

С.И. Исатаев, Ж.К. Сейдулла

НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ И РАЗВИТИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В СТРУЕ НА КРИВОЛИНЕЙНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

**Аннотация.** Цель данной работы заключается в экспериментальном исследовании развития вихревой структуры струе, распространяющейся по выпуклой и вогнутой поверхности при наличии акустического воздействия.

Установлено, что при воздействии с частотой, соответствующей акустическому резонансному воздействию в струе вдоль криволинейной поверхности интенсивность крупномасштабных вихрей растет, а при высокочастотном воздействии крупномасштабные вихри ослабляются.

Однако вблизи стенки уровень турбулентности выше в струе на выпуклой поверхности, чем в струе на вогнутой поверхности. Это особенно заметно по изменению уровня турбулентности по длине струи вдоль линии максимума скорости. Видно, что интенсивность турбулентности в струе на выпуклой поверхности продолжает расти с удалением от сопла и становится значительно больше, чем в струе вдоль плоской поверхности.

**Ключевые слова:** солнечный элемент, кремниевые нанонити, диффузонт, спектр отражения, спектральная характеристика

### Введение

Для измерения турбулентных характеристик струи в работе использована система термоанемометрической установки.

Цифровой вольтметр для регистрации средней скорости имеет интервал осреднения  $1 \div 100$  с при точности измерения напряжения 0,5 %. Входящий в комплект термоанемометрической системы вольтметр среднеквадратичных значений (СКЗ) в диапазоне частот  $3 \div 155$  кГц при интервале осреднения  $3 \div 30$  с измерял с точностью  $\pm 2,0$  %. При настройке термоанемометра и дальнейшем контроле за его работой был использован осциллограф С8-13. Частотная характеристика спектра турбулентных пульсаций измерялась анализатором спектра АСЧХ-1, имеющего рабочую полосу частот  $20 \div 20000$  Гц.

Для визуального исследования, рабочий участок установки помещался в поле зрения теневого пробора ИАБ-451. Рядом был размещен комплекс аппаратуры, для изучения процессов естественного вихреобразования и акустического воздействия на струю. Динамик мощностью 25 Вт с защитным кожухом был установлен в нижней части успокоительной камеры и создавал при необходимости поле звуковой волны, направленное вертикально вверх по течению

струи. Внутренняя стенка камеры покрыта звукопоглощающим материалом, необходимым для предотвращения нежелательного резонанса.

Для визуализации воздушной струи поток воздуха подогревался в успокоительной камере до температуры  $35^0 \div 40^0$  с помощью сетки, по которой пропускался ток от автотрансформатора.

Для того, чтобы выяснить влияние продольной кривизны на вихревую структуру была визуально исследована струя, распространяющаяся вдоль выпуклой и вогнутой цилиндрической поверхностей при значениях начального параметра кривизны  $Sr = \pm 0,036; \pm 0,056; \pm 0,094$ , как без воздействия, так и с наложением акустического воздействия, при начальной скорости  $U_0 = 2,8$  м/с.

Из анализа визуальной картины течения видно, что при движении по вогнутой поверхности, из-за воздействия центробежной силы струя становится уже, область ламинарного течения становится больше, а при движении вдоль выпуклой поверхности наблюдается обратная картина. Установлено, что при воздействии с частотой, соответствующей акустическому резонансному воздействию для струи вдоль пластины, в струе вдоль криволинейной

поверхности интенсивность крупномасштабных вихрей также растет, а при высокочастотном воздействии крупномасштабные вихри ослабляются.

С ростом начальной скорости струи длина начального ламинарного участка уменьшается, дискретные вихри становятся менее интенсивными. Переход в турбулентное течение на выпуклой поверхности начинается раньше, чем на вогнутой поверхности. Это явление наблюдается и по результатам измерения уровня турбулентности термоанемометром.

Из анализа данных видно, что распределение уровня турбулентности по сечению струи качественно такое же как и в струе вдоль плоской пластины. Однако вблизи стенки уровень турбулентности выше в струе на выпуклой поверхности, чем в струе на вогнутой поверхности. Это особенно заметно по изменению уровня турбулентности по длине струи вдоль линии максимума скорости. Видно, что интенсивность турбулентности в струе на выпуклой поверхности продолжает расти с удалением от сопла и становится значительно больше, чем в струе вдоль плоской поверхности.

Из экспериментальных данных исследований турбулентных течений можно сделать вывод, что порожденные в каком-либо месте потока турбулентные пульсации не только сносятся по потоку (конвективный перенос), но и передаются по направлению нормали к линиям тока, причем не только непосредственно в соседние слои жидкости (диффузия), но так же на значительное расстояние. Последнее явление предлагается назвать «дальнодействием» турбулентности [1] (Г.Н. Абрамович).

