

Исатаев М.С., Есеналиева А.,  
Омаралина А., Молдабекова Д.,  
Сейдулла Ж.К.

**О характерной частоте пульсаций  
скорости в конце начального  
участка струи**

Установлено, что в спектрах пульсаций скорости начального участка осесимметричных струй с малой толщиной пограничного слоя в выходном сечении насадка, имеются две наиболее характерные частоты. Одна частота регистрируется на границе струи в оторвавшемся пограничном слое вблизи кромки сопла, другая – на оси струи в конце начального участка. Первая обусловлена возникновением периодических возмущений в результате потери устойчивости свободного ламинарного пограничного слоя и зависит от его толщины. Вторая характерная частота обусловлена формированием больших вихрей с масштабом порядка диаметра струи в начальном участке и не зависит от начальной толщины пограничного слоя.

Число Струхаля, рассчитанное по первой характерной частоте, изменяется пропорционально корню квадратному из числа Рейнольдса. Величина же числа Струхаля, рассчитанного по второй характерной частоте, сохраняет приблизительно постоянное значение  $S=0,4\div 0,6$ .

**Ключевые слова:** турбулентность, число Струхаля, пульсация скорости, спектры, струя.

Isatayev M.S., Esenalieva A.,  
Omaralina A., Moldabekova D.,  
Sejdulla Zh.K.

**The characteristic pulse frequency  
velocity at the end of the initial  
section jet**

It is established that in the spectra of velocity pulsations in the initial phase axisymmetric jets with small thickness of the boundary layer in the outlet section of the nozzle, there are two of the most characteristic frequency. One frequency is recorded on the boundary of the detached jet in the boundary layer near the edge of the nozzle and the other at the jet axis at the end of the initial phase. The first is the occurrence of periodic perturbations as a result of loss of stability of free laminar boundary layer and depends on its thickness. The second characteristic frequency due to the formation of large vortices with scale of order of the diameter of the jet in the initial section and does not depend on the initial thickness of the boundary layer.

The number of Strouhal calculated by the first characteristic frequency is proportional to the square root of the Reynolds number. The same value of the Strouhal number calculated by the second characteristic frequency keeps approximately constant value of  $S=0,4\div 0,6$ .

**Key words:** turbulence, the Strouhal number, pulse speed, range, the jet.

Исатаев М.С., Есеналиева А.,  
Омаралина А., Молдабекова Д.,  
Сейдулла Ж.К.

**Ағыстың бастапқы бөлімшесінің  
соңында пульсацияның сипатты  
жиілігі туралы**

Саптаманың шығу қимасында шекаралық қабаттың қалыңдығы аз болған кезде осесимметриялық ағыстың бастапқы учаскесіндегі жылдамдық пульсі спектрлерінде екі неғұрлым сипатты жиіліктердің бар екені анықталды. Бір жиілік шүмек шетінің жарындағы үзілген шекаралық қабаттың ағысының шекарасында, басқасы – бастапқы учаскенің соңындағы ағыс білігінде тіркеледі. Біріншісі еркін ламинацияланған шекаралық қабатының тұрақтылығының жоғалуы нәтижесінде мерзім сайынғы ауытқуының туындауымен байланысты және оның қалыңдығына байланысты болады. Екінші сипатты жиілік бастапқы учаскеде ағыс диаметрінің ауқымымен үлкен құйындардың қалыптасуымен байланысты және шекаралық қабаттың бастапқы қалыңдығына байланысты болмайды.

Бірінші сипатты жиілік бойынша есептеп шығарылған Струхаль саны Рейнольдс санының квадратты түбіріне барабар өзгереді. Ал екінші сипатты жиілік бойынша есептеп шығарылған Струхаль санының шамасы шамамен  $S=0,4\div 0,6$  тұрақты мәнін сақтап қалады.

**Түйін сөздер:** турбуленттілік, Струхаль саны, жылдамдық пульсациясы, спектр, ағынша.

## О ХАРАКТЕРНОЙ ЧАСТОТЕ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ В КОНЦЕ НАЧАЛЬНОГО УЧАСТКА СТРУИ

### Введение

Спектры пульсаций скорости начального участка осесимметричных струй

Анализ спектров, полученных во всем поле течения начального и переходного участков различных струй, показали, что спектры в конце начального участка имеют довольно ярко выраженный максимум. На рисунке 1 показаны спектры обезразмеренные, согласно выражению:

