

УДК 532.527+533.6.08 : 53.082.6

В.Н. Турик, канд.техн.наук, доц.

НТУ України «Київський політехнічний інститут», г.Київ, Україна

О ВЗАИМНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР И УПРАВЛЕНИИ ИМИ

Сформульовано принцип взаємної сприйнятливості вихрових структур щодо обмежених закручених потоків. Розроблено нову концепцію керування процесами переносу транспортабельних субстанцій у вихрових камерах та отримано практичне підтвердження її ефективності

The principle of mutual receptivity of vortex structures in reference to limited swirling flows is formulated. The new conception for control by processes of transportable substances transfer in vortex chambers is suggested and the practical conformation of its efficiency is received

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что кинематика вихрей и динамика их взаимодействия непосредственно влияют на тонкую структуру сдвиговых течений. Однако теория взаимодействия вихревых систем ещё не получила своего должного развития, особенно применительно к наиболее распространённой – турбулентной форме движения жидкостей и газов [1-4]. Кроме того, сама теория турбулентности по-прежнему остаётся в ряду главных нерешённых проблем классической физики. Одним из путей, приближающих к постановке задач оптимизации процессов переноса и управления ими, представляется развитие концепции когерентных вихревых структур и их восприимчивости [1-8].

Исследования последних десятилетий показывают, что процессы значительного крупномасштабного переноса массы, импульса и теплоты в сдвиговых течениях – слоях смешения, следах, струях, пограничных слоях, ограниченных закрученных потоках – определяются, в основном, детерминированными (квазидетерминированными) коллективными вихревыми движениями, обладающими известной стохастичностью как во времени, так и в пространстве [2-7]. Важно подчеркнуть, что в течениях со сдвигом статистическая совокупность вихрей (элементарных вихревых нитей), формирующих актуальные значения скорости, давления, температуры, концентрации и т.п., не является в строгом смысле взаимно независимой совокупностью, чего требует центральная предельная теорема Ляпунова [9-10]. Следовательно, турбулентное течение (как и ламинарное в целом ряде случаев [11]) включает как элемент движение упорядоченных вихрей детерминированной природы. Рошко [2] именует их «организованной структурой». Согласно Коулсу [4], такие вихревые структуры называются когерентными, если выполняется следующее условие: они образуют картину течения с достаточно полно сохраняемыми фазами (или разностью фаз) организованного квазирегулярного коллективного движения в перемещающейся относительно определенного начала отсчета системе координат, используемой для построения какой-либо средней по ансамблю характеристики. К образованию ячеек когерентных вихревых структур (КВС) приводит, например, центробежная неустойчивость течения в пограничных слоях на вогнутых стенках, чему посвящены классические работы

Тэйлора, Гёртлера, Смита, Л. Клаузера, Ф. Клаузера, Липмана [11], Вортмана [12], Флориана, Сарика, Блэкуэлдера [13-15], Л.Ф. Козлова, В.В. Бабенко, О.Д. Никишовой [5], Е.И. Никофоровича [16] и др., а также ряд исследований последних лет, например, [8, 17, 18]. Во многих работах показано, что КВС могут оказывать существенное влияние на закономерности тепломассообмена, напряжений поверхностного трения и общего гидродинамического сопротивления в потоках, особенно при наличии в них локальной или глобальной закруток [1-6, 11, 19-23]. Спэнглер, Уэллс (1964 г.), Мехта, Брэдшоу и др. (1981 г.) обнаружили, что даже при искусственно создаваемых в турбулентном пограничном слое на плоской стенке изолированном продольном вихре, а также противоположно закрученных пар вихрей и их серий наблюдается повышение среднего напряжения поверхностного трения от 20% до 60%, что позволяет ожидать и соответствующего возрастания теплового потока [21]. Из работ Крейта, Томанна, Маккормака, Уилкера, Келхера, Бринича, Грэхема, Эйбека, Итона и др. [20,21] известно, что при исключительном действии в потоке только «внутренней» системы продольных вихрей Тэйлора-Гёртлера, характерный линейный размер которых примерно равен толщине пограничного слоя на вогнутой поверхности, изменения средних значений интенсивности теплообмена по сравнению с условиями обтекания плоской пластины могут составлять, соответственно для турбулентного и ламинарного пограничных слоёв, от 20-40% до 100-190%. При этом утверждается, что местная интенсификация теплообмена благодаря действию продольных вихревых структур, доминирующих над остальными особенностями пограничного слоя, может быть существенно выше указанных значений. Вместе с тем замечено, что в ряде конструкций гидрогазовых систем, аппаратов и машин под общим названием «вихревые камеры», использующих закрученные потоки рабочих сред, может наблюдаться не только усиление процессов турбулентного переноса, но и их ослабление вплоть до блокировки [24-27]. Совершенно очевидно, что в реальных условиях закрученных сдвиговых потоков и интерференции нескольких коллективных вихревых образований разного вида, неизбежно преобразующих картину течения в целом по сравнению с движением без крутки на плоских поверхностях или в трубах, следует ожидать расширения указанных выше диапазонов отклонений, иных пространственных масштабов влияния, а также значительного изменения качественных и количественных характеристик процессов. Механизм же формирования, эволюции, взаимодействия КВС в таких течениях изучен пока недостаточно, что затрудняет решение проблемы управления ими и оптимизации рабочих процессов энергетических и технологических машин и аппаратов: газотурбинных двигателей, двигателей внутреннего сгорания, теплообменников, ядерных и химических реакторов, котлоагрегатов и промышленных печей, высокофорсированных камер МГД-генераторов, плазмотронов, ядерных ракетных двигателей, центробежных сепараторов и гидроциклонов, вихревых устройств гидроневмоавтоматики, вихревых эжекторов, термотрансформаторов и т.д.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ проблемы показывает, что на сегодня остаются открытыми важные с научной и практической точек зрения вопросы: все ли виды КВС, возникающих в

