

Дається аналіз розподілу осевих і трансверсальних складових усередненої швидкості та інтенсивності пульсацій швидкості у проточній ділянці вихрової камери при керувальних діях на енергоємні вихрові утворення в тупиковій зоні методом термоанемометрії. Виявлено вплив співвідношення витрат робочої рідини крізь керуюче сопло та на виході з камери на величину ступеня нерівномірності інтенсивності пульсацій швидкості у вихідному перерізі

Ключові слова: вихрова камера, структура течії, енергоємні вихрові утворення, керувальна струмина, термоанемометрія

Дается анализ распределения осевых и трансверсальных составляющих осреднённой скорости и интенсивности пульсаций скорости в проточном участке вихровой камеры при управляющих воздействиях на энергонесущие вихревые образования в тупиковой зоне методом термоанемометрии. Установлено влияние соотношения расходов рабочей среды через управляющее сопло и на выходе из камеры на величину степени неравномерности интенсивности пульсаций скорости в выходном сечении

Ключевые слова: вихревая камера, структура течения, энергонесущие вихревые образования, управляющая струя, термоанемометрия

СТРУКТУРА ВЫХОДНОГО ПОТОКА ВИХРЕВОЙ КАМЕРЫ ПРИ ТОРЦЕВЫХ СТРУЙНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

В. Н. Турик

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: turick46@gmail.com

Д. Е. Милюков

Аспирант*

E-mail: dm_mil@ukr.net

*Кафедра прикладной

гидроаэромеханики и механотроники

Механико-машиностроительный институт

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

1. Введение

Исследования процессов переноса массы, импульса и теплоты в таких сдвиговых течениях, как слои смещения, следы, струи, закрученные потоки, особенно в условиях ограниченных объёмов приводят к необходимости детального изучения коллективных вихревых образований детерминированной природы, обобщённо называемых когерентными вихревыми структурами (КВС) [1–7]. Стало общеизвестным, что в пристеночной области потоков вдоль криволинейных поверхностей, а также в вихревых камерах (ВК) имеют место явления куэтт-тэйлоровской и гёртлеровской неустойчивостей вязких течений, а при определённых условиях и формирование крупномасштабных вихревых образований в виде спиралеобразных вихрей Людвига. Однако механизм формирования, эволюции и взаимодействия таких КВС, как правило наложенных на турбулентный фон течений, пока не поддаётся корректному аналитическому описанию и недостаточно изучен экспериментально. Вследствие этого отсутствуют разработки рациональных методов управления структурой течения в ВК, напрямую влияющей на их выходные характеристики. Это существенно тормозит решение проблемы оптимизации рабочих процессов энергетических и технологических машин и аппаратов: камер сгорания газотурбинных установок, цилиндров поршневых двигателей, теплообменников,

ядерных и химических реакторов, котлоагрегатов и промышленных печей, высокофорсированных камер МГД-генераторов, плазмотронов, ядерных ракетных двигателей, центробежных сепараторов и гидрциклонов, вихревых устройств гидропневмоавтоматики, вихревых эжекторов, термотрансформаторов и т. д. Данная статья представляет результаты одного из этапов экспериментального изучения структуры и кинематических особенностей потока, выходящего из ВК, при применении струйного принципа управления потоком.

2. Анализ литературных данных

В работах [1, 2], содержащих наиболее полную информацию об исследованиях гидроаэродинамических характеристик закрученных потоков, показано, что структура течений в вихревых камерах (ВК) способна оказывать существенное влияние на эффективность и надёжность их эксплуатации. Однако авторы существующих работ традиционно исследовали, главным образом, лишь осреднённые гидроаэродинамические характеристики течений в ВК в зависимости от геометрических параметров их завихрителей и проточных частей без учёта процессов в тупиковой области. В работах [3, 4] была впервые обнаружена сложная картина течения в ВК с относительно удлинённой тупиковой

зоной. Согласно результатам этих работ, входящий поток разделяется на проточную («активную») и тупиковую («пассивную») части. В свою очередь, течение в тупиковой зоне камеры имеет своеобразную структуру, состоящую из ряда согласованных между собой упорядоченных вихревых образований, определяющих наряду с активной зоной и во взаимодействии с ней процессы переноса массы, количества движения и энергии в ВК. С целью поиска эффективных способов управления структурой течения в этой зоне, в работе [5] был предложен и предварительно описан метод избирательного воздействия одиночными струями на отдельные энергонесущие вихревые образования (ЭВО), в частности, на спиралевидное вихревое образование «усы» и центральный квазитвердотельный вихрь (ЦКТВ). Метод, основанный на принципе взаимной восприимчивости вихревых структур [6, 7], был применён на макромасштабном уровне течения.

