УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ КАЗАНСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Том 157, кн. 3

Физико-математические науки

2015

УДК 532.525.2

# УСТОЙЧИВОСТЬ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ И ИХ ГОРЕНИЕ (ОБЗОР)

# В.В. Козлов

### Аннотация

В работе приведён обзор последних работ по неустойчивости струйных течений и влиянию неустойчивости потока на процессы горения. Представлены результаты большого цикла экспериментальных исследований структуры и характеристик развития дозвуковых круглых и плоских макро- и микроструй. Показаны особенности развития данных течений в зависимости от изменений начальных условий на срезе сопла и акустического воздействия. Установлена возможность управлять структурой круглой и плоской макроструй, изменяя профиль скорости на срезе сопла с «ударного» на параболический. Обнаружены новые явления при воздействии поперечного акустического поля на микрострую и микроструйное горение.

Ключевые слова: макро- и микроструи, неустойчивость, влияние акустики, горение.

# 1. Неустойчивость круглой макро- и микроструи

Неустойчивость круглой макроструи с ударным профилем скорости на срезе сопла связана с неустойчивостью Кельвина – Гельмгольца (рис. 1, I)) [1, 2]. Наличие параболического профиля скорости на срезе сопла приводит к исчезновению кольцевых вихрей, возникновению области чисто ламинарного течения в струе большой протяженности, и турбулентное разрушение круглой струи не связано с неустойчивостью Кельвина – Гельмгольца (рис. 1, II). Круглая микроструя имеет параболический профиль скорости на срезе сопла, подвержена уплощению и синусоидальному колебательному процессу как классическая плоская струя в поперечном акустическом поле (рис. 2, a-c). В процессе синусоидального колебания микроструи в поперечном акустическом поле она раздваивается (рис. 2, b, c).

# 2. Неустойчивость плоской макро- и микроструи

Неустойчивость плоской макроструи с ударным профилем скорости на срезе сопла связана с неустойчивостью независимых друг от друга слоев сдвига 1, 2 (рис. 3, I–III) и синусоидальной неустойчивостью струи в целом 3 далее вниз по потоку при параболическом профиле скорости (рис. 3, III). Наличие параболического профиля скорости на срезе сопла приводит к неустойчивости синусоидального типа струи в целом как без акустического воздействия, так и с ним (рис. 3, IV).

Плоская микроструя в поперечном акустическом поле подвержена синусоидальной неустойчивости, как и плоская макроструя. Вместе с тем обнаружен процесс раздвоения струи [3–5], а также ее закрутка в направлении воздействия переменного вектора скорости акустики (рис. 4, I–III).

# 3. Горение пропана и водорода в круглой и плоской микроструях

Обнаружено раздвоение пламени под воздействием поперечного акустического поля при горении как круглой (рис. 5), так и плоской микроструи пропана и водорода



Рис. 1. І – распределение средней скорости на срезе сопла при x/d = 0.1 (1), 0.5 (2), 1.0 (3) (a); кольцевые вихри (b); трехмерные структуры как результат взаимодействия кольцевых вихрей с полосчатыми структурами (c). II – распределение средней скорости на срезе сопла при x/d = 0.1 (1), 0.5 (2), 1.0 (3) (a); область чисто ламинарной круглой макроструи (b).  $\text{Re}_d = 6500$ 



Рис. 2. Картины визуализации дымом процесса уплощения (a) и синусоидального колебания и раздвоения уплощенной круглой микроструи в поперечном акустическом поле (b, c)

(рис. 6) см. [6–9]. Данный процесс коррелирует с раздвоением макро- и микроструи этих форм в поперечном акустическом поле в отсутствие горения. Обнаружена «перетяжка» пламени при горении микроструи водорода в поперечном акустическом поле (см. рис. 5 и 6).

Наблюдалось также раздвоение приподнятого пламени под воздействием поперечного акустического поля при горении плоской микроструи пропана и его сворачивание и закрутка, как и в случае струи в отсутствие горения. Показано [9], что в продуктах горения оторванного метанового факела при акустическом воздействии концентрация оксидов азота снижается на 50%, сажи – на 30%.

