УДК 532.525.2

# ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ДИФФУЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ ПРОПАНА В МИКРОСТРУЯХ

**Литвиненко Ю.А.[1], Козлов В.В.[1], Грек Г.Р.[1], Катасонов М.М.[1], Шмаков А.Г.[2], Коробейничев О.П.[2]**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Новосибирск, Россия*
[2]*Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Новосибирск, Россия*

Междисциплинарный интеграционный проект №24, 2012-2014 гг.

**АННОТАЦИЯ**

Представлены результаты экспериментальных исследований круглой и плоской микроструи с П-образным и параболическим профилем скорости на срезе сопла в присутствии акустических колебаний при малых числах Рейнольдса. По результатам исследований установлено, что микроструя как и макроструя трансформируется под воздействием акустического поля. Однако в случае развития микроструи не происходит генерации кольцевых вихрей и отмечается новый механизм трансформации круглой струи в плоскую с развитием характерной для плоских струй синусоидальной неустойчивости. Показаны картины визуализации диффузионного горения пропана в таких микроструях, отмечаются особенности в развитии неустойчивости при наличии конвективных сил.

## ВВЕДЕНИЕ

При горении, в частности струйном горении, протекают различные физические процессы, такие как тепло - и массоперенос, возникновение и развитие когерентных структур и т.д. Естественно, что горение должно рассматриваться в химическом и физическом аспектах. Одним из важнейших факторов, определяющих характер горения диффузионных пламен, является то каким образом организован процесс смешения. Типичным примером диффузионного горения является воспламенение струи горючего газа, вытекающего из длинной трубки малого диаметра в атмосферу. Когда скорость струи невелика, течение является ламинарным, верхняя граница пламени устойчива и горение протекает без колебаний факела. По мере увеличения скорости горючей струи, высота пламени возрастает, достигая некой предельной величины, после которой дальнейшее увеличение приводит к росту амплитуды конвективной неустойчивости и высота факела уменьшается. При этом верхняя граница пламени интенсивно колеблется и появляется акустический шум, что свидетельствует о начале развития турбулентного режима горения. При дальнейшем повышении скорости струи пламя отрывается от среза сопла горелки и устанавливается на некотором расстоянии над горелкой. Пламена такого типа называются поднятыми пламенами. Такие пламена вызывают значительный интерес в связи с тем, что они широко используются на практике и включают в себя много фундаментальных механизмов управляющих стабилизацией и затуханием пламени. Существует несколько моделей предлагающих свою трактовку стабилизации поднятого (турбулентного) пламени при диффузионном горении [1,2,3]. Однако какая из моделей ближе к истинной физической картине – не ясно. Экспериментальные исследования [4] показали, что локальная стехиометрия и характеристики турбулентности являются первичными факторами, управляющими устойчивостью факела, а не диссипация. Большую роль в механизме стабилизации факелов играют когерентные структуры турбулентной струи. Такие структуры сильно восприимчивы к акустическим возмущениям и могут быть использованы для значительного изменения и даже управления развитием струи.

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния начальных усло-

вий на срезе сопла микро-струи и воздействия акустических колебаний на структуру и характеристики развития ламинарной и турбулентной круглой микро-струи без горения и при горении. Причем, на первом этапе, будут проведены предварительные исследования диффузионного ламинарного и турбулентного горения струи пропана без акустического воздействия с целью выявления особенностей данного процесса при изменении начальных условий на срезе сопла. Далее, будет проведено экспериментальное исследование диффузионного горения пропана.

## КРУГЛАЯ МИКРО – СТРУЯ

Экспериментальные исследования структуры и характеристик развития круглой мини (диаметр выходного отверстия сопла – 1,5 мм) и микро – струи (диаметр выходного отверстия сопла от 200 до 500 mm) под воздействием поперечного акустического поля большой интенсивности (90 – 100 дБ) показали, что струя уплощается, начинает синусоидально колебаться как единое целое и далее вниз по потоку расщепляется на две струи [5]. Были проведены экспериментальные исследования процесса диффузионного горения (пропан/воздух) в круглой струе при акустическом воздействии на пламя. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

Термоанемометрические измерения распределения средней ($U$) и пульсационной ($u'$) составляющих продольной компоненты скорости в поперечном сечении круглой струи на расстоянии 0.3 мм от среза сопла и скорости потока на оси струи $U_0$ = 4 м/сек показали наличие П-образного профиля скорости при коротком канале сопла (рис. 2) и параболического профиля скорости (рис. 3) по причине большого удлинения канала сопла ($l/d$ » 40, где $l$ – длина канала сопла, $d$- диаметр выходного отверстия сопла). Следует отметить, что нам впервые удалось измерить и обнаружить принципиальную разницу (ударную и параболическую форму струи) в распределении составляющих продольной компоненты скорости в поперечном сечении круглой струи при столь малом ее диаметре ($d$ = 1 мм). С этой целью был использован датчик термоанемометра с длиной чувствительного элемента 0,3 мм, с шагом измерений 0,02 мм и проводилось осреднение по времени показаний датчика в каждой точке измерений.