$$\int_0^{\infty} E(n)dn = U'^2.$$

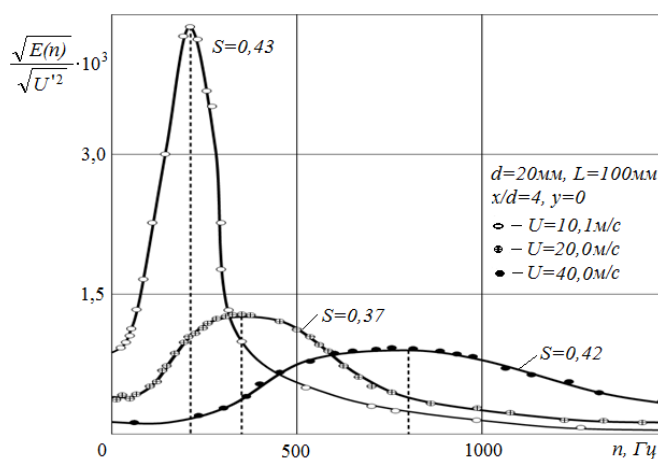


Рисунок 1 – Анализ спектров

При построении спектров в координатах

$$\frac{\sqrt{E(n)}}{\sqrt{U'^2}} = f(K),$$

(рисунок 2) эти максимумы собираются вблизи одного волнового числа. Волновое же число  $2\pi n/U$  и число Струхала  $nd/U$  отличаются только постоянными множителями  $2\pi$  и  $d$ . Это означает, что число Струхала, рассчитанное по частоте максимума, с изменением  $Re$  не меняется.

Количественно степень выраженности какой-либо частоты в спектре пульсаций скорости можно оценить величиной

$$e = \frac{1}{e_\infty} \int_{n_1}^{n_2} E(n) dn, \quad e = \int_0^\infty E(n) dn. \quad (1)$$

Здесь  $E(n)$  спектральная функция распределения кинетической энергии турбулентности по частотам: разность  $n_2 - n_1$  соответствуют узкой полосе частот, в которой наблюдается пик энергии. Величину  $e$  удобно назвать долей энергии пульсаций скорости в полосе частот  $\Delta n = n_2 - n_1$ .

Для примера на рисунке 3 показано распределение  $e$  в струе, истекающей из сопла диаметром  $d = 10$  мм.

Энергетические спектры были получены с помощью анализатора, имеющего набор фильтров. Соотношения (1) для двойного анализатора принимают вид:

$$e = \frac{E_i \Delta n_i}{\Sigma}, \quad \Sigma = \sum_{K=1}^m E_K \Delta n_K. \quad (2)$$

Здесь  $E_i$  – значение спектральной функции, вычисленное по показанию фильтра с максимальной величиной спектральной плотности напряжения;  $E_K$  – значение спектральной функции соответствующее  $K$ -му фильтру;  $m$  – число фильтров анализатора;  $\Delta n_K$  – полоса пропускания  $K$ -го фильтра.

В представленном на рисунке 3 примере, пик энергетического спектра пульсаций скорости, обусловленный образованием дискретных вихрей, строго совпадал с резонансной частотой фильтра на 1140 Гц. Полоса пропускания этого фильтра 114 Гц.

Распределение величины  $e$  (кривая 3) имеет максимум при  $x/d = 3,5 \div 4$ , т.е. примерно соответствует месту расположения конца ядра струи. Это место легко определяется по форме спектра, имеющего ярко выраженный максимум или по осциллограмме пульсаций скорости,

принимающей вид близкий к синусоидальному сигналу, амплитудно-модулированному низкой частотой.

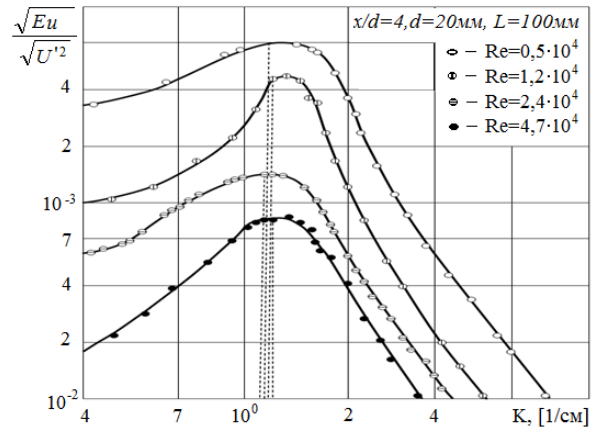


Рисунок 2 – Построение спектров в координатах

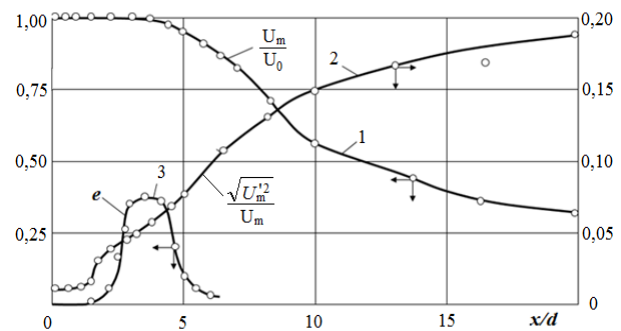


Рисунок 3 – Распределения осевой, пульсационной скоростей и  $e$  в струе, истекающей из сопла диаметром  $d=10$  мм при  $Re=1,7 \cdot 10^4$