Результаты этой части работы обобщены в монографии [10].

# 4. «Перетяжка» пламени при горении круглой и плоской микроструй водорода

В результате исследований диффузионного горения круглой [11] и плоской [12] микроструи водорода впервые обнаружено новое явление, которое, по-видимому,



Рис. 3. І, ІІ – картины визуализации дымом искусственных полосчатых структур (a) и их взаимодействие с одним из слоев сдвига в случае ударного профиля скорости на срезе сопла (b); ІІІ – схема эволюции профиля скорости от ударного к параболическому вниз по потоку; ІV – синусоидальное колебание плоской макроструи на различных частотах акустики (без акустики (a), с акустикой (b, c, d, e при f = 30, 40, 50, 60 Гц соответственно)



Рис. 4. І – схема эксперимента; ІІ – картина визуализации дымом процесса раздвоения плоской микроструи в поперечном акустическом поле; ІІІ – картины визуализации дымом процесса сворачивания (*a*) и закрутки (*b*) плоской микроструи в поперечном акустическом поле

ранее никем не наблюдалось. Это явление связано с возникновением в ближнем поле горения микроструи водорода практически замкнутой сферической области,



Рис. 5. І – раздвоение приподнятого пламени под воздействием поперечного акустического поля при горении пропана в круглой микроструе: без акустики (слева) и с акустикой  $f = 2.8 \text{ к}\Gamma$ ц,  $U_{\text{струи}} = 16 \text{ м/c}$ , d = 1 мм (справа); ІІ – раздвоение присоединенного пламени в поперечном акустическом поле в процессе горения круглой микроструи водорода: без акустики (слева) и с акустикой  $f = 7-15 \text{ к}\Gamma$ ц,  $U_{\text{струи}} = 109 \text{ м/c}$ , d = 1 мм (справа)



Рис. 6. І – раздвоение приподнятого пламени под воздействием поперечного акустического поля при горении пропана в плоской микроструе: без акустики (слева) и с акустикой  $f = 1-3 \,\mathrm{k\Gamma u}$ ,  $U_{\mathrm{струн}} = 21 \,\mathrm{m/c}$ , длина щели сопла – 2 мм, ширина щели сопла – 0.2 мм (справа); II – раздвоение присоединенного пламени в поперечном акустическом поле в процессе горения плоской микроструи водорода: без акустики (слева) и с акустикой  $f = 5-8 \,\mathrm{k\Gamma u}$ ,  $U_{\mathrm{струн}} = 288 \,\mathrm{m/c}$ , длина щели сопла – 2 мм, ширина щели сопла – 0.3 мм (справа)

простирающейся от сопла до так называемой «перетяжки» (рис. 7), где происходит процесс смешения чисто ламинарной водородной струи с окружающим воздухом. При этом данная область устойчива к внешнему воздействию, имеет эллипсо- или шарообразную форму, ее пространственный размер постепенно уменьшается с ростом скорости микроструи. Важной особенностью области от сопла до «перетяжки» является то, что она окружена мощным барьером градиента плотности газа, при преодолении которого ламинарная струя мгновенно становится турбулентной. Эксперименты показали, что в области от сопла до «перетяжки» горение водорода имеет ламинарный характер с ламинарным пламенем, а вне этой области характер горения имеет турбулентный характер с типичным турбулентным пламенем.



Рис. 7. Теневые картины «перетяжки» пламени при диффузионном горении круглой (I) и плоской (II) микроструи водорода: 1 – сопло d = 1000 мкм (I),  $l/h \approx 6.5$  (II), 2 – ламинарная струя водорода, 3 – турбулентная струя водорода, 4 – сферическая область горения водорода в ближнем поле, 5 – пламя горения турбулентной струи водорода, 6 – фронт горения водорода в сферической области с резким изменением плотности;  $U_{\rm струи} = 408$  м/с (I), 250 (II), a – снимок в плоскости h, b – снимок в плоскости l

Следует отметить, что «перетяжка» пламени при диффузионном горении микроструи водорода обнаружена и исследована для следующих параметров: круглая микроструя – сопло  $d \approx 0.25-1$  мм,  $U_{\rm струи} \approx 100-1600$  м/с; плоская микроструя – сопло  $l/h \approx 5.4-30$ ,  $U_{\rm струи} \approx 170-1000$  м/с. «Перетяжка» пламени не наблюдалась при диаметре d выходного отверстия круглого сопла более 3 мм и при удлинении l/h выходной щели плоского сопла более 30.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 14-08-31166, 11-01-00292, 12-08-31083, 12-07-00548, 13-07-00616 14-08-31166), гранта Президента РФ НШ-2924.2041.1 и Интеграционного проекта СО РАН № 24.