Как видно из графиков (см. рис. 2 и рис. 3), форма профиля скорости на срезе сопла ударная с максимумом интенсивности пульсаций скорости ($u'$» 0.4%$U_0$) в областях максимального градиента скорости и минимумом интенсивности пульсаций скорости ($u'$ = 0.2%$U_0$) в области безградиентного ядра струи для случая короткого канала сопла (рис. 2) и форма профиля скорости на срезе сопла параболическая с максимумом интенсивности пульсаций скорости ($u'$ » 0.1%$U_0$) на оси струи для случая удлиненного канала сопла (рис. 3). Данные результаты измерений коррелируют с данными измерений профилей средней и пульсационной составляющих скорости для круглых макро – струй [6].

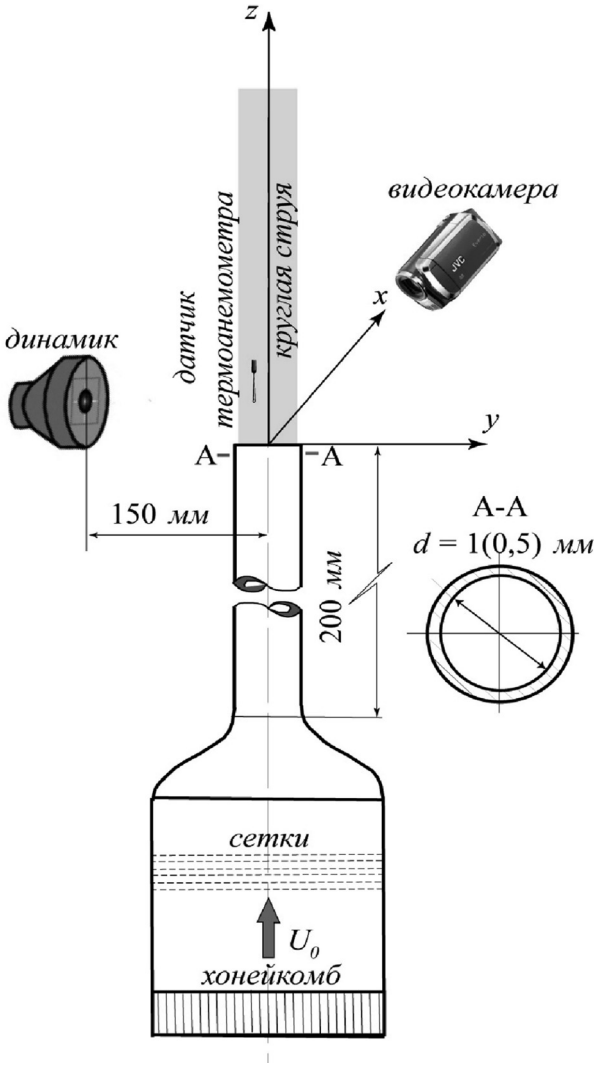


Рис.1 Схема эксперимента.