Дальнейшие визуализационные и инструментальные исследования структуры течения в тупиковой зоне ВК дали возможность подробнее описать изменения качественной картины течения при струйных управляющих воздействиях на вихревое образование «усы» [8] или ЦКТВ [9], а также определить количественные изменения составляющих скорости вышеназванных вихревых образований и параметров управляющей струи. Вполне естественно, что скоростные характеристики течения в проточной зоне камеры превышают таковые в тупиковой области. Поэтому, с точки зрения минимизации энергозатрат и конструктивных сложностей, представляет интерес организация управляющих воздействий на процессы переноса в рабочих средах ВК именно в этой области. Поскольку ЭВО пассивной зоны ВК последовательно «вплетаются» в структуру течения в активной зоне камеры, то следует ожидать неизбежного влияния изменений, происходящих в вихревой структуре тупиковой зоны при управляющих воздействиях, на кинематические и энергетические характеристики потока, выходящего из камеры. Исследованию эффектов такого влияния и посвящена данная работа.

3. Постановка задачи исследования

Задача определения эффективности различных струйных управляющих воздействий на исследованные ранее ЭВО по характеристикам структуры выходного потока ВК многоступенчата. Во-первых, следует обеспечить идентичные с исследованиями [8, 9] рабочие режимы и условия взаимодействия управляющих струй с ЭВО в тупиковой зоне ВК. Во-вторых, корректная оценка эффектов «управляющее воздействие — отклик» предполагает правильный выбор не только области измерений осреднённых и пульсационных составляющих актуальной скорости выходного потока воздуха, но и координат точек измерений, охватывающих как объёмные, так и пристеночные когерентные вихревые структуры. Для осуществления такого выбора инструментальным измерениям должна предшествовать визуализация течения с применением контрастирующих средств. В-третьих, на данном этапе исследований необходимо провести измерения распределений указанных кинематических характе-

ристик выходящего потока в выбранном фиксированном поперечном сечении проточной части камеры. Эти измерения предполагается осуществить как в отсутствие струйных управляющих воздействий в тупиковой зоне камеры (для проведения сравнительных оценок), так и при их наличии в соответствии со следующими схемами: управляющая струя направлена коаксиально вихревому образованию ЦКТВ; встречное, а также спутное направления действия управляющей струи по отношению к тангенциальному движению ЭВО «усы».

4. Экспериментальная установка и методика проведения опытов

Экспериментальные исследования структуры течения проводились на аэродинамическом стенде с рабочим участком в виде ВК (рис. 1, а), конструкция которых описана в работах [3–5, 8, 9]. Внутренний диаметр цилиндрической части камеры составлял $d_0=0,102$ м, размеры тангенциально расположенного к ней проточного тракта основного впускного сопла — $0,02 \times 0,04$ м² (большая сторона — вдоль оси ВК) с радиусными скруглениями углов $R=5,5 \cdot 10^{-3}$ м, осевой угол установки сопла во всех опытах — $\alpha=0^\circ$; относительная глубина расположения торца — $L/d_0=4,4$. Для воссоздания наиболее рациональных условий реализации струйного управления структурой течения в тупиковой части камеры, аргументировано выбранных в наших предыдущих работах [5, 8, 9], проведены следующие серии экспериментов. На основании визуализации течения во всей ВК по методике, изложенной в [3, 4], на поверхности прозрачного цилиндрического корпуса камеры была нанесена разметка мест локализации управляемых вихревых образований «усы» и ЦКТВ. После чего, с помощью Т-образного экранированного насадка скорости, который использовался в работах [3–5, 8, 9], были выполнены проверочные измерения распределения осевой и трансверсальной составляющих скорости в нескольких сечениях пассивной зоны ВК для сравнения с результатами, полученными в работах [8, 9]. Качественное и количественное совпадение картин течения и построенных профилей скорости дало возможность утверждать, что условия идентичности течения в тупиковой части ВК с учетом системы струйного управления [8, 9] были достигнуты в полном объеме. Диапазоны чисел Рейнольдса во время проведения исследований составляли: для проточной части ВК $Re^{PV} = 21212 \div 31101$; на срезе управляющего торцевого сопла $Re^{TC} = 13186 \div 29268$.

