

**Толеуов Г., Исатаев М.С. \*, Мусатаев А., Акансерина Т., Бабашева Д.,  
Рустемова С., Нурмагамбетов М., Тамабек Д.**

НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби,  
г. Алматы, Казахстан, \*e-mail: Muhtar.Isataev@kaznu.kz

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР СЛОЖНОГО ТЕЧЕНИЯ В СТРУЯХ И «СЛЕДАХ»**

Характеристические частоты формирования вертикальных возмущений в естественном развитии исследуются экспериментальным путем. Их динамика исследована при помощи методики усреднения фаз и связана с визуализированными схемами потоков частот возмущающей силы, приводя к значительным изменениям среднеарифметической характеристики и характеристики пульсации. Исследование структуры вихря «следа» за цилиндром ограниченной длины показывает, что конечные явления ведут к дестабилизации вихрей Кармана и удлинению зоны циркуляции в следе. Более подробную информацию по динамике развития когерентных структур можно получить при использовании методики осреднения фаз при преобразовании сигналов скорости потока и температуры. Для более углубленного изучения соотношения между процессами смешивания и динамики развития когерентных структур следует использовать данную методику и метод синхронизационной визуализации вспышки импульса в исследуемой зоне потока. В данной научной работе была сделана попытка объяснить физические свойства вышеописанных явлений посредством углубленного исследования когерентных структур, которые образуются в первоначальной и переходной части трехмерных струйи следов позади цилиндров конечной длины.

**Ключевые слова:** свободная струя, турбулентность, сопло, распределение температуры, градуировка

Toleuov G., Isatayev M. \*, Musataeva A., Akanserina T., Babasheva D.,  
Rustemova S., Nurmagambetov M., Tamabek D.

IETP, Al Farabi Kazakh National University,  
Almaty, Kazakhstan, \*e-mail: Muhtar.Isataev@kaznu.kz

### **Investigation of the dynamics of the development of coherent structures of complex flow in jets and trails**

The characteristic frequencies of the formation of vertical disturbances in natural development are investigated experimentally. Their dynamics has been studied using the phase averaging technique and is associated with visualized schemes of frequency fluxes of the disturbing force, which lead to significant changes in the average arithmetic and pulsation characteristics. A study of the structure of the vortex of a trails behind a cylinder of limited length shows that finite phenomena lead to destabilization of the Karman vortices and an extension of the circulation zone in the trail. More detailed information on the dynamics of the development of coherent structures can be obtained by using the phase averaging technique for converting flow velocity and temperature signals. For a more in-depth study of the relationship between the mixing processes and the dynamics of the development of coherent structures, this method and the method of synchronization visualization of the flash pulse in the investigated flow zone should be used. In this scientific work, an attempt has been made to explain the physical properties of the phenomena described above by in-depth study of coherent structures that are formed in the initial and transitional part of three-dimensional jets and trails behind the cylinders of finite length.

**Key words:** free jet, turbulence, nozzle, temperature distribution, grading.

Толлеуов Ғ., Исатаев М.С.\* , Мұсатаев А., Акансерина Т., Бабашева Д.,  
 Рүстемова С., Нұрмағамбетов М., Тамабек Д.  
 ЭТФҒЗИ, әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті,  
 Алматы қ, Қазақстан \*e-mail: Muhtar.Isataev@kaznu.kz