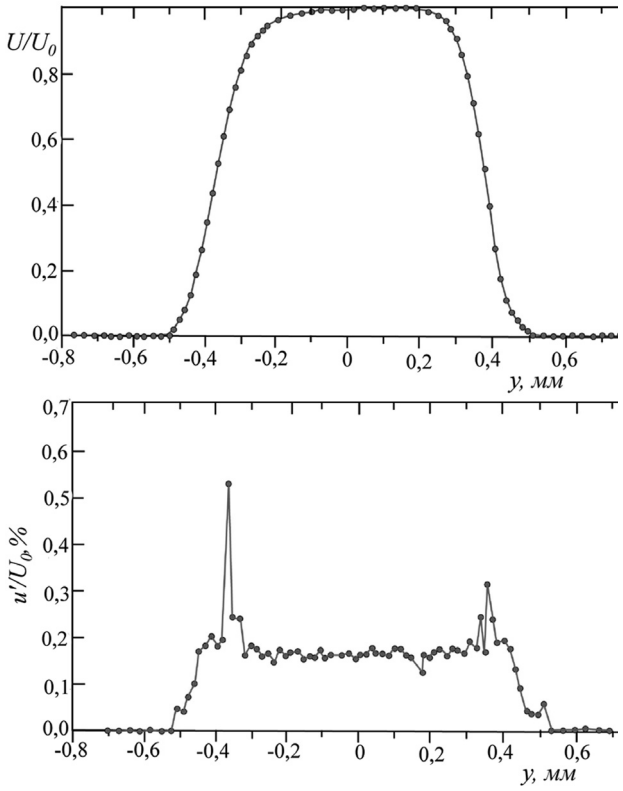


Рис.2 Распределение средней ($U$) - вверху и пульсационной ($u'$) внизу составляющих продольной компоненты скорости в поперечном сечении круглой струи на расстоянии 0,3 *мм* от среза сопла для случая короткой длины канала сопла, скорость струи на оси струи $U_0$ = 4 м/сек.

Однако, в отличие от круглых макро – струй с П-образным профилем скорости на срезе сопла, где развитие струи связано с неустойчивостью Кельвина – Гельмгольца, сопровождаемое генерацией кольцевых вихрей по типу варикозной неустойчивости полосчатых структур в пристенных сдвиговых течениях, параболическая макро – струя и микро – струя как с ударным, так и параболическим профилем скорости на срезе сопла подвержены лишь синусоидальной неустойчивости как единое целое.

Попытки возбудить варикозную моду неустойчивости (кольцевые вихри) в данных течениях не увенчались успехом. Эксперименты показали, что макро – струя с параболическим профилем скорости на срезе сопла сохраняет ламинарный режим течения на расстоянии более 10-15 калибров. Механизм разрушения такой струи не связан с развитием синусоидальной неустойчивости. В тоже время, круглая микро – струя с П – образным профилем скорости развивается аналогично круглой микро-струе с параболическим профилем, со значительным ламинарным участком без кольцевых вихрей [7].

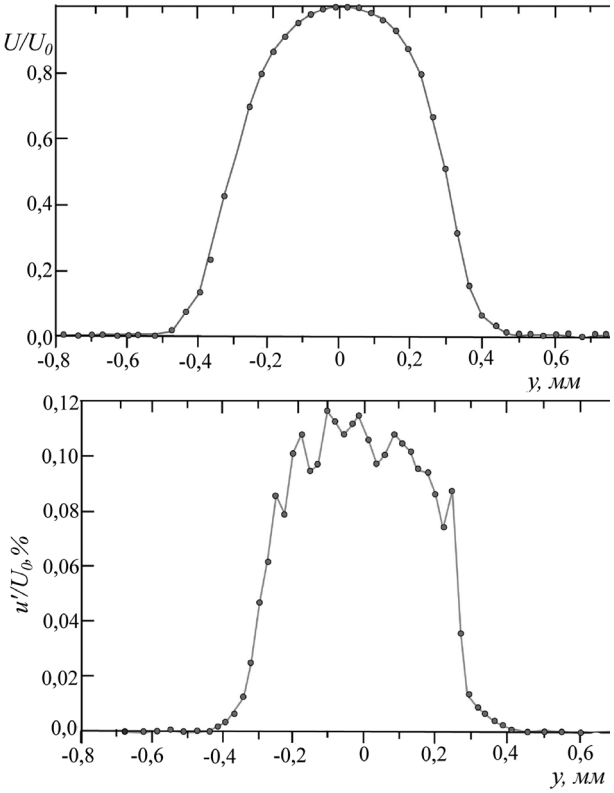


Рис.3 Распределение средней ($U$) - вверху и пульсационной ($u'$) - внизу составляющих продольной компоненты скорости в поперечном сечении круглой струи на расстоянии 0,3 *мм* от среза сопла для случая удлиненного ($l/d$ » 40) канала сопла, скорость струи на оси струи $U_0$ = 4 м/сек.

На основании полученных знаний о механизмах развития круглой макро и микро – струи как в отсутствии акустического воздействия, так и при его наличии проведены экспериментальные исследования диффузионного горения круглой микро – струи с параболическим профилем скорости на срезе сопла. Частота акустического воздействия варьировалась от единиц Гц до 4 кГц, интенсивность звука составляла – 90 дБ. Скорость истечения струи контролировалась с помощью прецизионного расходомера и составляла $U_0$ = 16,65 м/сек.