На сегодня наиболее разработанным и надёжным методом изучения тонкой структуры вихревых потоков является метод термоанемометрии. В данной работе этим методом с использованием одноканальной термоанемометрической аппаратуры DISA-55M стандартной компоновки проводились измерения профилей осреднённой во времени скорости воздушного потока и среднеквадратичного значения пульсаций скорости по продольному и трансверсальному направлениям. В качестве чувствительного элемента датчика термоанемометра была использована вольфрамовая нить диаметром 5 мкм и длиной $1,1 \cdot 10^{-3}$ м. Перед использованием датчик был откалиброван по методике,

изложенной в [10]. При измерениях выходной сигнал с моста термоанемометра 55M01 поступал на вход вольтметра средних значений 55D31 для регистрации напряжения, пропорционального осреднённой скорости, и на вход среднеквадратичного вольтметра 55D35 для регистрации среднеквадратичных пульсаций напряжения, которые являются аналогом пульсационной составляющей скорости. С целью обеспечения максимальной точности позиционирования датчика термоанемометра было применено прецизионное координатное устройство, смонтированное на кронштейне специальной конструкции (рис. 1, б). Закрепление кронштейна на аэродинамическом стенде соответствовало условно выбранному выходному поперечному сечению ВК. Его положение (примерно 5 калибров ВК от основного входящего сопла и 7 калибров ВК от всасывающего вентилятора с учётом вставок, демпфирующих возмущения в потоке), определялось исходя из условий минимизации влияния державки датчика, а также вентилятора на формирование структуры течения в активной зоне. Координатное устройство позволяло перемещать чувствительный элемент термоанемометрической аппаратуры внутри воздуховода в вертикальном диаметрально направленном направлении с шагом $0,1 \cdot 10^{-3}$ м и отступами от верхней и нижней стенки $2 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 1, в).

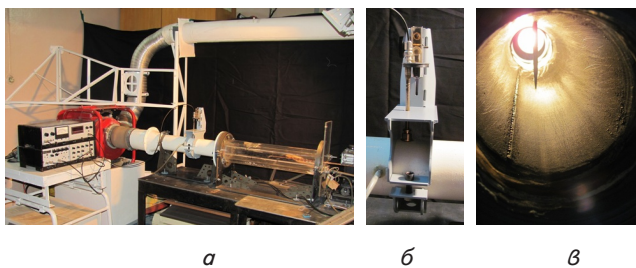


Рис. 1. Аэродинамический стенд:

а – общий вид стенда; б – координатное устройство; в – датчик термоанемометра внутри воздуховода

В ходе проведения опытов для измерения осевой проекции скорости чувствительный элемент датчика располагался перпендикулярно оси ВК, а для измерения трансверсальной проекции скорости – вдоль оси ВК. Для обработки результатов измерений и построения графических зависимостей использовалось коммерческое программное обеспечение Sigma Plot 11.0 (Systat Software, Inc.).

5. Результаты измерений структуры выходного потока камеры

Приведем схему и результаты первоначальных измерений распределений составляющих местной осреднённой скорости потока и интенсивности пульсаций для ВК с глухим торцом в безразмерном виде (рис. 2, а, б). Здесь и далее на рисунках представлены графики зависимостей $U^*(r^*)$, $W^*(r^*)$ и $\epsilon_w(r^*)$, $\epsilon_u(r^*)$, где $W^* = W/W_a$, $U^* = U/W_a$; W , U – осевая и трансверсальная проекции осреднённой скорости соответственно; W_a – среднерасходная скорость потока на выходе из ВК; $r^* = r/r_0$; r –

текущее значение радиуса, r_0 – радиус проточной части камеры; $\epsilon_w = (\sqrt{w'^2}/w)100\%$, $\epsilon_u = (\sqrt{u'^2}/U)100\%$ –

относительные интенсивности пульсаций осевой и трансверсальной проекций скорости; $\sqrt{w'^2}$, $\sqrt{u'^2}$ – среднеквадратичные значения пульсаций соответствующих проекций скорости; Q_{min} , Q_{max} – минимальное и максимальное значения расхода воздуха через ВК с глухим торцом; $Q_{ТС}$ – расход воздуха через управляющее торцевое сопло; Q_{Σ} – суммарный расход воздуха через ВК. Как видно из графиков (рис. 2, б), наибольшие значения трансверсальной проекции скорости и относительно невысокий уровень интенсивности пульсаций в том же направлении под верхней стенкой камеры чётко указывают на зону прохождения спиралевидного жгута ЭВО «усы» детерминированной природы с максимальным моментом количества движения [3–5]. В результате соответствующего перераспределения энергии величины осевой проекции скорости на значительной части рассматриваемой зоны близки к минимальным. Однако вследствие действия эффектов мощного сдвигового взаимодействия ЭВО с осевым потоком относительная интенсивность продольных пульсаций довольно высока и достигает 40–50 % на сегменте $-0,5 < r^* < 0,9$. Значительный рост интенсивности трансверсальных пульсаций в диапазоне $-0,4 < r^* < 0,4$ при провале в профиле осреднённой трансверсальной скорости, а также максимальный уровень осевых пульсаций в центральном течении объясняются ослаблением стабилизирующего действия центробежных сил, что приводит к наиболее интенсивному перемешиванию рабочей среды в зоне распространения ЦКТВ. С увеличением числа Рейнольдса Re_{PY} действие центробежных сил обуславливает некоторое подавление пульсаций скорости (максимально на 25 %) при естественном возрастании до 25 % двух проекций осреднённых скоростей.