ограниченных потоках и определяющих процессы переноса в них, обнаружены и изучены? Можно ли локально и целенаправленно (избирательно), а также энергетически эффективно управлять этими процессами, и если можно – то как? Ответы на эти вопросы требуют следующих шагов. Во-первых, наиболее полной постановки тщательных экспериментальных исследований тонкой структуры КВС в сдвиговых течениях в полях центробежных сил. Во-вторых, аргументированного построения общей концепции энергетически малозатратного управления когерентными вихревыми структурами. В-третьих, разработки методов экспериментальной проверки и практической реализации основных принципов предложенной концепции. Ведь на сегодня развитие измерительной и компьютерной техники приблизилось к возможностям получать, сохранять и анализировать информацию о фазах формирования, эволюции и топологии таких структурных элементов дозвуковых и сверхзвуковых течений, как вихри и зоны концентрирования завихренности [17, 28, 29]. Настоящая работа иллюстрирует некоторый положительный опыт решения поставленных выше вопросов на примере вихревой камеры (ВК).

2. ПРОБЛЕМА ВОСПРИИМЧИВОСТИ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу предложенной концепции экспериментального исследования и управления КВС в ВК положен принятый нами ранее метод взаимной восприимчивости КВС [8], являющийся обобщением метода восприимчивости пограничного слоя, разработанного В.В. Бабенко [5-7]. Впервые проблема восприимчивости была поставлена Шильце и Верманном в исследованиях взаимодействия в пограничном слое естественной плоской волны Толлмина-Шлихтинга с вводимой плоской синусоидальной волной [6]. При сдвиге фаз этих волн на 180° наблюдалось значительное уменьшение амплитуды волны Толлмина-Шлихтинга. Позднее, с целью разработки единого метода изучения и единой теории переходного пограничного слоя, Морковин и Решотко развили понятие восприимчивости, но в рамках определения реакции пограничного слоя на внешние возмущения, которой отвечает нейтральное решение уравнений возмущающего движения с теми же фазовой скоростью и частотой, что и вносимое возмущение. В такой постановке проблема восприимчивости не учитывала важные нелинейные эффекты и трёхмерный характер развития возмущений в пограничном слое. Пользуясь некоторой аналогией с подходами электродинамики, В.В. Бабенко сформулировал новую, более полную постановку проблемы восприимчивости, понимая под последней характер и степень реакции переходного пограничного слоя на вносимые в него различные (как плоские, так и трёхмерные) возмущения. Пограничный слой был представлен как динамическая система (а в более расширенном подходе – как неоднородный несимметричный волновод [6]), обладающая спектром собственных частот, реакция которой на вносимые возмущения имеет резонансный характер. На основе такого подхода и результатов многочисленных экспериментальных исследований В.В. Бабенко не только предложил подробную физическую модель возмущающего движения и КВС на отдельных этапах перехода, но также детально

изучил и определил характер воздействия малых и больших возмущений различного типа на КВС переходного пограничного слоя в различных фазах его развития.

Анализ исследований структуры сдвиговых течений с КВС позволяет предположить, что независимо от вида изучаемых объектов, скоростей потоков и обнаруженных в них КВС закономерности взаимодействия последних и, следовательно, принципы управления ими остаются одинаковыми как для относительно мелкомасштабных структур пограничного слоя, так и для крупномасштабных КВС сложных потоков. В качестве базового физического объекта данного исследования выбрано сложное сдвиговое дозвуковое течение в поле центробежных сил в цилиндрической полости с тангенциальным подводом газа (воздуха) к ней и тупиковой областью с одной из сторон, т.е. в ВК типичной и широко распространённой в различных технических устройствах конструкции, создающей необходимые условия их функционирования, а также применяемой для интенсификации или подавления физико-химических и электрофизических процессов. В наших работах [7, 8, 17, 18 и др.] было обнаружено, что практически всё поле течения в такой простейшей ВК состоит из связанных между собой, известных и неизвестных ранее, упорядоченных квазистационарных пристеночных и объёмных КВС с различными зонами действия, характером локализации, формами, масштабами и спектральными характеристиками.

Метод взаимной восприимчивости КВС как обобщённый принцип управления ими состоит в следующем [8]: 1) вводимые в основной поток управляющие вихревые структуры должны быть той же или подобной природы, что и управляемые КВС; 2) расположение (пространственная ориентация соответствующих характерных осей возбуждения), геометрические масштабы и формы вносимых и естественно формируемых вихревых возмущений должны быть одинаковыми; 3) энергетические характеристики управляющих и управляемых КВС должны быть соизмеримыми, при этом совпадение их фаз усиливает управляющее воздействие (резонанс), противоположность фаз ослабляет его вплоть до полного подавления (антирезонанс).