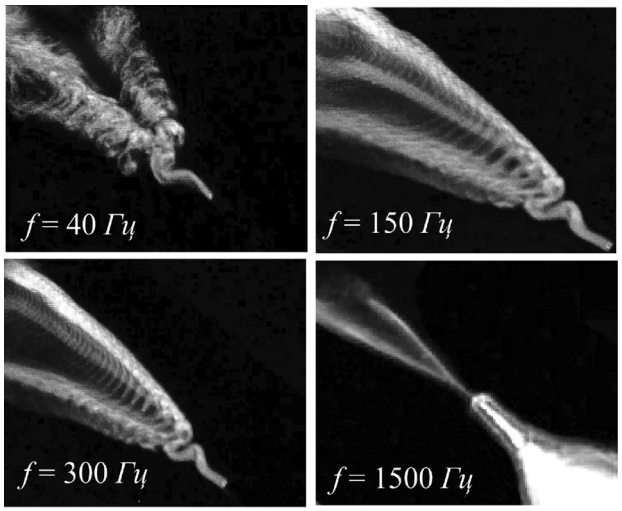


Рис.4 Картины дымовой визуализации процесса раздвоения круглой микро - струи под воздействием поперечного акустического поля различной частоты.

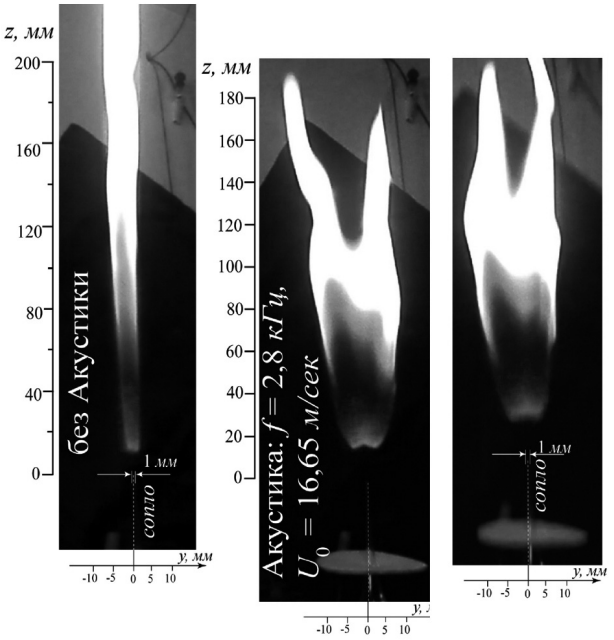


Рис.5 Процесс раздвоения пламени круглой микро - струи (d = 1 мм) в поперечном акустическом поле при диффузионном горении пропана (слева - пламя струи без акустического воздействия, справа - набор фото пламени струи при акустическом воздействии, f = 2,8 кГц), $U_0$ = 16,65 м/сек, $Re_d = U_0 \cdot d/n$ = 1110.

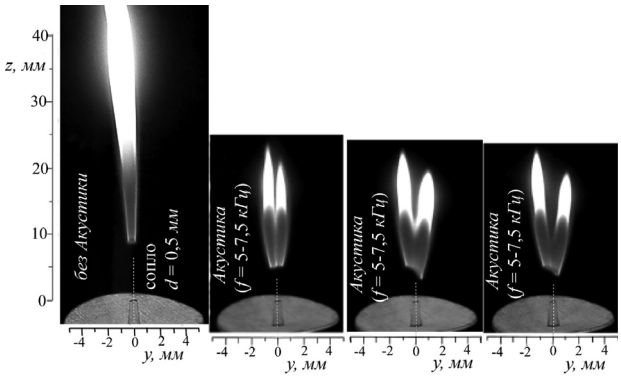


Рис.6 Процесс раздвоения пламени круглой микро - струи (d = 0,5 мм) в поперечном акустическом поле при диффузионном горении пропана (слева - пламя струи без акустического воздействия, справа - фото пламени струи при акустическом воздействии, съемка с разных углов, f = 5-7,5 кГц), $U_0$ = 12,5 м/сек, $Re_d = U_0 \cdot d/n$ = 417.

