

М. В. Литвиненко^{1,2}, **Ю. А. Литвиненко**¹, **В. В. Вихорев**², **Г. В. Козлов**¹

¹ *Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия*

² *Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090, Россия*

litmar@itam.nsc.ru, litur@itam.nsc.ru, vix0pb@mail.ru, grigory_kozlov@ngs.ru

ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА КРУГЛЫЕ СТРУИ, СФОРМИРОВАННЫЕ В КРИВОЛИНЕЙНОМ КАНАЛЕ *

Представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию поперечных акустических колебаний различной частоты на затопленные круглые дозвуковые струи, сформированные в криволинейном канале ($d = 20; 9; 1,5$ мм). При помощи лазерно-дымовой визуализации получены мгновенные картины сечений струй, которые показали наличие в струях двух мод неустойчивостей (вихри Кельвина – Гельмгольца и вихри Дина) и их взаимодействие. Показано влияние частоты акустических колебаний на модуляцию струи, в частности на длину волны неустойчивости Кельвина – Гельмгольца. Сравняются картины диффузионного горения струи пропана для сопла с диаметром $d = 1,5$ мм без акустического воздействия и с акустическим воздействием. Замечено, что пламя при диффузионном горении пропана подвержено трансформации под действием акустического поля и развивающихся в струе неустойчивостей.

Ключевые слова: круглая струя, криволинейный канал, лазерно-дымковая визуализация, вихри Дина, неустойчивость Кельвина – Гельмгольца.

Если рассматривать течения, наиболее часто встречающиеся на практике, то течение в изогнутом канале является одним из них. Особенность таких течений – возникновение завихренности, обусловленной центробежными силами, которые генерируют вторичное течение в виде двух противорвращающихся вихрей [1]. Анализируя результаты исследования течений в криволинейных каналах и в затопленных струях [2], можно сделать вывод, что объединяя два случая – криволинейный канал и затопленную струю, на выходе из сопла будут наблюдаться вихри Дина, которые имеют особенности развития.

Цель работы – исследование структуры течения в затопленных круглых струях, сформированных в криволинейных каналах для различных диаметров сопла ($d = 20; 9; 1,5$ мм) и чисел Дина ($De = 952, 587, 136$), влияния акустического поля на возникающие в струе вихревые структуры при помощи методов визуализации (лазерно-дымковой визуализации и метода PIV). Эксперименты проводились на струйных установках в ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки для струи с диаметром сопла $d = 20$ мм и числом Дина $De = 952$. Основой установки является класси-

* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 14-08-00201_а, 14-08-31166 мол_а.

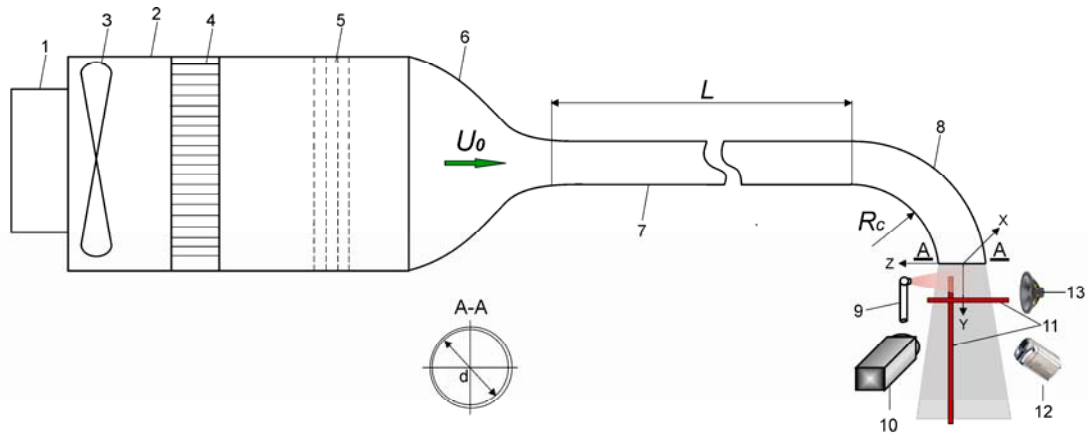


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – дымогенератор; 2 – форкамера; 3 – вентилятор; 4 – хонейкомб; 5 – набор детурбулизирующих сеток; 6 – сопло Витошинского; 7 – прямолинейный канал ($L = 4\,000$ мм); 8 – криволинейный участок канала ($R_c = 120$ мм, $\alpha = 90^\circ$); 9 – импульсный Nd:YAG-лазер; 10 – CCD-камера; 11 – положение лазерных ножей; 12 – цифровая видеокамера; 13 – динамический громкоговоритель