### Ағыншалардағы және «іздердегі» күрделі ағыстардың когерентті құрылымдардың даму динамикасын зерттеу

Кәдімгі дамудағы вертикалді қозулардың туындауының сипаттық жиіліктері эксперименттік жолмен зерттелді. Олардың динамикасы фазаларды орташалау әдісі көмегімен зерттелді және қоздырғыш күштердің жиіліктер ағынының визуализацияланған сызбаларымен байланысты, бұлар орташаарифметикалық сипаттамалардың және пульсациялық сипаттамалардың қомақты өзгерістеріне алып келеді. Шектелген ұзындықты цилиндрдің артындағы «іздің» құйындық құрылымын зерттеу көрсеткендей, соңғылық құбылыстар Карман құйындарының дестабилизациясына және «іздегі» циркуляция зонасының ұзаруына әкеледі. Когерентті құрылымдардың даму динамикасына қатысты нақтырақ ақпаратқа ағын жылдамдығы мен температураның сигналдарын түрлендіру кезіндегі фазаларды орташалау әдістемесін қолдану арқылы қол жеткізуге болады. Араласу және когерентті құрылымдардың даму динамикасы процестерін анағұрлым тереңірек зерттеу үшін осы әдістемемен қоса ағынның зерттелініп отырған аймағындағы тұтанудың визуализациясын синхрондау әдісін қолдану керек. Берілген ғылыми жұмыста үшөлшемді ағыншалардың алғашқы және өтпелі бөлімшелері мен шекті ұзындықты цилиндрлердің артындағы іздерде қалыптасатын когерентті құрылымдарды терең зерттеу арқылы жоғарыда аталған құбылыстардың физикалық қасиеттері түсіндірілді.

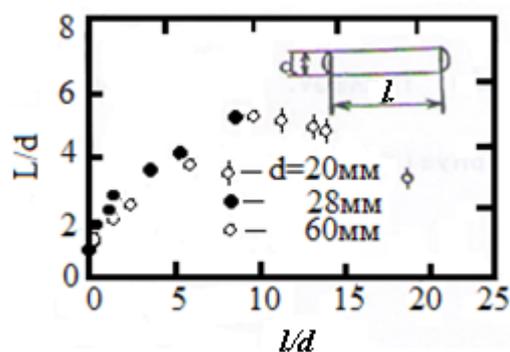
**Түйін сөздер:** еркін ағынша, турбуленттік, сопло, температураның таралуы, градуирлеу

## Введение

В настоящее время необходимо проведение более углубленных исследований параметров когерентных структур (КС) различных типов потоков из-за изменений в подходе к природе образования турбулентных потоков [1-5]. Также были обнаружены некоторые явления при проведении процессов смешивания и передачи тепла в трехмерных струях (ТМС) и следах, образующихся при установке цилиндров конечной длины по потоку, чему нет объяснений без исследований вихревой структуры этих потоков. Одним из доказательств существования таких явлений является наличие максимума в зависимости длины зоны возвратно-поступательного потока от параметра удлинения  $\lambda=l/d$ . Эта зависимость, получающаяся в результате преобразования, изображенном на рисунке 1. Похожий процесс увеличения длины первоначальной и переходной зоны при определенной пропорции между длинами боковых сторон выходного поперечного сечения отмечен на ТМС. Особенности развития КС в потоке в первоначальной зоне турбулентности ТМС были исследованы в пункте [6].

После проведения спектрального и корреляционного анализов были получены обобщенные данные по масштабам и интенсивности характеристических частот следования КС. Было отмечено, что деградации КС, распространяющаяся

по сторонам от больших и маленьких сторон сопла, присуще разные величины интенсивности в обоих случаях. Также была отмечена разница в скоростях истечения потоков.



**Рисунок 1** – Длина зоны возвратно-поступательного потока в следе за цилиндром, изображенная в качестве параметра  $\lambda=l/d$

Более подробную информацию по динамике развития КС можно получить при использовании методики осреднения фаз при преобразовании сигналов скорости потока и температуры. Для более углубленного изучения соотношения между процессами смешивания и динамики развития КС следует использовать данную методику и метод синхронизационной визуализации

вспышки импульса в исследуемой зоне потока [7, 8].

В данной научной работе была сделана попытка объяснить физические свойства вышеописанных явлений посредством углубленного исследования КС, которые образуются в первоначальной и переходной части ТМС и следов позади цилиндров конечной длины.

