

Д.Г. Молдабекова, А.Е. Есенәлиева, А.С. Омаралина
М.С. Исатаев, А.З. Нурмуханова, Ж.К. Сейдулла
(КазНУ имени аль-Фараби
Алматы, Республика Казахстан)

О ХАРАКТЕРНОЙ ЧАСТОТЕ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ НА КОНЦЕ НАЧАЛЬНОГО УЧАСТКА СТРУИ

Аннотация. Установлено, что в спектрах пульсаций скорости начального участка оси симметричных струй с малой толщиной пограничного слоя в выходном сечении насадки, 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.

Ключевые слова: спектры пульсации скорости, начальный участок струи, число Струхала, число Рейнольдса.

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:

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

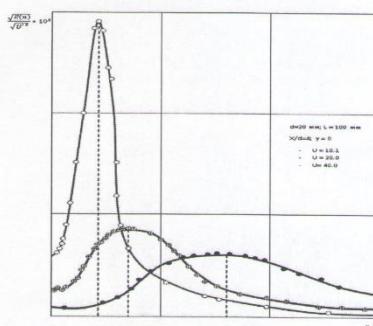


Рис. 1. Анализ спектров

При построение спектров в координатах

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

(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 2π 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

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

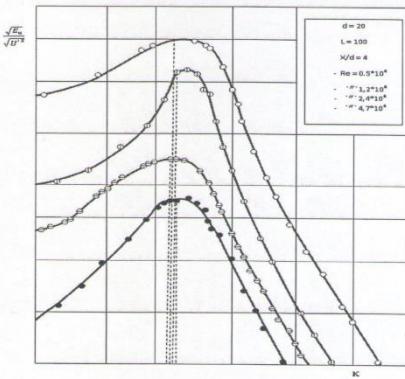


Рис. 2. Построение спектров в координатах

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 называть 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; Δn_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 $x/d=3,5-4$, 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.

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_τ - скорость движения вихрей.

$\lambda = C_r/n$ - 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 λ 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 струи 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 две 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 длина волны λ 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.

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.

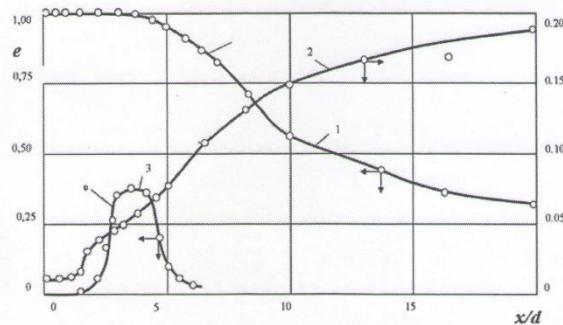


Рис. 3. Распределение e в струе, истекающей из сопла диаметром $d = 10$ мм

ЛИТЕРАТУРА

[1] Сапарова А., Есім Н., Есенәлиева А. Воздействие на струи периодических пульсаций с малой начальной толщиной пограничного слоя // Международная конференция студентов и молодых ученых «Фарабиәлемі». - Алматы, 2015. - 150 с.

Молдабекова Д.Г., Есенәлиева А.Е., Омаралина А.С., Исадаев М.С., Нурмуханова А.З., Сейдулла Ж.К.

Ағыншының бастапқы болігінің шетіндегі жылдамдық пульсация жиілігінің сипаты

Түйіндеме. Спектр пульсациясының жылдамдығын бастауыш участкесінің осесимметриялық ағыншың кіші калындығы шекаралық қабатының шығу кимасында салтамалары бар екі ең тән жайліктер. Бір жайлігі ағыншың шекаралық қабатындағы жиегіне жақын шумектер бағытын шекарасында тіркеледі, екінші – осі ағыншың аяғында бастауыш участкесі. Бірінші негізделген туындаудың мерзімді калыптан нәтижесінде орнықтылықтың жоғалуы еркін ламинарлық ағын шекаралық қабаттың және оның калындығы. Екінші өзіне тән жайлігі негізделген калыптастыруға үлкен күйіндар аукымымен тәртібін диаметрін ағыншың бастапқы участкесінде және тәулелді емес бастапқы калындығының шекаралық қабаты.

Түйін сөздер: спектр пульстің жылдамдығы, ағыншың бастапқы участкесі, Струхаль саны, Рейнольдс саны.

Moldabekova D.G., Yessenalieva A.E., Omaralina A.S., Isataev M.S., Nurmukhanova A.Z., Seydulla Zh.K.

About the characteristic frequency of pulsations of speed on the end of the initial section of the stream

Summary. It is set that in ranges of pulsations of speed of an initial section of axisymmetric streams with small boundary layer thickness in the output section of a nozzle, there are two most characteristic frequencies. One frequency registers on stream boundary in the come-off interface near a nozzle edge, another – on a stream axis at the end of an initial section. The first is caused by origin of periodic perturbations as a result of loss of stability of the free laminar interface and depends on its thickness. The second characteristic frequency is caused by formation of big curls with a scale of an order of diameter of a stream in an initial section and doesn't depend on initial boundary layer thickness.

Key words: speed pulsation ranges, initial section of a stream, Strukhal's number, Reynolds number.