Наиболее ярко эффект дальнодействия проявляется в следующих известных фактах: а) значительные пульсации, возникающие в ядре постоянной скорости начального участка струи; б) шум турбулентной струи; в) пульсации давления и скорости внутри ламинарного подслоя и на стенке при наличии турбулентного пограничного слоя; г) деформация границ трехмерной струи; д)

повышение турбулентности на фронте пламени и т.д.

Опыты Брууна [5], в которых производилось синхронное термоанемометрическое измерение пульсаций скорости в ядре начального участка струи одновременно с фотографированием крупных вихрей, обнаружили, что турбулентные пульсации малой амплитуды в слое смешения не коррелированы с мелкими пульсациями в ядре; возникающие же в слое смешения (в момент прохождения крупного вихря) пульсации большой амплитуды совпадают во времени с большими пульсациями в том же сечении ядра.

Результаты наших измерений уровня турбулентности по сечению пристенной струи, распространяющейся вдоль выпуклой и вогнутой цилиндрической поверхностей, представлены на рисунках 1 и 2. Как видно из рисунков, распределение уровня

турбулентности  $\varepsilon_{it} = \sqrt{\overline{U'^2}} / U^2$  по сечению струи качественно такое же, как в струе вдоль плоской пластины. Однако вблизи стенки уровень турбулентности выше в струе на выпуклой поверхности, чем в струе на вогнутой поверхности.

Видно, что интенсивность турбулентности в струе на выпуклой поверхности продолжает расти с удалением от сопла и становится значительно больше, чем в струе вдоль плоской поверхности.

В струе вдоль вогнутой поверхности, сначала интенсивность турбулентности резко растет, а затем с удалением от сопла приближаются к интенсивности турбулентности в струе на плоской поверхности.

Это обусловлено влиянием центробежных сил на устойчивость течения в струе. Причем в струе на выпуклой поверхности центробежные силы должны способствовать подавлению турбулентности в пристенном слое и интенсифицировать их во внешней струйной части пограничного слоя. Так как во внешнем струйном пограничном слое интенсивность турбулентности гораздо выше, чем во внутреннем пограничном слое, то в целом вся струя становится высокотурбулентной.

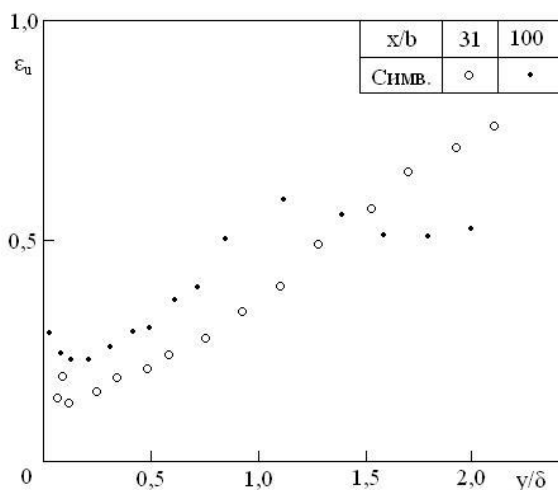


Рисунок 1. Уровень турбулентности по сечению пристенной струи вдоль выпуклой поверхности

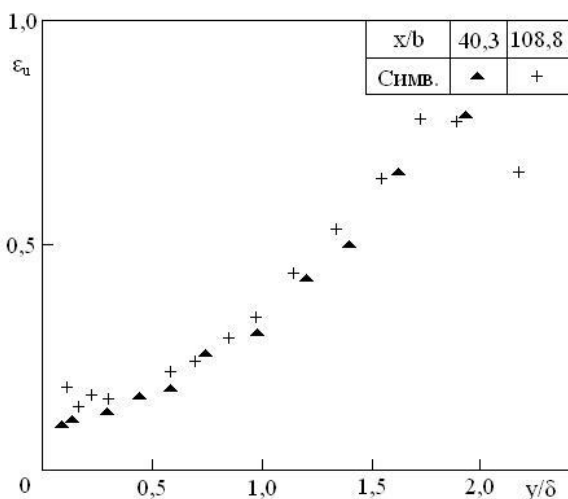


Рисунок 2. Уровень турбулентности по сечению пристенной струи вдоль вогнутой поверхности

В струе на вогнутой поверхности центробежные силы способствуют подавлению турбулентности в струйном пограничном слое и интенсификация турбулентности в пристенном пограничном слое. Однако, из-за влияния твердой

стенки в этом случае уровень турбулентности оказывается почти таким же как в струе вдоль пластины. Очевидно, на развитие турбулентности в струе на криволинейной поверхности безусловное влияние оказывает также появление продольных вихревых течений, которые могут также влиять на распределение осредненных скоростей.

### Список литературы

1. *Абрамович Г.Н., Гиршович Г.А., Крашенинников С.Ю.* и другие. Теория турбулентных струй. Изд. 2-ое перераб. и доп. / Под. ред. Г.Н. Абрамовича. – М., 1984. -720 с.
2. *Bruun H.H.* A time-domain analysis of large-scale flow structure in a circular jet. // J. Fluid Mech, 1977. – V. 83. – pt. 4.