В общей постановке предлагаем применение пассивных, активных и комбинированных способов управления КВС в ВК. Пассивные способы предполагают использование статических и динамических методов управления. С помощью первых из них осуществляется крупномасштабное воздействие на картину течения в целом в ВК посредством варьирования геометрическими параметрами соплового аппарата и камеры — углов тангенциальной и осевой ориентации проточного тракта впускного сопла (по отношению к цилиндрической части ВК), формы его проходного сечения, количества впускных сопел, относительной глубины расположения глухого торца ВК. В основе динамических методов положено использование генераторов управляющих вихревых структур в виде геометрических неоднородностей, например, канавок или трёхмерных лунок, расположенных на одной из обтекаемых поверхностей внутреннего тракта впускного сопла ВК и вносящих минимальные дополнительное гидродинамическое сопротивление в общее сопротивление камеры. Активные способы управления основаны на введении в проточный тракт ВК, в частности, в сопловой

канал, различным образом расположенных во входном потоке подвижных элементов в виде различных механических колебательных систем. Комбинированные способы предполагают комплексное применение пассивных и активных способов. Настоящий цикл работ кроме исследования внутрикамерных потоков включал предварительное экспериментальное изучение кинематики и спектральных характеристик вихревых течений вблизи прямоугольных и полуцилиндрических канавок, а также полусферических лунок [30, 31 и др.]. Геометрические параметры этих элементов выбирались такими, чтобы генерируемые ими вихревые структуры находились в геометрическом, кинематическом и энергетическом соответствии с обнаруженными нами ранее когерентными образованиями разных масштабов в ВК. Предлагаемая методология исследования заключается в экспериментальной проверке возможности управления как интегральной картиной течения в ВК, так и распределением энергии пульсаций между вихрями различных масштабов. Это открывает перспективу целенаправленного и оптимального по ресурсозатратам управления процессами переноса в сдвиговых течениях.

3. КВС В ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ И ПОИСК ПУТЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ

В работах [7, 8, 17, 18, 29 и др.] дано описание вихревой камеры в составе экспериментального аэродинамического стенда, комплексных методик исследования, результатов визуализации, инструментального изучения течения с помощью пневмометрирования, термоанемометрирования и лазерного луча, а также приведены некоторые расчётные оценки по идентификации серии КВС в ВК. Получены количественные данные интегральных геометрических, кинематических и энергетических характеристик структуры течения в элементах ВК: толщины пограничного слоя, толщины потери импульса, диапазонов критериев вязкой центробежной неустойчивости, зон локализации вихрей различного масштаба, их длин волн и интенсивности, а также спектры мощности пульсаций осевой и окружной составляющих скорости течения входящего в камеру воздушного потока. Кроме вихрей гёртлеровской и тейлоровской природы были обнаружены и особо выделены подпитываемые ими на разных этапах формирования наиболее энергонесущие переносные вихревые образования (рис.1), распространяющиеся по спиралевидным траекториям в периферийной области сложного течения как в проточную (слева), так в тупиковую (справа), части ВК.

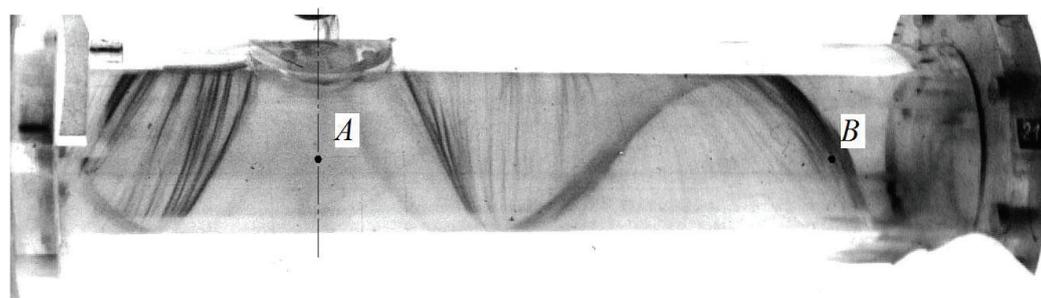


Рис.1. Визуализация энергонесущей спиралевидной КВС в вихревой камере и расположение державки датчика термоанемометра [29]

Сосредоточим внимание на прикладном аспекте обнаруженного явления, связанном с управлением тонкой структурой энергонесущей КВС, т.к. совершенно очевидно, что она в наибольшей мере определяет процессы переноса массы, импульса и теплоты внутри вихревых камер различного назначения. Наша задача – определить реакцию крупномасштабной КВС как динамической системы на направленное воздействие на неё искусственно создаваемыми вихревыми возмущениями в соответствии с указанными выше способами управления. Изучение отклика этой системы на управляющие воздействия осуществлялось по изменениям в распределениях как осреднённых скоростей течения, так и плотности вероятности мгновенных величин окружных составляющих скоростей распространения КВС в двух фиксированных точках измерения А и В, а также в сравнении одномерных частотных спектров между собой при наличии и отсутствии внешних вихревых возмущений. Окружные скорости при спектральном анализе выбраны в связи с более стабильным распределением и всегда положительной определённой осреднённых значений по радиусу и вдоль оси цилиндрической части ВК по сравнению с квазигармоническим характером полей осреднённых осевых составляющих скорости. Анализ закона распределения плотности вероятности был вначале проведен по мгновенным, а не пульсационным, величинам окружных скоростей по следующим причинам. Во-первых, при установленном нами статистически стационарном (квазистационарном) поведении интегральной картины распределения КВС внутри ВК мгновенные значения скоростей в основном отражают характер флуктуаций скорости. Во-вторых, корректное выделение пульсационных составляющих требует технически трудно выполнимого глобально экспериментального поиска законов распределения плотности вероятности актуальной скорости и соответствующих мод в каждой точке любой из зон измерения. Кроме того, для обеспечения одной и той же погрешности в оценках величин среднеквадратичного отклонения (с.к.о.), контрэксцесса и др. может быть вполне достаточно малой выборки исходных данных при одном законе распределения, при другом же – выборка должна быть значительно большей. Без установленного вида закона распределения не могут быть выражены через с.к.о. и квантили. Априорное принятие, например, гауссова (нормального) закона не всегда представляется очевидным.