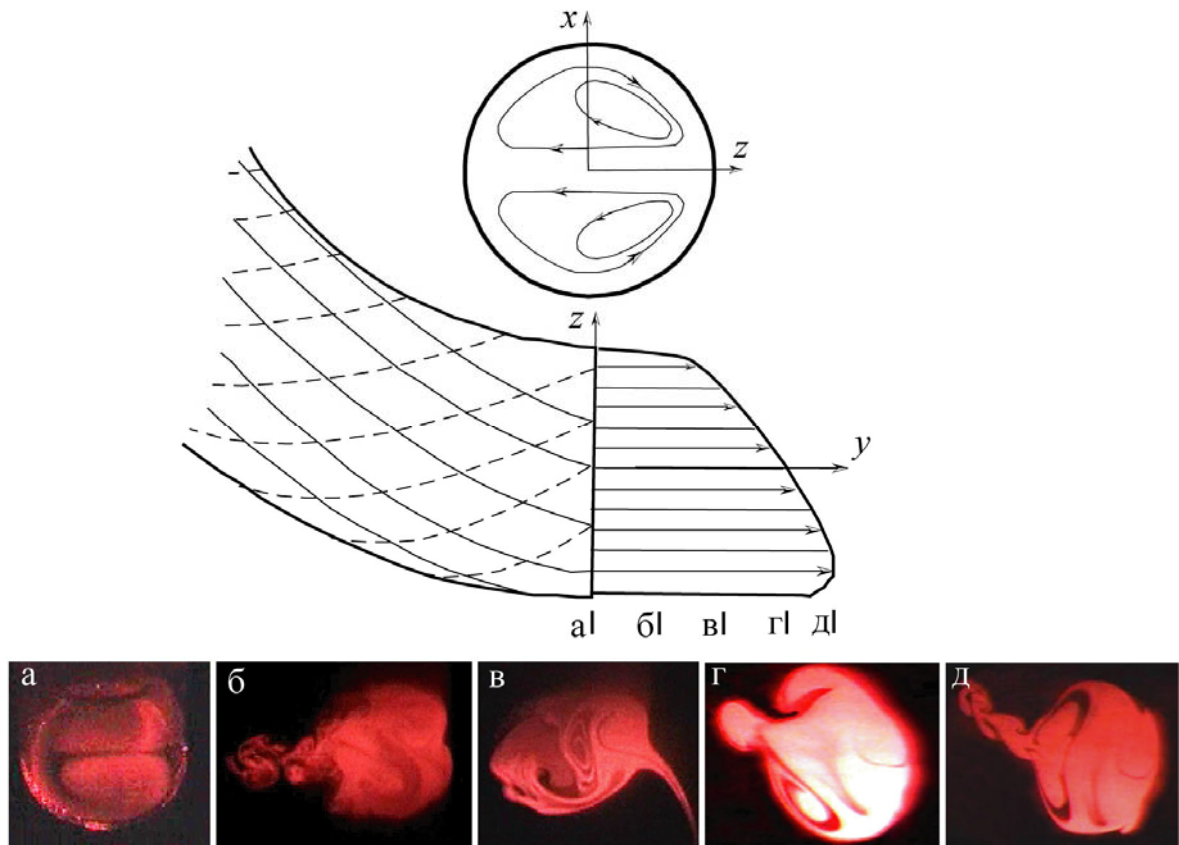


Рис. 2. Схема течения и дымовая визуализация поперечных сечений струи в плоскости xz в различных координатах по оси y (вниз по течению), $f = 40$ Гц