**Аппаратура для экспериментальных исследований**

При проведении экспериментальных опытов использовались сопла с четырехугольным поперечным сечением выходного отверстия с пропорциями сторон:  $\lambda = 1,65; 2,77; 5,07; 7,61; 11,0; 16,0; 25,2$  и круглое сопло (диаметром = 22,5 мм). Величины выходного поперечного сечения всех сопел были приблизительно одинаковыми.

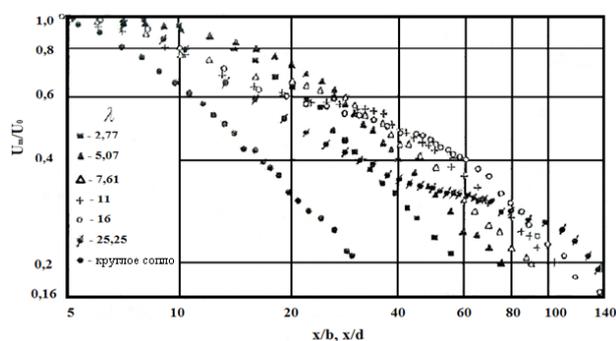
С использованием данной аппаратуры удалось отследить и сфотографировать теневое изображение потока при помощи импульсной вспышки света, синхронизированной по частотам следования вихрей, которые образуются в первоначальной и переходной зонах струй. Система термоэлектрического анемометра, была использована для определения среднеарифметической и пульсационной характеристик скорости потока. При этом использовался полный комплект системы, включая электронный микроанометр и устройство осреднения фазы, что позволило замерить осредненную периодическую и хаотическую составляющие скоростной пульсации.

Также было проведено визуальное исследование следа позади цилиндров различных по длине на участке сгущения в рабочей части прибора с теневым указателем и при проведении экспериментов по определению длины. Описание экспериментальных систем и способов измерений, приводится в работах [7, 8].

**Полученные результаты и их анализ**

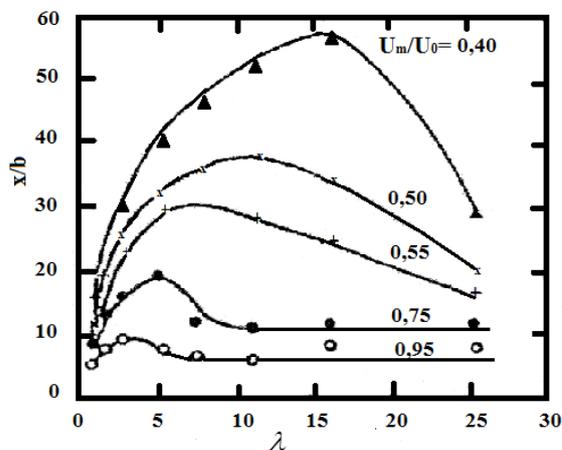
Результаты измерения осевых скоростей истечения в струях, выходящих из сопел с различными размерами боковых сторон в выходном поперечном сечении изображены на рисунке 2.

Анализ данных указывает на зону постепенно снижающейся скорости потока. Эта зона была обнаружена перед основной зоной, где скорость потока падает примерно до величины  $\sim x^{-1}$ . Чем меньше становится величина  $\lambda$ , тем ближе эта зона оказывается к точке истечения потока.



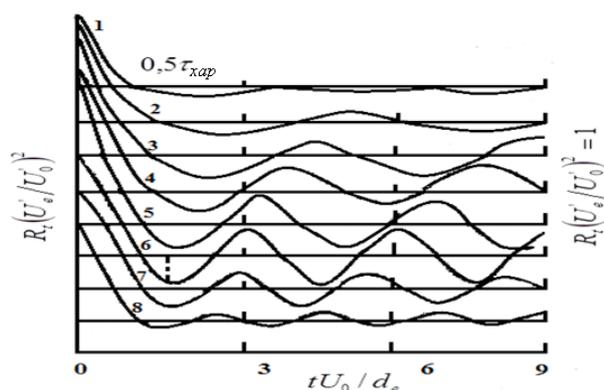
**Рисунок 2** – Характер изменения осевой скорости истечения при различных величинах  $\lambda = a/b$ ,  $U_0 = 20$  м/с, где  $U_0$  – осевая скорость потока