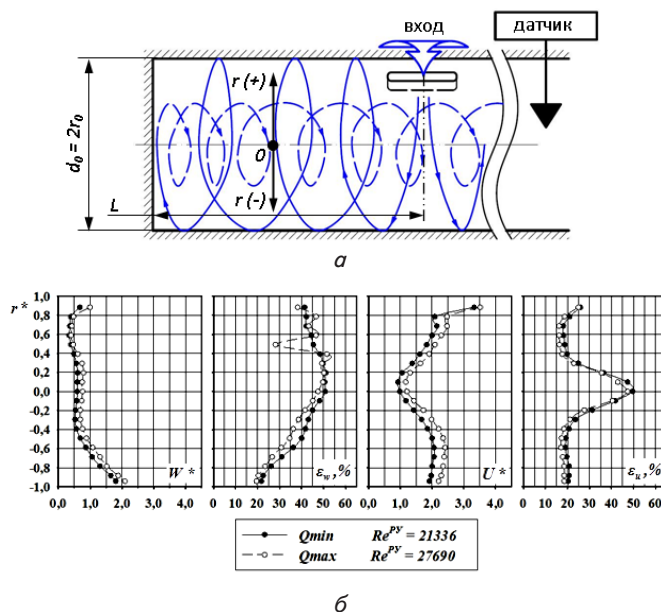


Рис. 2. Схема и характеристики вихревой камеры с глухим торцом: а – сечение расположения датчика в проточной части ВК; б – профили проекций скорости и интенсивности их пульсаций

Реализация схем управления структурой течения в ВК согласно постановке задачи осуществлялась с помощью поворотного торцевого сопла, установленного на шаровой опоре и соединённого через предвключённый участок стабилизации с автономным блочным вентилятором регулируемой подачи.

На рис. 3 представлены результаты термоанемометрирования потока в проточной части ВК с торцевой коаксиальной управляющей струей.

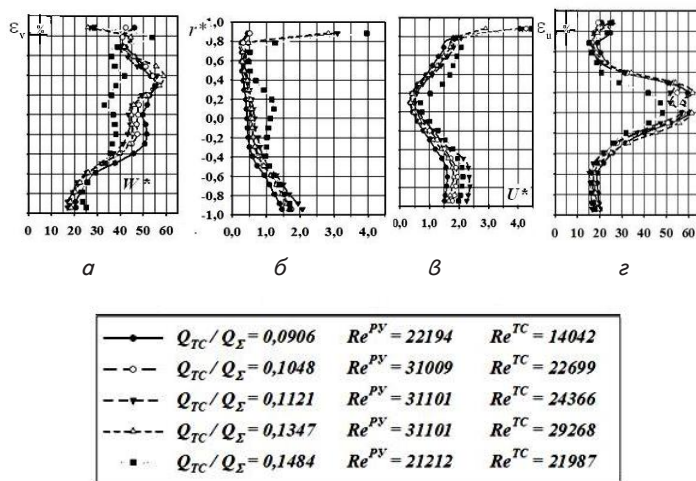


Рис. 3. Профили проекций скоростей и относительной интенсивности их пульсаций в проточной части ВК для случая коаксиальной управляющей струи:

а – $W^*(r^*)$; б – $\varepsilon_w(r^*)$; в – $U^*(r^*)$; з – $\varepsilon_u(r^*)$

Как видно из графиков, увеличение соотношения расходов Q_{TC}/Q_{Σ} , как основного параметра, влияющего на распределения скоростей и интенсивностей пульсаций, приводит к росту обеих проекций осреднённой скорости течения, локально достигающему вблизи центральной части камеры (при $-0,2 \leq r^* \leq 0,4$) 140–200 % от значений, соответствующих минимальному соотношению расходов – рис. 3, а. При этом интенсивность пульсационного движения весьма существенно снижается (осевая составляющая более, чем на 35 % – рис. 3, б, трансверсальная более, чем на 45 % – рис. 3, з – локально на сегменте $-0,4 \leq r^* \leq 0,4$). Таким образом, процесс перемешивания рабочей среды в составе ЦКТВ частично подавляется коаксиальной торцевой струей, что позволяет рассматривать её как фактор, стабилизирующий течение. В работе [9] отмечалось, что увеличение скорости коаксиальной управляющей струи приводит к увеличению диаметрального размера ЦКТВ и как бы способствует «превращению» тупиковой части ВК в проточную. При этом, коаксиальная струя, подпитывая энергию за счёт притока рабочей среды вихревое образование в торцевой зоне ВК, приводит к увеличению шага спиралевидного образования «усы» в проточной части ВК. Подтверждением такого видоизменения ЭВО служит проведенная ранее визуализация структуры течения, а также тот факт, что с постепенным увеличением соотношения Q_{TC}/Q_{Σ} в исследуемом диапазоне $Q_{TC}/Q_{\Sigma} = 0,0906 \div 0,1484$ (при условии строго фиксированного положения датчика вдоль оси ВК) происходит быстрое увеличение значения обеих проекций

безразмерной осредненной скорости при $r^* > 0,8$ в верхней части графиков $W^* = W/W_a$ и $U^* = U/W_a$: осевой скорости на 225 % – рис. 3, а, трансверсальной – более, чем на 140 % – рис. 3, в (для сравнения, при близких значениях числа Re^{PY} всплеск трансверсальной скорости в этой же зоне ВК с глухим торцом достигал 65 % – рис. 2, б).