Настоящее исследование проводилось на упомянутом выше аэродинамическом стенде, рабочим участком которого служила вихревая камера внутренним диаметром $d_0 = 0,102\text{ м}$ с осевым отводом воздуха и относительной глубиной расположения торца относительно середины впускного сопла $\bar{L} = L/d_0 = 4,4$. Одиночное впускное сопло с размерами проходного сечения $0,041 \times 0,025\text{ м}^2$ и скруглениями при вершинах радиусом $0,005\text{ м}$ имело угол тангенциальности входа в ВК $\gamma = 88^\circ$ при различных углах α расположения большей стороны соплового окна относительно оси цилиндрической части камеры. Число Рейнольдса в соответствии со средней скоростью потока в сопле и его эквивалентным диаметром составляло $Re_c = 87\,559$. Эксперименты проводились в соответствии со специально разработанными нами методиками, частично описанными в работе [29], с помощью термоанемометрической

аппаратуры DISA-55M фирмы «DISA Elektronik» с одноточечным датчиком проволочного типа, чувствительный элемент которого был изготовлен из вольфрамовой нити диаметром 5 мкм, общей длиной $1,1 \cdot 10^{-3}$ м.

По одной из методик аналоговый сигнал с электронного моста термоанемометра направлялся на фильтр нижних частот с полосой пропускания 320 Гц (выбранный частотный диапазон определялся предварительными экспериментами с использованием осциллографа с памятью и анализатора спектра). Отфильтрованный сигнал поступал в аналого-цифровой преобразователь L-264 фирмы «L-Card», выполненный в виде платы расширения к IBM-совместимому компьютеру. Частота дискретизации сигнала (частота опроса датчика) выбиралась, согласно теореме Котельникова, вдвое большей частоты среза фильтра нижних частот и составляла 640 Гц. Приведенные ниже данные были получены путём обработки информации с помощью лицензионных программных пакетов «Statistica 5.0» (фирмы «StatSoft») и «PowerGraph» (МГУ). Погрешность измерений не превышала 5%, большую часть которой составляла систематическая погрешность градуировки термоанемометра; случайная составляющая, представленная относительной среднеквадратичной погрешностью, равнялась 0,12% с доверительной вероятностью $P = 0,9$. Первая точка измерения (точка А) располагалась в центральной сопловой плоскости нормального сечения ВК на радиальном расстоянии 0,002 м от её внутренней стенки, полярный угол θ расположения точки, отсчитанный от вертикальной оси нормального сечения, составлял 90° (см. [17]). Эта точка находилась в зоне формирования вихрей Гёртлера на криволинейной стенке ВК [7, 8, 17, 18]. Вторая точка измерения (точка В) располагалась ближе к глухому торцу ВК, что соответствует полярному углу $\theta = 81^\circ$ (с учётом определённого непосредственной визуализацией и обработкой кинограмм течения полного оборота на 360° входящей струи в центральном сопловом сечении камеры [8,18]). Положение этой точки определялось в визуализационном эксперименте как геометрический центр следа сформированной энергонесущей спиралевидной КВС в горизонтальной диаметральной плоскости цилиндрической части ВК (см. рис.1).

В данном цикле исследований внесение управляющих возмущений в ВК осуществлялось с помощью вихрегенераторов (ВГ) восьми видов, расположенных только во впускном сопле камеры. В зависимости от конструкции и способа генерирования возмущений ВГ подразделялись на 3 группы. Первая группа включала два варианта ВГ (рис.2): I вариант – прямоугольная канавка с

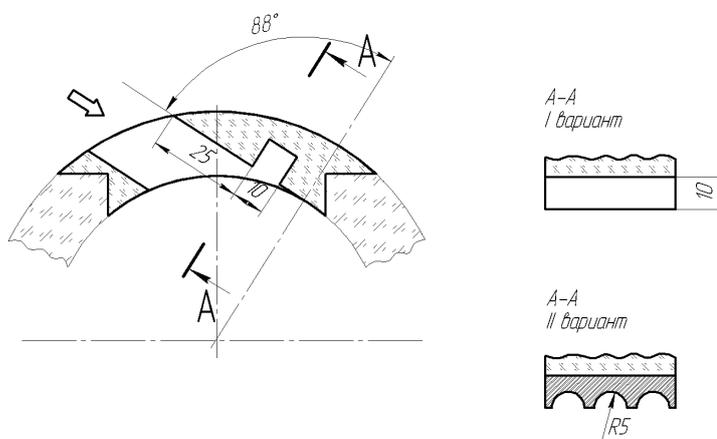


Рис.2. Схема впускного сопла с вихрегенераторами пассивного управления КВС

размерами $0,01 \times 0,01 \text{ м}^2$, розміщена поперёк потоку на внутрішній поверхні сопла, яка сопрягається з циліндричною поверхнею ВК; II варіант – три півсферическі лунки діаметром $0,01 \text{ м}$ кожна, розміщені там же замість канавки.