ческий сопловой аппарат, выполненный по схеме сопла Витошинского с хонейкомбом и набором детурбулизирующих сеток в форкамере. К выходу сопла стыковалась трубка длиной 4 м с внутренним диаметром,

равным диаметру выходного отверстия сопла ($d = 0,02$ м). Такое удлинение ($l/d = 200$) позволяет сформировать параболический профиль скорости течения в канале, типичный для течения Хагена – Пуазейля [3]. На прямой

участок трубы устанавливался криволинейный насадок со следующими параметрами: угол кривизны $\alpha = 90^\circ$, диаметр $d = 0,02$ м, радиус кривизны $R_c = 0,12$ м, в котором развивались вихри Дина. Эксперименты проводились при числе Рейнольдса $Re_R = U_0 \cdot R/\nu = 3\,300$, рассчитанном по скорости невозмущенного потока на входе в криволинейный участок сопла, $U_0 = 5$ м/с, и его радиусу, $R = 10$ мм. Акустическое воздействие на струю осуществлялось с помощью динамического громкоговорителя, на который от звукового генератора подавался синусоидальный сигнал различной частоты и амплитуды.

Дымовая визуализация течения выполнена с помощью подачи в струйную установку дыма со стороны вентилятора, генерируемого дымовым генератором промышленного производства (ZR-31). Картины дымовой визуализации фиксировались цифровой видеокамерой с частотой 25 кадров в секунду.

Для струй с меньшим диаметром сопел ($d = 9; 1,5$ мм) схемы установки имели аналогичный вид, с поправкой на размеры элементов установки. Для струи с диаметром сопла $d = 9$ мм прямолинейный участок имел длину 1 000 мм, криволинейный насадок имел параметры: угол кривизны $\alpha = 90^\circ$, радиус кривизны $r = 75$ мм. Число Дина в этом случае составляло $De = 587$. Для струи с диаметром $d = 1,5$ мм длина прямолинейного участка составляла 150 мм, криволинейный насадок имел параметры: угол кривизны $\alpha = 90^\circ$, радиус кривизны $r = 10$ мм.

Помимо лазерно-дымовой визуализации для исследования влияния акустического поля на струю с диаметром сопла $d = 20$ мм использовался метод трассерной визуализации (англ. – PIV). PIV-система состояла из двойного импульсного Nd:YAG-лазера с длиной волны излучения 532 нм, длительностью импульса 10 нс. В ходе эксперимента временная задержка импульсов когерентного света варьировалась в пределах от 100 до 200 мкс, представленные данные выполнены при задержке 150 мкс, которая является оптимальной для используемых скоростей потока. Толщина лазерного «ножа» в измерительной области составляла 0,8 мм. Регистрация снимков осуществлялась цифровой камерой Видеоскан 11002/П/Д – 2001 с разрешением 4004×2671 пикс, что соответствовало 95×63 мм. Совместно с камерой использовался объектив Sigma 105 mm

F2.8 DG MACRO. В качестве трассеров использовалась смесь пропиленгликоля (1,2-пропандиол, разбавленный 40 % воды) и тот же генератор дыма, что и для лазерно-дымовой визуализации. Размер частиц составлял примерно 2,5–3,0 нм. Раствор испарялся в генераторе дыма и подавался с необходимой концентрацией в рабочий тракт установки.

На рис. 2 представлены схема течения в криволинейном канале из работы [4] и мгновенные картины лазерно-дымовой визуализации поперечных сечений круглой струи, сформированной в криволинейном канале с диаметром сопла $d = 20$ мм в плоскости xz в различных координатах по оси u (вниз по течению). Частота наложенного акустического поля в этом случае составляла $f = 40$ Гц.