Профили проекций скорости и относительной интенсивности пульсаций в проточной части ВК на рис. 4 отображают результат воздействия торцевой управляющей струи навстречу ЭВО «усы».

Как известно [8], в результате такого воздействия непосредственно вблизи цилиндрической стенки камеры на расстоянии примерно $(1,127 \div 1,714)d_0$ от торца образуется пара торнадоподобных вихрей, которая способствует образованию своеобразной околоторцевой застойной («мертвой») зоны, где распределение проекций скорости кардинально меняется, что приводит к частичной блокировке распространения ЭВО «усы» по направлению к торцу. Наличие такой зоны сокращает реальную протяженность области взаимодействия крупных вихревых структур в тупиковой части ВК и при этом локально вносит значительные перераспределения осредненных скоростей: при $r^* > 0,8$ и близких значениях числа Re^{PY} скачок осевой скорости приблизительно в 3 раза – рис. 4, а, а приток трансверсальной в 1,7 раза – рис. 4, в – превышает их приращения в этой же зоне ВК с глухим торцом – рис. 2, б. В верхней части пристеночной области рост соотношения Q_{TC}/Q_{Σ} приводит к скачку осреднённой осевой скорости до 300 % (рис. 4, а), трансверсальной, менее однозначно, – от –27 % до +23 % (рис. 4, в) в различных диапазонах Q_{TC}/Q_{Σ} , что отражается на перемещении среды в составе ЦКТВ. Относительная интенсивность пульсаций, как видно, претерпевает наибольшие изменения в диапазоне радиусов $-1,0 \leq r^* \leq 0,5$, причём при $-1,0 \leq r^* \leq 0,3$ наблюдается рост на 25–30 % интенсивности пульсаций обеих составляющих – рис. 4, б, з, а в диапазонах $-0,2 \leq r^* \leq 0,5$ для осевой (рис. 4, б) и $0 \leq r^* \leq 0,4$ для трансверсальной (рис. 4, з) составляющих возрастание Q_{TC}/Q_{Σ} приводит к падению интенсивности пульсаций до 20 %.

В результате воздействия на структуру течения в тупиковой части ВК управляющей струей, направленной спутно вращению рабочей среды в камере, в месте ее взаимодействия с ЭВО «усы», образуется устойчивое кольцевое вращение [8]. Данное «кольцо» располагается на расстоянии $\approx 1,5d_0$ от торца и имеет тенденцию к прецессии вдоль оси камеры. При этом изменение соотношения расходов Q_{TC}/Q_{Σ} оказывает существенное влияние на положение вихревого кольца: с увеличением указанного соотношения плоскость вращения кольца отдалается от торца. Изначально кольцо, как результат взаимодействия управляющей струи с ЭВО «усы», совершает вращение в плоскости, находящейся под непрямым углом к оси камеры. С помощью изменения угла поворота управляющего торцевого сопла имеется возможность изменять угол наклона плоскости вращения образованного кольца. Само по себе кольцевое вращение в тупиковой части камеры вызывает в струк-

туре течения следующие изменения с увеличением соотношения Q_{TC}/Q_{Σ} :

– в осевом и трансверсальном направлениях уменьшается шаг распространения ЭВО «усы», что подтверждается графическими зависимостями $W^*=W/W_a$ и $U^*=U/W_a$ при $0,7 \leq r^* \leq 1,0$ (рис. 5, а, в); уменьшение значений скорости – ситуация, обратная схеме с коаксиальной управляющей струей;

– при определенных режимах работы камеры существенно искривляется ось вращения ЦКТВ вдоль ВК, что отражается на графиках для трансверсальной проекции скорости при $0 \leq r^* \leq 0,4$ (рис. 5, в); при этом интенсивность осевых пульсаций снижается максимально на 25 % (рис. 5, б), а трансверсальных – на 65 % (рис. 5, з).