Эту зависимость можно более точно отследить при выведении результатов в форме:  $U_{mi} = f(\lambda)$  (рисунок 3). Здесь величина  $U_{mi}$  представляет собой выбранный уровень скорости потока. Поскольку вышеописанная зона уже определена, ее можно назвать зоной окончания деформации ТМС, т.е. эта зона находится перед основной зоной, в которой нет никакой деформации струи, данная зона распространяется далее по свободной и аксиально-симметричной схеме.



**Рисунок 3** – Длина участка с равными уровнями скорости потока изображена в качестве функции параметра  $\lambda = a/b$ , при  $U_0 = 20$  м/с

Определение величин автокорреляционных функций продольных осевых пульсаций скорости потока на исследуемом участке, где процесс деформации завершен, доказало существование отрицательного максимума. Результаты определения величины  $R_1$  в струе при значении  $\lambda = 2,27$  показаны на рисунке 4.



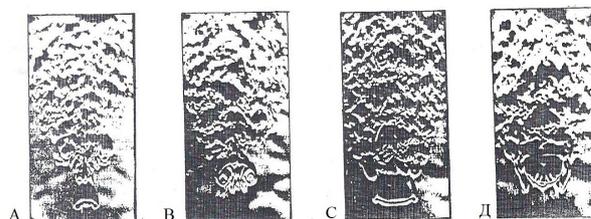
$U_0 = 6.03$  м/с;  $\lambda = 2.77$ ;  $x/b = 10$ ; 1 – в невозмущенном состоянии; 2 – начало возмущения при частоте 50 Гц; 3 – 63; 4 – 70; 5 – 80; 6 – 89; 7 – 100; 8 – 120.  
Индекс е – эффективный

**Рисунок 4** – Величины автокорреляционных функций колебаний скорости потока по оси струи при разных значениях частот возмущения

Время, соответствующее значению отрицательного максимума  $R$  можно назвать полупериодом характеристической частоты  $n_{хар} = 1/\tau_{хар}$  данного периодически повторяющегося процесса. В вышеописанном случае, это время равняется величине  $5,6 \times 10^{-3}$ , а это значение соответствует частоте 89 Гц. Очевидно, что частота возмущения 89 Гц, соответствующая периоду  $\tau_{хар}$  является оптимальной, потому, что рост и уменьшение частоты по отношению к данной величине с равными степенями возмущения ведет к уменьшению величины  $R_t(U_{me}/U_m)$  (смотрите рисунок 4). Это объясняет наличие изменчивости скорости потока под воздействием возмущения и позволяет оценить результат данного возмущения. Следует учитывать, что изменение степени частоты возмущения и соответствующая ей величина  $d_e / U_0 \times \tau_{хар}$  в диапазоне 0,25 – 0,36 приводит к изменению результата воздействия всего лишь на 10%. Здесь мы имеем  $d_e = 2(ab/\pi)^{0.5}$ , ( $a$  – длинная сторона сопла,  $b$  – короткая сторона сопла,  $d_e$  – эффективный диаметр). Поэтому рекомендуется брать данный интервал измерений в качестве участка с наиболее выраженным возмущением.

На рисунке 5 изображены теневые фотографии потока, сделанные с малой и большой сторон сопла в различных стадиях развития, когда сигнал частоты возмущения оказывался в видимом спектре. Форма вихревого возмущения, образующегося около наконечника сопла, четко просматривается на изображениях. Также легко заметить первоначальную фазу вихрево-

го возмущения с большей стороны сопла. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не образуется вихрь в формате 3Д, обе стороны которого находятся на разных поперечных сечениях струи.