### Сведения об авторах

1. Исатаев Совет Исатаевич, профессор Казахского национального университета им. аль-Фараби, кафедра теплофизики и технической физики НИИЭТФ.

Почтовый домашний адрес: почтовый индекс 050023 Республика Казахстан, г. Алматы, мкр-н Казахфильм, дом 8, кв. 68. Дом. тел. (727) 299-20-88.

2. Сейдулла Жанибек, магистрант 2-го года обучения физико-технического факультета Казахского национального университета им. аль-Фараби, кафедра теплофизики и технической физики НИИЭТФ.

Почтовый домашний адрес: [seydulla92@mail.ru](mailto:seydulla92@mail.ru) Республика Казахстан, г. Алматы, мкр-н 10, дом 17/1, кв. 16. сот. тел. +7(702) 152-71-87

Принято в печать 20.10. 14

**С.И. Исатаев, Ж.К. Сейдулла**

*НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ И РАЗВИТИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В СТРУЕ НА КРИВОЛИНЕЙНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

**Аннотация.** Цель данной работы заключается в экспериментальном исследовании развития вихревой структуры струе, распространяющейся по выпуклой и вогнутой поверхности при наличии акустического воздействия.

Установлено, что при воздействии с частотой, соответствующей акустическому резонансному воздействию в струе вдоль криволинейной поверхности интенсивность крупномасштабных вихрей растет, а при высокочастотном воздействии крупномасштабные вихри ослабляются.

Однако вблизи стенки уровень турбулентности выше в струе на выпуклой поверхности, чем в струе на вогнутой поверхности. Это особенно заметно по изменению уровня турбулентности по длине струи вдоль линии максимума скорости. Видно, что интенсивность турбулентности в струе на выпуклой поверхности продолжает расти с удалением от сопла и становится значительно больше, чем в струе вдоль плоской поверхности.

**Ключевые слова:** струя вдоль криволинейной поверхности, крупномасштабные вихри, турбулентность, распределение скорости, дальнобойность.

**S.I.Isatayev, Zh.K.Seydulla**

*Al-Farabi KazNU, Almaty*

## **RESEARCH OF VORTEX STRUCTURE AND DEVELOPMENT OF TURBULENCE IN THE STREAM ON THE CURVILINEAR SURFACE**

**Abstract.** The purpose of this work consists in a pilot study of development of vortex structure to the stream extending on a convex and concave surface in the presence of acoustic influence.

It is established that at influence with a frequency corresponding to acoustic resonant influence along a curvilinear surface intensity of large-scale whirlwinds grows in a stream, and at high-frequency influence large-scale whirlwinds are weakened.

However near a wall the level of turbulence is higher in a stream on a convex surface, than in a stream on a concave surface. It is especially noticeable by change of level of turbulence on stream length along the line of a maximum of speed. It is visible that intensity of turbulence on a convex surface continues to grow in a stream with removal from a nozzle and becomes much more, than in a stream along a flat surface.

**Keywords:** stream along a curvilinear surface, large-scale whirlwinds, turbulence, distribution of speed, range.

**С.И. Исатаев, Ж.К.Сейдулла**

*ЭЖТФҒЗИ, аль-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы*

## **ҚИСЫҚ СЫЗЫҚТЫ БЕТТЕ ҚҰЙЫНДЫҚ ҚҰРЫЛЫМДАР МЕН ТУРБУЛЕНТТІЛІКТІҢ ДАМУЫН ЗЕРТТЕУ**

**Аннотация.** Ұсынылған жұмыстың мақсаты акустикалық әсерді есепке ала отырып, ойық және дөңес беттерде таралатын ағынның құйындық құрылымдарының дамуын тәжірибелік зерттеу болып табылады. Акустикалық резонанстық әсерге сәйкес келетін жиіліктерде әсер еткен кезде, ағында қисықсыздықты беттерге бойлық бағыттарда үлкен масштабты құйындар

қарқындылығы әседі, ал төмен жиілікті әсер етуде үлкен масштабты құйындар әлсірейді. Алайда қабырға маңында, дәнеңес беттердегі ағындар турбуленттігі деңгейі ойық беттердегі турбуленттік деңгейінен жоғары болып келеді. Бұл, әсіресе, жылдамдық максимумы сызықтарының бойлық бағытында турбуленттік деңгейі өзгерісі бойынша анық байқалады. Көрініп отырғандай, дәнеңес беттегі ағынның турбуленттік қарқындылығы соплодан алыстаған сайын артып отырады, және де жазық бет бойымен таралған жағдай-дан қарағанда әлдеқайда үлкен болып келеді. **Кілтi сәздер:** қисықсызықты бет бойлығындағы ағындар, үлкен масштабты құйындар, жылдамдықтар таралуы, диапазон.