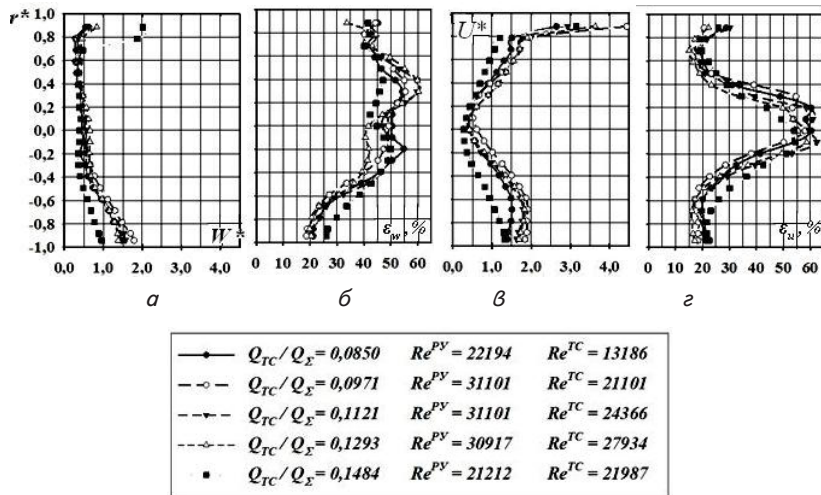


Рис. 4. Профили проекций скоростей и относительной интенсивности их пульсаций в проточной части ВК для случая встречно направленной управляющей струи: а – $W^*(r^*)$; б – $\varepsilon_w(r^*)$; в – $U^*(r^*)$; з – $\varepsilon_u(r^*)$

Анализ графиков на рис. 3–5 показывает, что наименее чувствительны к изменению параметра Q_{TC}/Q_{Σ} профили осреднённых и пульсационных скоростей при применении управляющего воздействия на ЭВО «усы» торцевой встречно направленной струей.

Важно отметить, что на рис. 3–5 участки экстремумов и перегибов на графиках $U^*(r^*)$, $W^*(r^*)$, а также участки монотонного изменения параметров свидетельствуют соответственно о больших или меньших сдвиговых эффектах в структуре течения, что указывает на зоны локализации процессов переноса большей или меньшей интенсивности в выходящем потоке ВК при различных значениях управляющего параметра Q_{TC}/Q_{Σ} . Различный характер и знаки изменения величин ε_w и ε_u при одинаковых значениях и интервалах изменения r^* говорят о существенной анизотропии и неоднородности пульсационного движения в потоке, что также отражает области различной эффективности процессов переноса массы и энергии в выходном сечении потока.

Для обобщения полученных результатов введем понятие интегральной степени неравномерности пульсаций осевой и трансверсальной компонент скорости K_w и K_u в исследуемом выходном сечении ВК. Для расчета этих величин выделим для каждого значения соотношения Q_{TC}/Q_{Σ} на графиках $\varepsilon_w(r^*)$ и $\varepsilon_u(r^*)$

минимальное ε_j^{\min} , максимальное ε_j^{\max} и среднее ε_j^a значения относительной интенсивности пульсаций обеих проекций скорости ($j=w, u$), а также введём обозначение $Q_{TC}/Q_{\Sigma} = q$. Расчет предложенных величин производим по следующим формулам:

$$K_w = \frac{\varepsilon_w^{\max} - \varepsilon_w^{\min}}{\varepsilon_w^a}, K_u = \frac{\varepsilon_u^{\max} - \varepsilon_u^{\min}}{\varepsilon_u^a}.$$

На основании полученных данных на рис. 6 предложены графики изменения интегральной степени неравномерности пульсаций проекций (осевой – рис. 6, а; трансверсальной – рис. 6, б) скорости.

Все кривые на графиках обобщаются полиномами 2-й степени вида $K_j = -c_{j1}q^2 + c_{j2}q - c_{j3}$, где $j=w, u$. Обобщение коэффициентов формулами бессмысленно, так как каждая тройка значений коэффициентов c_j в полиномах, соответствующих графикам $K_j = f(q)$, отражает не связанные друг с другом особые геометрические и аэродинамические условия воздействия на КВС управляющей струей. Поэтому сведём все величины коэффициентов полиномов в табл. 1.

Как видно из графиков распределения интегральной степени неравномерности пульсаций скорости, различные схемы организации струйного управления в тупиковой части ВК показали неоднозначный результат. Так, схема струйного управления структурой течения с помощью центральной (коаксиальной) струи на всем диапазоне изменений соотношения расходов q может обеспечивать как наибольшую, так и наименьшую степень неравномерности пульсаций

осевой скорости K_w по сравнению с другими схемами управления, а также имеет самый узкий диапазон изменения коэффициента K_u между его наименьшим и наибольшим значениями.