Установлено, что под воздействием поперечного акустического поля поднятое пламя значительно расширилось в сравнении с пламенем без акустического воздействия. Физический механизм этого явления объяснен авторами в работе [6] где показано, что круглая микро – струя под воздействием поперечного акустического поля уплощается на начальном этапе развития и приобретает свойства типичные для развития плоских струй, связанное с развитием синусоидальных колебаний струи как единого целого. Следует отметить, что синусоидальное колебание плоской струи как единого целого приводит к уширению струи в плоскости перпендикулярной плоскости воздействия акустического поля и, в конечном итоге, разрыву струи (рис.4). На рис. 5 представлены снимки факела для струи с диаметром сопла $d$ = 1 мм. На фото можно наблюдать процесс раздвоения пламени, что напрямую связано с механизмом, наблюдаемым при раздвоении круглой струи в поперечном акустическом поле (рис.4). Аналогичный результат раздвоения пламени круглой микро – струи при диффузионном горении струи пропана, истекающей из сопла диаметром $d$ = 0,5 мм, представлен на рис. 6. Уменьшение диаметра сопла в 2 раза сместило область оптимальных частот акустических колебаний с 2,8кГц в 5,7кГц. Таким образом, с уменьшением выходного диаметра сопла область воз-

действующих на струю частот смещается в сторону увеличения.

Следует отметить, что раздвоение пламени струи наблюдается только в случае реализации поднятого пламени. Установлено также, что развитие синусоидальной неустойчивости в пламени круглой микро - струи, зависит от направления вектора поперечного акустического поля.

## ДИФФУЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В ПЛОСКОЙ МИКРО - СТРУЕ ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Экспериментальные исследования структуры и характеристик развития плоской мини (ширина выходной щели сопла $h$ = 2 мм) и микро – струи (ширина выходной щели сопла $h$ = 700, 500, 200 мм) под воздействием поперечного акустического поля большой интенсивности (90 – 100 дБ) показали, что струя подвержена синусоидальному колебательному процессу как единое целое и далее вниз по потоку расщепляется на две струи [5]. Также проведены экспериментальные исследования процесса диффузионного горения пропана в плоской струе на выходе из сопла малого удлинения ($l/h$ = 10, где l – длина щели сопла и $h$ = 0,2мм – ширина щели сопла) при акустическом воздействии на пламя. Схема эксперимента аналогична представленной на рис.1. Основываясь на результатах предыдущих исследований по струйной тематике [5, 8], для формирования параболического профиля на выходе сопла был реализован канал с удлинением $l/h$ ³ 150, где $l$ – длина канала и $h$ – ширина щели. Частота акустического воздействия варьировалась от единиц Гц до 6 кГц, интенсивность звука составляла примерно 90 дБ. Скорость истечения струи контролировалась с помощью прецизионного расходомера и составляла $U_0$ » 20,8м/сек.

В результате проведенных экспериментов установлено, что присоединенное к срезу сопла пламя при наложении акустического поля заметно расширяется, вследствие распространения синусоидальной вихревой дорожки. В тоже время конвективные силы подавляют рост амплитуды возмущений развивающихся при воздействии акустических колебаний начиная с сопла струи. С ростом скорости истечения струи, при ее определенном пороговом значении, фронт пламени отходит от среза сопла и реализуется, так называемое, поднятое пламя (рис.7). Таким образом появляется участок струи не охваченный пламенем, именно этот участок является областью роста синусоидальных возмущений до значительных амплитуд, которые способны трансформировать факел.

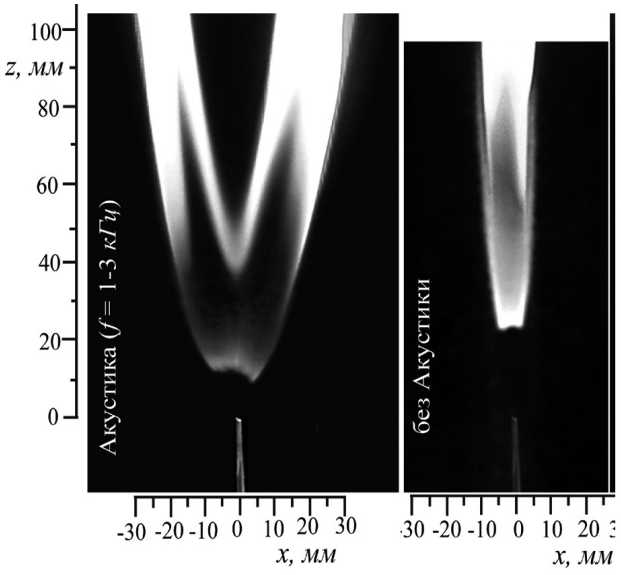


Рис.7 Процесс раздвоения пламени плоской микро - струи (h = 0,2 мм) в поперечном акустическом поле (f = 1-3 кГц, A » 90 дБ) при диффузионном горении пропана, $U_0$ » 32 м/сек, $Re_h = U_0 \cdot h/n$ = 426.