Таке розміщення і розміри ВГ першої групи вибрано згідно положенням сформульованого вище обобщенного принципу управління КВС. В углубленнях повинні формуватися і періодично викидатися в вхідний потік ВК вихреві утворення з продольними осями обертання [30-31]. Таким чином забезпечуються необхідні умови впливу вихревих порушень на вихри Гёртлера і Тейлора, виявлені раніше на сопряженній з соплом циліндричною поверхнею ВК [7, 8, 17, 18] і вливаються в найбільш енергонесущі спіралеподібні КВС.

Вторая група включала пять видов ВГ на основе установленных на входе в сопло крыльшек с различными упругими и демпфирующими свойствами, флаттерующих в потоке воздуха. Принцип работы ВГ этой группы заключался в непрерывном внесении вихревых возмущений по всему живому сечению сопла спутным следом упругодеформируемых элементов, находящихся в режиме автоколебаний с размахом вдоль вертикальной, либо горизонтальной плоскостей. Приведенный в данном исследовании ВГ третьей группы представлял собой вариант комбинированного воздействия на КВС вихревыми возмущениями от прямоугольной канавки размерами $0,01 \times 0,01 \text{ м}^2$ и ВГ №5 из второй группы.

Сложность задачи состоит в том, что в случае её общего решения не существует единой методологии анализа случайных процессов, которые в отдельных зонах ВК могут быть нестационарными, что затрудняет анализ поведения частотных спектров мощности пульсирующей мгновенной скорости течения. Известно, что только для гауссовых случайных процессов понятия слабой и строгой стационарности совпадают. Поэтому для обеспечения корректности физической интерпретации экспериментальных данных по определению меры воздействия на энергонесущую КВС в ВК и сравнению различных способов управления вихревой структурой проводились построение гистограмм выборки случайной величины [29], анализ законов распределения плотности вероятности её, а также дисперсионный анализ в окрестностях точек А и В вихревой камеры. В результате установлено, что кривые распределения плотности вероятности случайной величины (мгновенной скорости) в точке А вблизи цилиндрической стенки ВК под соплом как при наличии управляющих воздействий на входную струю, так и без них, существенно отличаются от нормального закона, прежде всего, многомодовостью, а также по коэффициентам асимметрии и эксцесса. Это говорит о сложном, нестационарном в статистическом смысле, многофакторном и незавершённом процессе формирования и взаимодействия накладываемых друг на друга вихревых образований гёртлер-тейлоровской природы в этой зоне. Поэтому оценка энергетического баланса движения среды на основе спектральных подходов в этой пространственно-частотной области исследования крайне затруднена. Анализ типичных кривых закона плотности вероятности мгновенной скорости в удалённой от сопла в сторону торца ВК точке В (рис. 3), несмотря на выявленную ранее [29]

некоторую периодичность поведения кривой распределения, показал, что в этой зоне процесс формирования крупномасштабной спиралеобразной КВС вполне завершён. Для случая отсутствия управляющего воздействия на поток, а также при пассивных способах управления закон распределения вероятности близок к гауссовому при относительно небольших отклонениях математического ожидания, рассчитанного по среднему арифметическому, от моды реального закона распределения. Это позволяет производить в точке В сравнение эффективности различных способов управления крупномасштабной КВС классическим построением распределений спектральной плотности мощности пульсаций скорости (рис. 4), что вполне правомерно, судя по рассчитанным величинам контрэксцесса ($0,539 \leq \kappa \leq 0,577$). По теореме Хинчина-Винера частотный спектр мощности (энергетическая спектральная плотность) $P(\omega)$ пульсаций скорости $u'(t)$, близких по свойствам к стационарности, вводится как Фурье-преобразование второго корреляционного момента (автокорреляции) $R(\tau) = \overline{u'(t)u'(t + \tau)}$ пульсаций [9,10]:

$$P(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

где t - время; ω - круговая частота, $\omega = 2\pi f$; f - частота пульсаций.

Справедливо и обратное преобразование Фурье

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\omega) e^{i\tau\omega} d\omega,$$

которое при $\tau = 0$ даёт дисперсию

$$\sigma^2 = R(0) = 2 \int_0^{\infty} P(\omega) d\omega.$$

Таким образом, мощность пульсаций скорости равна сумме мощностей отдельных гармонических составляющих этих пульсаций. Считается, что с физической

точки зрения корреляционная функция меньше подходит для описания структуры турбулентных потоков, чем спектральная функция, однако нам представляется анализ дисперсий не менее важным и плодотворным, особенно при оценках пространственно-частотного распределения энергии пульсационного движения. Нами при цифровом анализе использовался алгоритм быстрого преобразования Фурье, вычисляющий дискретное преобразование Фурье (как прямое, так и обратное) для n точек отсчёта конечного числа дискретных выборок приблизительно за $n \log_2 n$ операций вместо n^2 операций прямого вычисления рядов при традиционном методе, причём каждая такая