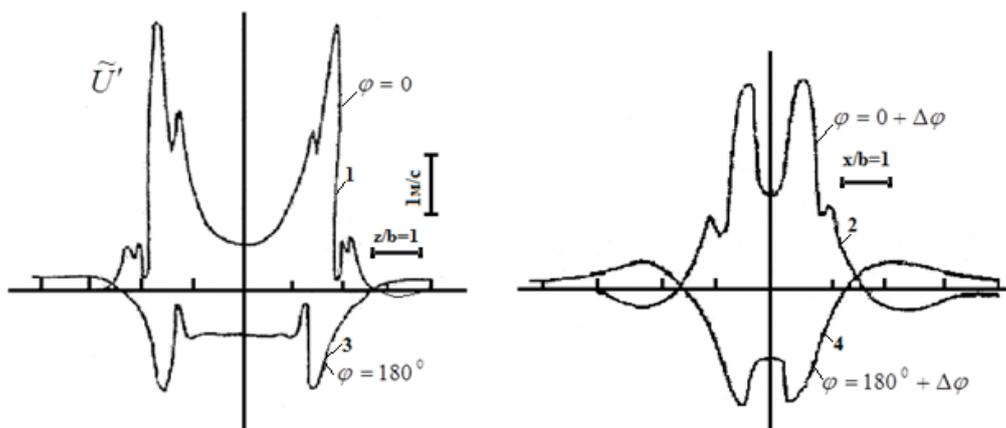
$U_0 = 4,3$  м/с;  $n = 60$  Гц; А, В – вид с малой стороны сопла; С, D – вид с большой стороны сопла

**Рисунок 5** – Теневые изображения потока в 3-х мерном формате струи при частоте возмущения, соответствующей  $S = 0,27$

Среднестатистические мгновенные профили периодических и случайных составляющих величины  $U$  пульсаций скорости потока, которые удалось зарегистрировать при помощи методики осреднения фаз, доказывают существование различных уровней этих величин, соответствующих большей и меньшей сторонам сопла. Эта разница для величины  $U'$  показана на рисунке 6. Эти данные были получены на двух разных стадиях развития завихрения. Верхние линии соответствуют моменту, когда измерительный прибор проходил по центру вихрей, а нижние линии соответствуют измерениям между завихрениями.

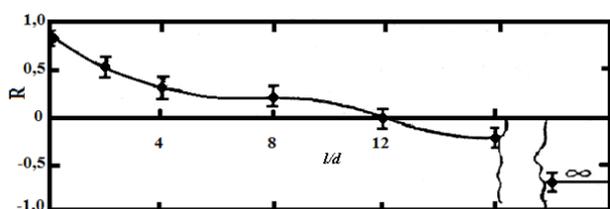
Величины коэффициентов корреляции определялись в то время, когда исследовалась структура следа за цилиндром. Эти измерения проводились при помощи двух устройств, помещенных с двух концов цилиндра около участка, где поток отрывается от поверхности. Полученные данные изображены на рисунке 7. Положительное значение коэффициента корреляции в диапазоне  $0 < l/d < 12$  доказывает симметричное разделение завихрений по мере удаления от поверхности цилиндра. Знак коэффициента корреляции изменяется при соотношении  $l/d > 12$ .

Абсолютное значение коэффициента увеличивается по мере достижения соотношения  $l/d = 07$ , в крайнем случае, когда по обоим концам устанавливаются две ограничительные стенки при наличии больших по величине соотношений  $l/d$ .



$U_0 = 4,27$  м/с;  $n = 60$  Гц;  $S = 0,27$ ; 1, 2 – размеры поперечного сечения в центре завихрения; 3, 4 – между завихрениями

**Рисунок 6** – Диаграмма распределения волновой составляющей пульсации скорости при возмущении



**Рисунок 7** – Коэффициент корреляции пульсации скорости выраженный в функции  $l/d$

Отрицательное значение величины  $R$  указывает на наличие антисимметричного разделения завихрений (таблица завихрений Т. Кармана).