Схема струйного управления структурой течения с помощью встречной вращению основного потока управляющей струи имеет средний (между коаксиальной и спутной управляющей струей) диапазон изменения коэффициента K_w , а также наибольший диапазон изменения коэффициента K_u среди рассмотренных схем управления структурой течения. Отметим, что с изменением соотношения расходов q в диапазоне $0,084 \leq q \leq 0,115$ схемы для управляющих коаксиальной и встречной струй до максимального значения коэффициента K_u показывают идентичные результаты.

Схема управления структурой течения с помощью спутно направленной по отношению к КВС «усы» управляющей струи показывает похожие закономерности распределения интегральной степени неравномерности пульсации обеих проекций скорости – K_w и K_u , причём кривая $K_u(q)$ для данной схемы управления расположена эквидистантно двум другим кривым, но значительно выше их на участке $0,084 \leq q \leq 0,115$. Коэффициент K_w имеет наименьшие значения на значительной части исследуемого диапазона q , а также наименьший интервал изменения между минималь-

ным и максимальным значениями по сравнению с другими схемами управления. График же коэффициента K_u свидетельствует о наибольшей неравномерности распределения трансверсальных пульсаций в выходном сечении ВК по сравнению с другими схемами управления.

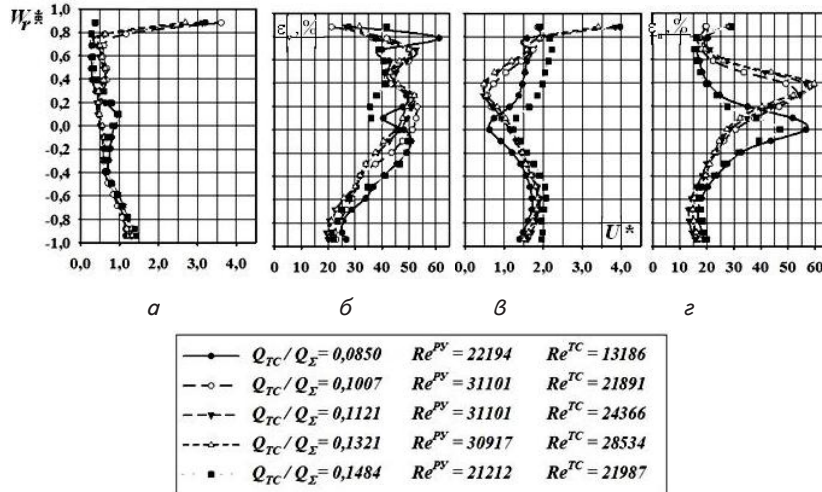
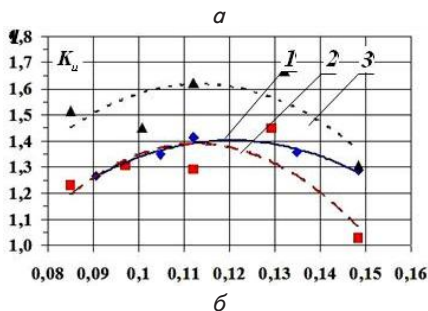
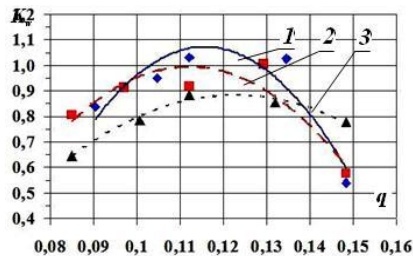


Рис. 5. Профили скоростей и интенсивности их пульсаций в проточной части ВК для случая спутно направленной управляющей струи: а – $W^*(r^*)$; б – $\varepsilon_w(r^*)$; в – $U^*(r^*)$; з – $\varepsilon_u(r^*)$



- ◆ Коаксиальная управляющая струя (1)
- Встречная управляющая струя (2)
- ▲ Спутная управляющая струя (3)

Рис. 6. Интегральная степень неравномерности пульсаций скорости: а – для осевой проекции скорости $K_w=f(q)$; б – для трансверсальной проекции скорости $K_u=f(q)$

Анализ рассмотренных схем управления структурой течения с помощью управляющей струи показывает, что в исследуемом диапазоне изменения соотношения расходов q имеют место следующие особенности:

- в осевом направлении интегральная степень неравномерности пульсации K_w принимает максимальное значение при использовании схемы управления с коаксиально направленной управляющей струей ($q = 0,1157$);

- в трансверсальном направлении интегральная степень неравномерности пульсации K_u принимает максимальное значение при использовании схемы управления со спутно направленной управляющей струей ($q = 0,1136$).

Таблица 1

Коэффициенты аппроксимирующих полиномов

j-проекция пульсации скорости	Коэффициенты полиномов, c_j	Направление управляющей струи по отношению к ЭВО «усы»		
		коаксиальное	встречное	спутное
осевая, $j = w$	c_{w1}	444,89	291,64	166,07
	c_{w2}	102,97	65,401	40,818
	c_{w3}	4,8861	2,6737	1,6267
трансверсальная, $j = u$	c_{u1}	154,11	249,72	205,29
	c_{u2}	37,08	56,348	46,625
	c_{u3}	0,8288	1,7908	1,0301

6. Выводы

Результаты проделанной работы позволяют сделать следующие выводы.