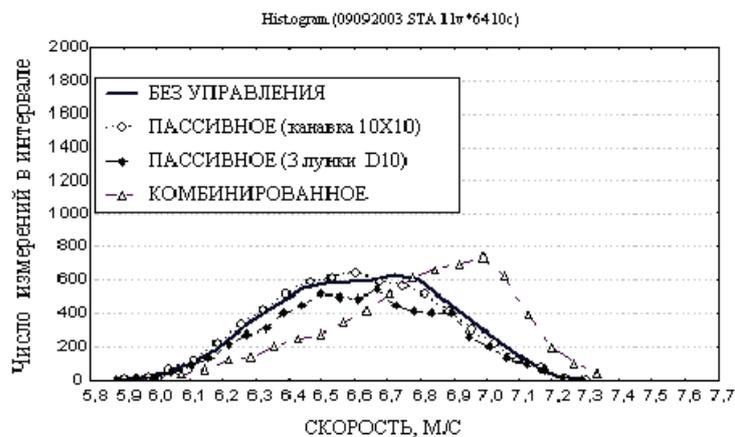


Рис. 3. Распределение вероятности мгновенной скорости в точке энергонесущей КВС при различных воздействиях на входной поток

операция состоит из комплексного умножения и сложения. Для оценки частотного распределения энергии пульсационного движения по дисперсиям применялась цифровая информационная технология КИХ.

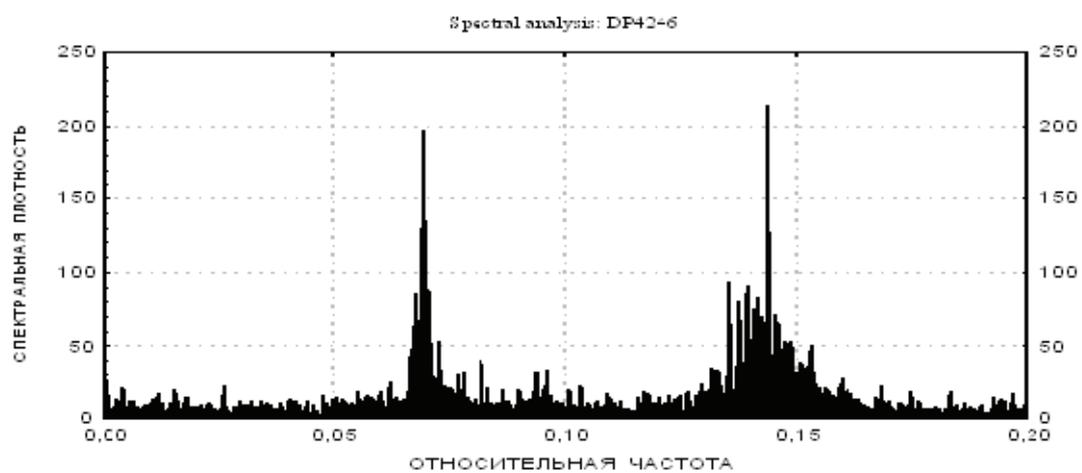
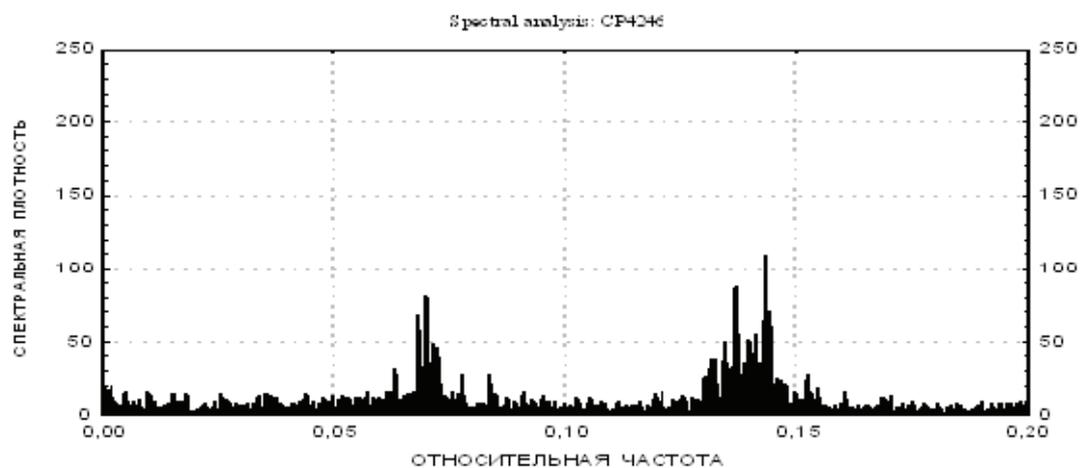
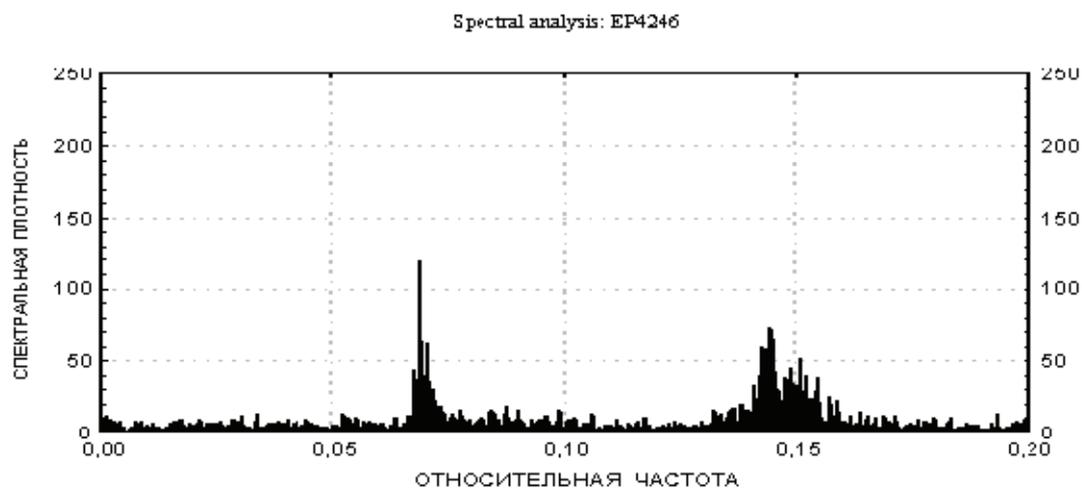