Дымовая визуализация поперечного сечения круглой струи на выходе из сопла и на различных расстояниях вниз по течению демонстрирует наличие двух противорвращающихся вихрей. В процессе развития струи можно наблюдать деформацию вихрей Дина, тем не менее отчетливо видна пара вихрей вблизи стенки с меньшим радиусом скругления. Вблизи стенки с большим радиусом скругления наблюдается развитие неустойчивости Кельвина – Гельмгольца, которая проявляет себя в этом случае в виде Ω -образного вихря. Взаимодействие вихрей Дина с неустойчивостью Кельвина – Гельмгольца имеет трехмерный характер и приводит к сложной деформации структуры струи. В связи с наблюдением неустойчивости Кельвина – Гельмгольца в круглой струе, сформированной в криволинейном канале, становится очевидным сильное влияние акустического поля на развитие струи. Как и в случае с П-образным («ударным») профилем скорости, в струе с вихрями Дина частота акустического поля влияет на длину волны вихрей Кельвина – Гельмгольца. Это явление можно наблюдать, сравнивая поля завихренности (рис. 3) сечений zy (середина струи) для частот $f = 60; 80; 160$ Гц соответственно (поток сверху вниз).

Можно заметить, что со стороны стенки с большим радиусом скругления происходит развитие вихрей Кельвина – Гельмгольца и их модуляция частотой акустического поля. Кроме того, наблюдается еще одна вихревая дорожка в струе, которая, по всей видимости, является результатом взаимо-