#### Summary

V.V. Kozlov. Stability of Jet Flows and Their Combustion (Review).

A review of the recent studies on the instability of jet flows and the influence of flow instability on microjet combustion processes is presented. The results of a vast experimental campaign undertaken to investigate the structure and development characteristics of subsonic round and plane macro- and microjets are given. Some peculiarities in the development of these flows depending on the initial conditions at the nozzle exit and the acoustic influence are highlighted. An opportunity to control the structure of round and plane macrojets by changing the mean velocity profile between the "top-hat" and parabolic shapes is found. New phenomena associated with the influence of transverse acoustic field on the microjet and microjet combustion are found.

Keywords: macro- and microjets, instability, acoustic influence, combustion.

#### Литература

- 1. Гиневский А.С., Власов Е.В., Каравосов Р.К. Акустическое управление турбулентными струями. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 239 с.
- Пимштейн В.Г. Аэроакустические взаимодействия в турбулентных струях. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 84 с.

- Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко Ю.А., Козлов Г.В., Литвиненко М.В. Дозвуковые круглая и плоская макро- и микроструи в поперечном акустическом поле // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. Физика. – 2010. – Т. 5, Вып. 2. – С. 28–42.
- Анискин В.М., Бунтин Д.А., Маслов А.А., Миронов С.Г., Цырюльников И.С. Исследование устойчивости дозвуковой газовой микроструи // ЖТФ. – 2012. – Т. 82, Вып. 2. – С. 17–23.
- 5. Фомин В.М., Анискин В.М., Маслов А.А., Миронов С.Г., Цырюльников И.С. Газодинамическая структура течения и развитие возмущений в микроструях // Докл. РАН. – 2010. – Т. 433, № 5. – С. 635–638.
- Suzuki M., Ikura S., Masuda W. Comparison between acoustically-excited diffusion flames of tube and slit burners // Proc. 11th Asian Symposium on Visualization. – Niigata, Japan, 2011.– P. 1–6.
- Козлов В.В., Грек Г.Р., Катасонов М.М., Коробейничев О.П., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Особенности горения пропана в круглой и плоской макро- и микроструе в поперечном акустическом поле при малых числах рейнольдса // Докл. РАН. – 2014. – Т. 459, № 5. – С. 562–566.
- Козлов В.В., Грек Г.Р., Коробейничев О.П., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Особенности горения водорода в круглой и плоской микроструе в поперечном акустическом поле и их сравнение с результатами горения пропана в тех же условиях // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. Физика. 2014. Т. 9, Вып. 1. С. 79–86.
- 9. Кривокорытов М.С., Голуб В.В., Володин В.В. Влияние акустических колебаний на диффузионное горение метана // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38, № 10. С. 57–63.
- 10. Грек Г.Р., Козлов В.В., Литвиненко Ю.А. Устойчивость дозвуковых струйных течений и горение. – Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2013. – 239 с.
- Шмаков А.Г., Грек Г.Р., Козлов В.В., Коробейничев О.П., Литвиненко Ю.А. Различные режимы диффузионного горения круглой струи водорода в воздухе // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. Физика. – 2015. – Т. 10, Вып. 2. – С. 27–41.
- Литвиненко Ю.А., Грек Г.Р., Козлов В.В., Коробейничев О.П., Шмаков А.Г. Структура присоединённого диффузионного пламени микроструи водорода, истекающей из щелевого сопла // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. Физика. – 2015. – Т. 10, Вып. 2. – С. 52–66.

Поступила в редакцию 10.06.15

Козлов Виктор Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск, Россия.

E-mail: kozlov@itam.nsc.ru