Рис. 4. Спектральная плотность мощности пульсаций скорости в зоне энергонесущей КВС.

На рис. 4 под относительной частотой, отложенной по осям абсцисс спектральных характеристик, понимается отношение частоты пульсаций скорости к частоте дискретизации сигнала, равной 640 Гц . Применение полосовых фильтров при компьютерной обработке данных измерений, анализ частотных спектров мощности пульсаций скорости, а также дисперсионный анализ энергетического баланса пульсационного движения в заданной пространственно-частотной области показывают следующее. В пределах интересующего нас наиболее важного для процессов переноса диапазона частот пульсаций $0 - 320 \text{ Гц}$ наименее информативным оказался диапазон белого шума $150 - 320 \text{ Гц}$. Как видно из рис. 4, диапазон частот $0 - 150 \text{ Гц}$ в точке В содержит две наиболее характерные полосы энергонесущих частот: приблизительно $34 - 55 \text{ Гц}$ и $89 - 110 \text{ Гц}$. Чётко выраженные в них гармонические составляющие функции спектральной плотности, например, при частотах $f_1 = 46,75 \text{ Гц}$, $f_2 = 93,5 \text{ Гц}$ и $f_3 = 97,75 \text{ Гц}$, свидетельствуют о явных признаках самоорганизации процесса в открытой диссипативной системе как при отсутствии, так и при наличии управляющих воздействий. Эффекты воздействия на крупномасштабную спиралеобразную КВС вихрегенераторами пассивных способов управления, по сравнению с течением в отсутствие их, таковы: вихри, генерируемые в сопле канавкой, приводят к увеличению общей энергии пульсаций в точке В в окружном направлении более, чем в 2 раза, причём на наиболее энергонесущей частоте пульсаций f_1 от крупных вихрей спектральная плотность мощности возрастает в 1,7 раза (по С.П. Курдюмову [32], это – режим с обострением, свойственный открытым нелинейным системам, в которых подпитка энергией и её восприятие происходят не по всему спектру мод, а избирательно, лишь для определённых видов колебаний, определённых гармоник); вихри, генерируемые в сопле тремя полусферическими лунками, практически не увеличивая общей энергии пульсаций в точке В, приводят к уменьшению спектральной плотности мощности на частоте f_1 в 1,5 раза при одновременном росте спектральной плотности в несколько суженном высокочастотном диапазоне в окрестности частоты f_3 более, чем в 1,5 раза. Если основную энергонесущую частоту пульсаций f_1 принять за базу, то в случае отсутствия управляющих воздействий на входной поток спектральная плотность распределяется между частотами f_1 и f_3 в пользу энергонесущей частоты f_1 на +37%, что говорит о преобладании в спектре энергии крупных вихрей. Обратная картина наблюдается при использовании в сопле вихрегенераторов в виде трёх лунок: ровно на такую же величину по модулю, но со знаком минус, энергия крупных вихрей перераспределяется между частотами f_1 и f_3 в пользу частоты f_3 вихрей меньшего масштаба. При расположении в сопле прямоугольной канавки рост значения спектральной плотности на частоте f_3 по сравнению с базовой энергонесущей частотой f_1 незначителен и составляет 5%. Интересно отметить, что при переходе от случая «б» к случаю «а» согласно рис. 4 наблюдается явление, аналогичное «отрицательной» турбулентной вязкости [9,33]: при снятии средств управления в сопле вместо рассеяния структурных неоднородностей в виде вихрей в соответствии с каскадным переносом энергии вниз по спектру происходит их укрупнение и усиление на базовой энергонесущей частоте на 50%, что означает наличие