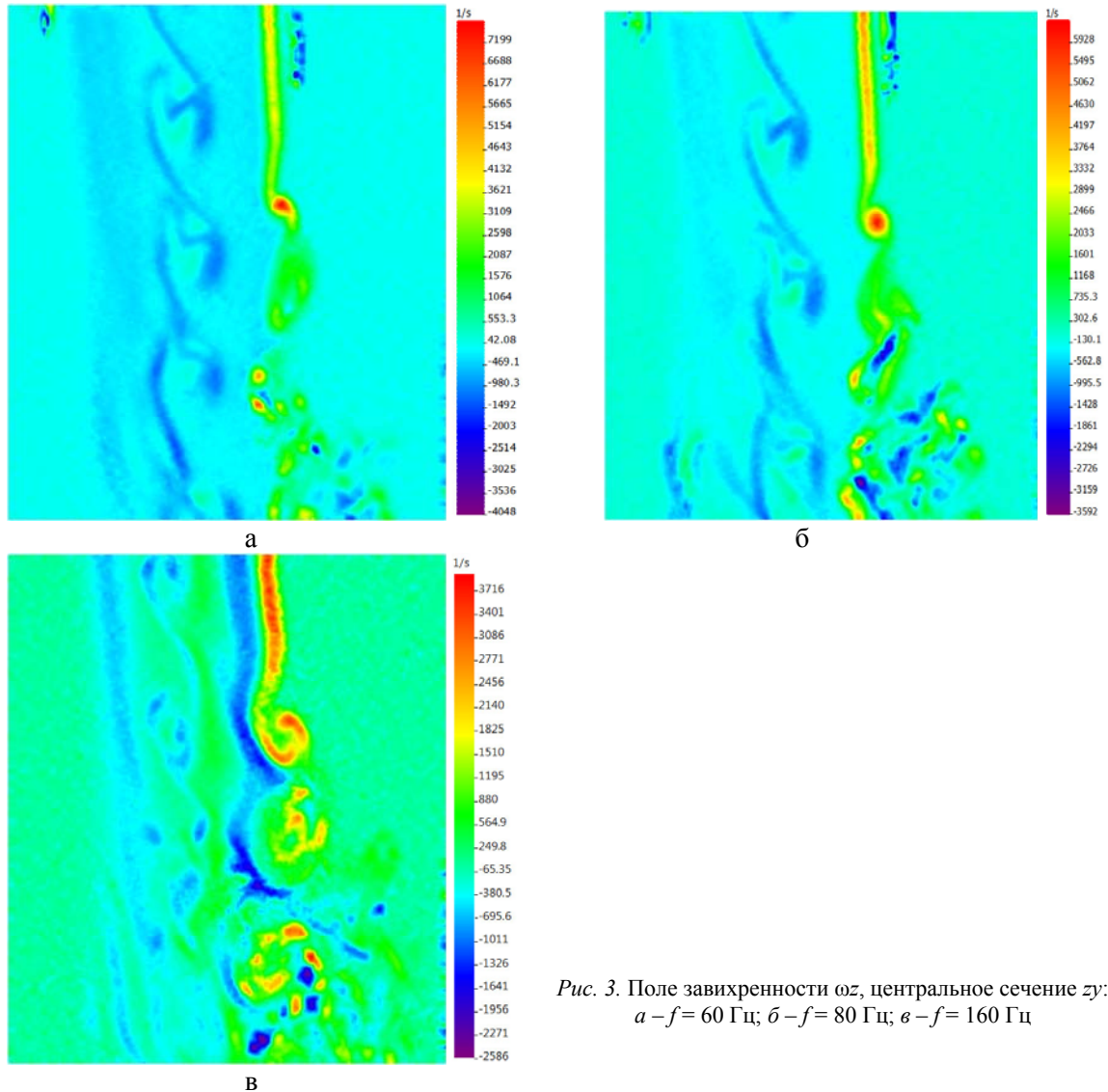


Рис. 3. Поле завихренности ωz , центральное сечение zy :
 $a - f = 60$ Гц; $б - f = 80$ Гц; $в - f = 160$ Гц

действия омега-образных вихрей Кельвина – Гельмгольца и вихрей Дина, которая так же восприимчива к акустическому воздействию.

Аналогичную картину течения можно наблюдать у круглых струй, сформированных в криволинейных каналах с меньшим диаметром сопла. На рис. 4 показаны мгновенные картины течения продольных сечений струи (центральное сечение zy , поток сверху вниз), полученные при помощи лазерно-дымовой визуализации для струи с диаметром $d = 9$ мм и $De = 587$ (слева), и для струи с диаметром $d = 1,5$ мм и $De = 136$ (справа) при частоте акустического поля $f = 60$ Гц. Частота импульсов лазерного ножа синхронизована с частотой наложенного акустического поля.

Анализируя картины течения можно заметить аналогичную топологию развития струй, сформированных в криволинейном канале при заданных параметрах: со стороны стенки с бóльшим радиусом скругления просматривается неустойчивость Кельвина – Гельмгольца на обеих картинках, для струи с диаметром $d = 9$ мм также видна внутренняя вихревая дорожка. Для струи с диаметром $d = 1,5$ мм можно наблюдать синусоидальные колебания струи как единого целого в связи с увеличением энергии воздействия акустических колебаний по отношению к энергии самой струи.

На рис. 5 показаны картины диффузионного горения струи пропана, сформированной в криволинейном канале, для сопла с диаметром $d = 1,5$ мм без акустического

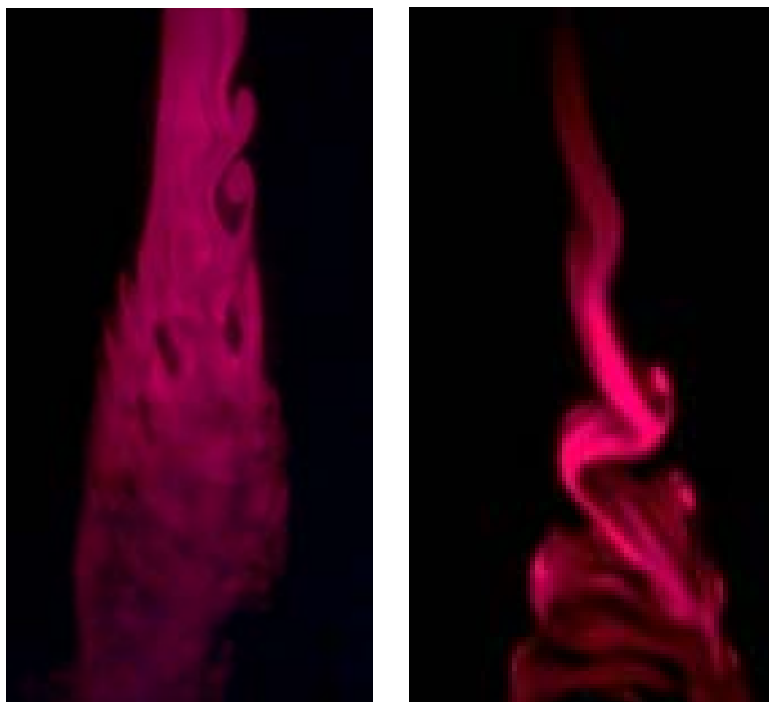


Рис. 4. Дымовая визуализация продольных сечений струи с диаметром $d = 9$ мм (слева) и для струи с диаметром $d = 1,5$ мм (справа)

