> 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: 8<sup>th</sup> 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

**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. 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