Теневая фотография потока при незанчительно нагретых цилиндрах, полученное при по-

мощи импульсной вспышки, подтверждает заключение, основанное на определении величин коэффициентов корреляции.

Поэтому, наличие максимума в зависимости  $L/d = f(l/d)$  непосредственно связано с преобразованием разделения завихрений и процессами формирования завихрений, начиная с симметричного завихрения, соответствующего потоку вокруг сферы и закачивая двухмерным завихрением, соответствующим потоку вокруг цилиндра бесконечной длины.

*Работа выполнена в рамках проекта 3096/ГФ4 «Исследование проблем теплопереноса и теплообмена в сложных струйных течениях».*

### Литература

- 1 Власов Е.В., Гиневский А.С. Когерентные структуры в турбулентных струях и следах // Итоги науки и техники. Серия Механика жидкости и газа. – 1983. –Т.20. – С. 3-84.
- 2 Гольдштик М.А. Динамические, равновесные и потоковые структуры в турбулентности // Структурная турбулентность. – Новосибирск, 1982. – С. 5-12.
- 3 Hussain A.K.M.F. Coherent structures and turbulence // J. Fluid Mech. – 1986. – No. 173. – P. 303-356.
- 4 Исатаев С.И., Тарасов С.Б., Толеуов Г., Исатаев М.С., Болысбекова Ш.А., Байгаликызы Б. Динамика вихревых возмущений на начальном и переходном участках трехмерных струй // Известия НАН РК. Серия физико-математическая. -№3 (301). – 2015. – С. 125-131.
- 5 Lhendup Namgyal and Joseph W. Hall. Coherent streamwise vortex structures in the near-field of the three-dimensional wall jet // J. Fluid Eng. – 2013. – Vol. 135, No 6. –P. 120-126.
- 6 Уханова Л.Н., Войтович Л.Н. Некоторые особенности развития когерентных структур на начальном участке трехмерных турбулентных струй // Инженерно-физический журнал. – 1984. – Т. 47, № 4. – С. 537-543.
- 7 Тарасов С.Б., Волошин Ю.Е. Экспериментальное исследование температурного поля вихрей в начальном участке осесимметричных струй // Исследование процессов переноса. – Алма-Ата, 1985. – С. 67-70.

8 Мирзаян А.С., Степанов В.С. Установка и аппаратура для исследования плоских струй при наличии периодических воздействий // Физическая гидродинамика и диффузия в газах. – Алма-Ата, 1984. – С. 50-53.

#### References

- 1 Ye.V. Vlasov and A.S. Ginevskiy, *Itogi nauki i tekhniki. Seriya Mekhanika zhidkosti i gaza*, 20, 3-84, (1983). (in russ.)
- 2 M.A. Gol'dshtik, «*Strukturnaya turbulentnost*», (Novosibirsk, 1982). (in russ.)
- 3 A.K.M.F. Hussain, *J. Fluid Mech.*, 173, 303-356, (1986).
- 4 S.I. Isatayev, S.B. Tarasov, G. Toleuov, M.S. Isatayev, Sh.A. Bolysbekova, B. Baygalikyzy, *Izvestiya NAN RK. Seriya fiziko-matematicheskaya*, 3 (301), 125-131, (2015). (in russ.)
- 5 Lhendup Namgyal and Joseph W. Hall., *J. Fluid Eng.*, 135(6), 120-126, (2013).
- 6 L.N. Ukhanova, L.N. Voytovich, *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 47(4), 537-543, (1984). (in russ.)
- 7 S.B. Tarasov and Yu.Ye. Voloshin, *Issledovaniye protsessov perenosa*, 67-70, (1985). (in russ.)
- 8 A.S. Mirzayan, V.S. Stepanov, «*Fizicheskaya gidrodinamika i diffuziya v gazakh*», (Alma-Ata, 1984, 50-53). (in russ.)