Экспериментальные значения  $S_{-y=0}$  укладываются в интервале

$$S = 0,4 \div 0,6. \quad (3)$$

Эти результаты говорят о том, что в конце начального участка свободных струй существует характерная частота пульсаций скорости, связанная с преобладанием вихрей, масштаб которых обусловлен геометрией потоков (диаметром струи в начальном участке).

Сказанное будет более понятным, если число Струхала представить в таком виде:

$$S = \frac{nd}{U} \cdot \frac{C_r}{C_\tau} = \frac{C_r}{U} \cdot \frac{d}{\lambda}, \quad (4)$$

где  $C_\tau$  – скорость движения вихрей.

$\lambda = C_\tau/n$  – длина волны пульсаций скорости, обусловленная прохождением вихрей. Скорость движения центров вихрей в пределах ядра струи по данным, полученным нами методом скоростной съемки и синхронного освещения, составляет  $\sim 0,5U_0$ , что совпадает с данными работами [1]. Тогда выражение (4) можно написать

$$S = 0,05 \cdot \frac{d}{\lambda}. \quad (5)$$

Из сравнения (4) и (5) вытекает, что  $d/\lambda = 0,8 \div 1,2$ . Длина волны пульсаций скорости  $\lambda$  есть ни что иное, как расстояние между вихрями вдоль направления распространения струи.

Таким образом, выражение (4) и (5) свидетельствует о том, что к концу начального участка струй независимо от числа  $Re$  наибольшую энергию имеют вихри, продольный масштаб которых приблизительно равен поперечному размеру струи в начальном участке. То же заключение можно сделать по данным изучения визуальной картины течения. При  $x/d = 2 \div 4$  расстояние между вихрями устанавливается приблизительно равным диаметру струи в начальном участке. На этом снимке можно вполне различить два наиболее характерных масштаба вихрей, о которых шла речь выше. При  $x/d = 1$  на границе струи видны малые вихри, масштаб которых задается толщиной пограничного слоя в выходном сечении сопла, а при  $x/d = 2 \div 4$  большие вихри, масштаб которых приблизительно равен диаметру струи в начальном участке.

Если масштаб вихрей, возникающих на границе струи в ламинарном пограничном слое,

значительно меньше диаметра струи в начальном участке ( $\lambda < d$ ), то в пределах ядра струи происходит несколько полярных слияний вихрей. При каждом слиянии длине волны  $\lambda$  удовлетворяется, т.е. увеличивается вдвое расстояние между результирующими вихрями, следовательно, частоте пульсаций скорости при прохождении этих вихрей тоже уменьшается в два раза. В результате такого процесса к концу ядра струи расстояние между получившимися вихрями становится равным приблизительно диаметру струи в данном сечении.

Отметим, однако, что при каждом сечении наблюдается значительная «внутренняя» турбулизация результирующих вихрей мелко масштабными вихрями.

### Выводы

Таким образом, вначале происходит процесс накачки энергии крупномасштабных вихрей в результате последовательного полярного слияния мелкомасштабных вихрей. Процесс слияния сопровождается ростом мелкомасштабной турбулентности внутри образующихся крупных вихрей. После достижения некоторого максимального размера (приблизительно равного диаметру струи) теряется устойчивость движения крупных вихрей и происходит их распад с генерированием пульсаций скорости с широким спектром частот. Именно по этой причине распределение  $e$  (рисунок 3) имеет вид с ярко выраженным максимумом. До  $x/d = 2 \div 4$  происходит пространственное усиление пульсаций скорости, связанных с формированием больших вихрей, а при  $x/d > 4$  – распад этих вихрей и генерирование обычной турбулентности с вихрями всевозможных масштабов.

### Литература

1 Сапарова А., Есим., Есеналиева А. Воздействие на струю периодических пульсаций с малой начальной толщиной пограничного слоя // Международная конференция студентов и молодых ученых «Фараби элеме». – Алматы, 2015. – С.150.

### References

1 Saparova A., Esim N., Esenalieva A. Vozdejstvie na strui periodicheskikh pul'sacij s maloj nachal'noj tolshhinoj pograničnogo sloja // Mezhdunarodnaja konferencija studentov i molodyh uchenyh «Farabi əlemi». – Almaty, 2015. – S 150. (in Russ).