1. Получены гидродинамические характеристики структуры течения разных масштабов на выходе из вихревой камеры в зависимости от различных схем струйного управления структурой течения в тупиковой части камеры.

2. Установлено, что основным параметром, влияющим на профили осреднённых скоростей и относительных интенсивностей пульсаций, является соотношение расходов управляющей струи и выходного потока Q_{TC}/Q_S ; определены особенности качественного и количественного влияния различных режимов работы камеры и схем струйного управления структурой течения в тупиковой части ВК на картину осреднённого течения и распределения его пульсационных составляющих в проточной части камеры.

3. Аэродинамический анализ различных схем струйного управления структурой потока, определяющей эффективность процессов массопереноса в ВК, проведен на основе предложенного безразмерного параметра – интегральной степени неравномерности интенсивности пульсаций скорости в выходном сечении камеры.

4. Установлено, что наибольшее значения интегральной степени неравномерности интенсивности осевых пульсаций демонстрирует схема управления структурой течения с помощью коаксиальной торцевой струи, а трансверсальных пульсаций – схема

управления с помощью спутно направленной струи по отношению к ЭВО в тупиковой части камеры.

5. Для обеспечения более равномерного перемешивания рабочих сред в ВК следует избегать значения соотношений расходов управляющих торцевых струй и основного потока, которые соответствуют экстремальным величинам параметров K_w и K_u .

6. Обнаружены зоны локализации процессов переноса разной интенсивности в выходящем из камеры потоке, что позволяет учесть эти особенности при оценках рабочих характеристик ВК в

зависимости от управляющих параметров на стадии разработки камер, а также даёт возможность аргументированного принятия конструктивных решений для повышения гидродинамической и тепловой эффективности проектируемых вихревых аппаратов в энергетике, металлургической, химической, авиационной и в других отраслях промышленности в зависимости от назначения камер (перемешивание, разделение сред разной плотности, подача в закрученный поток второго компонента и т. д.).

Литература

1. Гупта, А. Закрученные потоки [Текст] / А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред; пер. с англ. – М. : Мир, 1987. – 588 с.
2. Халатов, А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил [Текст]: Т. 3. Закрученные потоки / А. А. Халатов, А. А. Авраменко, И. В. Шевчук. – К.: Институт теплофизики НАН Украины, 2000. – 474 с.
3. Makarenko R. A., Turick V. N. Kinematics of Flow in a Dead End Part of a Vortex Chamber [Text] / R. A. Makarenko, V. N. Turick // International Journal of Fluid Mechanics Research. – 2004. – Vol. 31, № 3. – P. 299–306.
4. Бабенко, В. В. Макет вихревых структур в вихревой камере [Текст] / В. В. Бабенко, В. Н. Турик // Прикладная гидромеханика. – 2008. – Т. 10 (82), № 3. – С. 3–19.
5. Турик, В. Н. К выбору способа управления структурой течения в тупиковой части вихревой камеры [Текст] / В. Н. Турик, Д. Е. Милуков // Вестник НТУ Украины КПИ: Машиностроение. – 2011. – № 63. – С. 70–73.
6. Babenko, V. V. Control of the coherent vortical structures of a boundary layer [Text] : Proc. of the CEAS/DragNet Eur. Drag Red. conf. / V. V. Babenko // Aerodynamic Drag Reduction Technologies. – Potsdam, Germany. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. – P. 341–350.
7. Babenko, V. V. The influence of the outflow generated vortex structures on the boundary layer characteristics [Text] / V. V. Babenko, L. F. Kozlov, S. A. Dovgij // The Second IUTAM Symposium on Laminar-Turbulent Transition. – Novosibirsk. – Berlin: Springer-Verlag, 1985. – P. 509–513.
8. Турик, В. Н. О динамическом методе управления структурой течения в вихревой камере [Текст] / В. Н. Турик, В. В. Бабенко, Д. Е. Милуков // Восточно-Европейский Журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 5, №7 (59). – С. 52–59.
9. Турик, В. М. Теоретичне узагальнення результатів експериментальних досліджень при керуванні структурою течії у вихрових камерах за допомогою коаксіального торцевого струменя [Текст] : матер. міжн. наук.-тех. конф. / В. М. Турик, Д. Є. Мілюков // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». – Київ, 2013. – С. 38–40.
10. Дыбан, Е. П. Тепломассообмен и гидродинамика турбулизированных потоков [Текст] / Е. П. Дыбан, Э. Я. Эпик. – Киев: Наукова думка, 1985. – 296 с.