В данной ситуации наблюдается раздвоение пламени при акустическом воздействии в диапазоне частот от 1 до 3 кГц. Следует отметить, что при режиме горения когда отсутствует акустическое воздействие, высота поднятого от среза сопла пламени примерно в два раза больше, чем данный параметр в ситуации наличия акустического воздействия на струю. Данный факт согласуется с ранее проведенными исследованиями и объясняется понижением продольной компоненты скорости струи при воздействии акустических колебаний и росту поперечной компоненты скорости, поскольку развитие синусоидальной неустойчивости в струях связано с перераспределением соотношения продольной и поперечной компоненты скорости. В результате, при понижении скорости струи газа фронт пламени продвигается ближе к соплу.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

•Обнаружено, что диффузионное горение пропана в круглой ламинарной микро – струе с ударным и параболическим профилем скорости на срезе сопла сопровождается наличием присоединенного к срезу сопла пламени, развивающегося вниз по потоку без каких-либо пульсаций.

• Установлено, что диффузионное горение пропана в круглой турбулентной микро – струе сопровождается отрывом пламени от среза сопла. Процесс горения охватывает только сдвиговый слой струи, по форме напоминающий полый цилиндр, поскольку именно в этом слое максимальный уровень пульсаций, а следовательно и более интенсивное смешение газа с воздухом.

• Установлено, что пламя при горении круглой микро – струи в поперечном акустическом поле подвержено влиянию акустических колебаний. Под действием акустического поля происходит уплощение круглой струи с разделением струи на две, вызванное развитием колебательного процесса в струе. При отключении акустики, процесс горения возвращается к первоначальным условям горения.

• Показано, что поднятое пламя при диффузионном горении круглой микро – струи, находящейся под воздействием поперечного акустического поля, веерно расширяется в плоскости ориентированной к источнику акустических колебаний. При вращении источника акустики вокруг факела, плоский факел также вращается ориентируясь на положение источника акустики.

## ЛИТЕРАТУРА


1. Vanquickenborne L. and A.van Tiggelen The stabilization mechanism of lifted diffusion flames // Combastion and Flame. – 1966. – Vol. 10. – N. 1. – P. 59 – 69.
2. Peters N., Williams F. Liftoff characteristics of turbulent jet diffusion flames // AIAA J. – 1983. – Vol. 21. – N. 1. – P. 423 – 429.
3. Byggstoyl S., Magnussen B.F. A Model for Flame Extinction in Turbulent Flow // Fourth Symposium on Turbulent Shear Flows (L.J.S. Bradbury, F. Durst, F.W. Schmidt and J.H. Whitelaw, Eds) Karlsruhe. – 1983. – P. 10.32 – 10.38.
4. R.W. Schefer R.W., Namazian M.and Kelly J. Stabilization of lifted turbulent-jet flames // Combastion and Flame. R.W. – 1994. – Vol. 99. – N. 1. – P. 75 – 86.
5. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко Ю.А., Козлов Г.В., Литвиненко М.В. Дозвуковые круглая и плоская макро и микро – струи в поперечном акустическом поле //Вестник НГУ. Серия: Физика. – 2010. – Т 5. – N. 2. – С. 28 – 42. Kozlov V.V., Grek G.R, Litvinenko Yu.A., Kozlov G.V., Litvinenko M.V. Subsonic round and plane jets in the transversal acoustic field // Vestnik NSU. Physics. – 2010. – T 5. – N. 2. – C 28 – 42.
6. Litvinenko M.V., Kozlov V.V., Kozlov G.V., and Grek G.R. Effect of streamwise streaky structures on the turbulization of round jets // J. Appl. Mech. Tech. Phys. – 2004. – Vol. 45. – No. 3. – P. 50-60.
7. Kozlov V.V., Grek G.R., Litvinenko Yu.A., Kozlov G.V., Litvinenko M.V. Round and plane jets in a transverse acoustic field. Journal of Engineering Thermophysics. 2011. Vol. 20. No. 3. P. 1–18.
8. Kozlov G.V., Grek G.R., Sorokin A.M., and Litvinenko Yu.A. Influence of initial conditions at the nozzle exit on the structure of round jet // Thermophysics and Aeromechanics. – 2008. – Vol. 15. – N. 1. – P. 55 – 68.