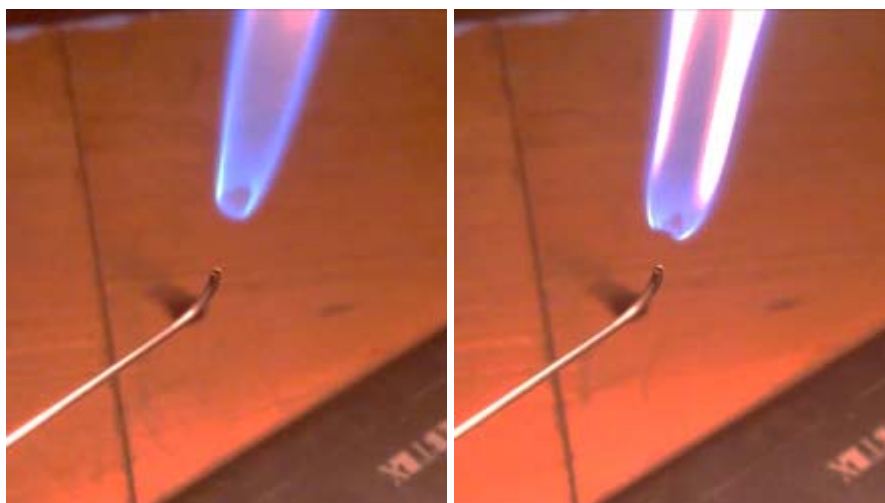


Рис. 5. Картины диффузионного горения струи пропана для сопла с диаметром $d = 1,5$ мм без акустического воздействия (слева) и с акустическим воздействием (справа), $f = 2\,500$ Гц

воздействия (слева) и с акустическим воздействием (справа), $f = 2\,500$ Гц. Можно заметить, что пламя при диффузионном горении пропана подвержено трансформации под действием акустического поля и развивающихся в струе неустойчивостей.

Упомянутые факторы изменяют фронт пламени, следовательно, влияют на процессы смешения при наличии конвективных сил.

Список литературы

1. Dean W. R. Note on the motion of fluid in a curved pipe // *Phil. Mag.* 1927. Vol. 4. P. 208–223.
2. Dean W. R. The stream-line motion of fluid in a curved pipe // *Phil. Mag.* 1928. Vol. 5. P. 671–695.
3. Litvinenko Yu. A., Grek G. R., Kozlov G. V., Sorokin A. M., Litvinenko M. V. Develop-

ment of a free round jet at different conditions at the nozzle exit under an acoustic action // Progress in Flight Physics. 2012. Vol. 3. P. 429–448.

4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. С. 584–587.

Материал поступил в редколлегию 13.05.2015

M. V. Litvinenko^{1,2}, Yu. A. Litvinenko¹, V. V. Vikhorev², G. V. Kozlov¹

¹ Institute of Theoretical and Applied Mechanics of SB RAS
4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

² Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

litmar@itam.nsc.ru, litur@itam.nsc.ru, vix0pb@mail.ru, grigory_kozlov@ngs.ru

INFLUENCE OF ACOUSTIC FLUCTUATIONS ON THE ROUND JET, FORMED IN CURVED CHANNEL

The results of experimental investigations on the effect of the transverse acoustic fluctuations for subsonic round jet formed in curved channel ($d = 20; 9; 1.5$ mm) are presented. Using laser – smoke visualization the jet instant picture sections were received, which showed the presence of two modes jets instabilities – Kelvin – Helmholtz vortices and Dean vortices and their interaction. The influence of the acoustic excitation frequencies on the jets are shown, in particular on a wavelength of Kelvin – Helmholtz instability. The picture of the diffusion combustion of propane jet with a nozzle diameter of $d = 1,5$ mm without acoustic excitation and with acoustic excitation are compared. It has been observed that the diffusion flame combustion of propane is subject to transformation by the action of the acoustic field and developing instabilities in the jet.

Keywords: free round jet, curved channel, Dean vortices, smoke visualization, acoustic field, PIV-measurements, Kelvin – Helmholtz instability.