работы механизмов нелинейной положительной обратной связи в исследуемой КВС как в сложной нелинейной системе [32]. В результате перераспределения энергии от малых масштабов к большим среднее течение может получать кинетическую энергию от разных источников. По-видимому, в нашем случае один из источников – нерегулярные турбулентные движения, когда нелинейность обуславливает перекачку энергии от одних гармоник к другим в сторону меньших волновых чисел, а диффузионные процессы приводят к затуханию более высокочастотных гармоник. Кроме того, при квазистационарном режиме внутреннего энергообмена в КВС составляющие её вихри должны подпитываться энергией и от других источников, обусловленных, например, не ослабленной противофазными выбросами из лунок локализацией вихревых структур, зарождающихся в угловых зонах сопла при наличии мощных продольно-поперечных сдвиговых явлений, которые, суммируясь с вихрями тэйлор-гёртлеровской природы, формируют спиралеобразную КВС. Наконец, может существовать процесс отрицательного порождения энергии турбулентности [9], как это имеет место при асимметричном течении в плоском канале с одной гладкой и одной шероховатой стенками [33]. В нашем случае такое явление возможно при несовпадении точек изменения знаков градиента скорости и касательного напряжения в пристеночном спиралеобразном составном вихревом жгуте, с одной стороны касающемся цилиндрической стенки, с другой – смежных вихревых структур. В конечном итоге, как показывают измерения, при переходе от сопла с тремя лунками к соплу с гладкой внутренней поверхностью меняется не только спектральный состав пульсационного движения, но и средняя окружная скорость энергонесущей КВС: она возросла на 10% (с 12,37 м/с до 13,65 м/с). Переход же от гладкого сопла к соплу с прямоугольной канавкой увеличивает среднюю окружную скорость КВС на 18% (с 13,65 м/с до 16,01 м/с).

Описанный феномен иллюстрирует явление «наследственности» в вихревых потоках. Первичные возмущения, вносимые в поток либо вихрями от лунок и канавки в сопле камеры, либо интерференцией вихревых структур при их формировании в гладком сопле и в присопловой области ВК, содержатся в «памяти» потока почти без явных проявлений до тех пор, пока не станут близкими друг другу природа, геометрические и энергетические масштабы возмущений и вихревых образований, естественно развивающихся в пристеночном течении камеры в силу соответствующей аэродинамической картины течения. Тогда, в соответствии с принципом восприимчивости КВС, при несовпадении фаз управляющих и управляемых вихревых структур происходит подавление последних (переход от случая «а» к случаю «б» на энергонесущей частоте f_1); при совпадении же фаз происходит резкое усиление управляемых структур (переход от случая «а» к случаю «в» на частотах f_1 и f_3), причём здесь, по-видимому, важна не столько величина энергии управляющего воздействия, сколько топологически правильный характер её распределения в пространстве [32]. Заметим, что относительное изменение общего гидравлического сопротивления вихревой камеры при использовании указанных геометрических неоднородностей во впускном сопле составляло величину, находящуюся в пределах относительной погрешности измерений. **ВЫВОДЫ**

1. Предложена методология экспериментального исследования КВС и их особенностей в ограниченных закрученных потоках на основе комплексного применения визуализации, термоанемометрирования течения, а также дисперсионного и спектрального анализа данных при цифровой обработке сигналов.

2. В соответствии со сформулированным принципом взаимной восприимчивости вихревых структур разработана концепция эффективного управления крупномасштабными КВС, определяющими процессы переноса транспортабельных субстанций в вихревых камерах.

3. Получены положительные результаты экспериментальной апробации методики избирательного воздействия на распределение пульсационной энергии вихрей различных масштабов как составляющих элементов наиболее энергонесущего когерентного образования в вихревой камере.

4. Предложенный анализ закономерностей перераспределения энергии при таком способе управления (взаимодействием управляющих возмущений с управляемой КВС) позволил обнаружить явление отрицательной вихревой вязкости – передачи кинетической энергии пульсаций от вихрей турбулентной и детерминированной природы вверх по спектру к крупным вихрям и далее к среднему течению. Это открывает возможности постановки и практического решения задач оптимального управления гидромеханическими процессами в вихревых камерах.

5. При принятых соотношениях геометрических параметров ВК и вихрегенераторов управление вихрями от прямоугольной канавки в сопле является целесообразным для значительной интенсификации процессов переноса в ВК. Вихри от лунок в сопле – наоборот: способствуют перераспределению энергии пульсационного движения внутри крупномасштабной КВС в сторону более мелких вихрей.

6. Необходимы дальнейшие инструментальные исследования механизма энергетической поддержки определённых мод трансверсальных пульсаций скорости в энергонесущей КВС вихревой камеры, ибо кроме описанных факторов может иметь место подпитка кинетической энергией рассматриваемых пульсаций от двух других компонент скорости среднего течения в результате сложной эволюции КВС в её орбитальном и спиновом движении.

Автор признателен д.т.н., проф. Бабенко В.В. за постоянное внимание и советы при проведении исследования, а к.т.н. Кочину В.А. — за помощь при обработке больших массивов экспериментальных данных.

Список литературы

1. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: [учеб. для студ. вузов] / Л. Г. Лойцянский. – [6-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 840 с.: ил., табл. – Библиогр.: с. 831-834.
2. Roshko A. Structure of Turbulent Shear Flow: A New Look / A. Roshko // AIAA Journal. – 1976. – Vol. 14, No. 10. – P. 1349-1357.
3. Cantwell B. J. Organized Motion in Turbulent Flow / B. J. Cantwell // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1981. – Vol. 13. – P. 457-515.
4. Coles D. The Uses of Coherent Structures / D. Coles // AIAA Papers 0506. – 1985. – P. 1-13.
5. Формирование турбулентности в сдвиговых течениях : [монография] / [Л.Ф. Козлов, А. И. Цыганюк, В.В. Бабенко и др.]. – К. : Наукова думка, 1985. – 284с.: ил., табл. – Библиогр.: с. 266-281.

6. Бабенко В.В. Пограничный слой на эластичных пластинах: [монография] / В.В. Бабенко, М.В. Канарский, В.И. Коробов. – К.: Наукова Думка, 1993. – 264 с.: ил., табл. – Библиогр.: с. 252-261. – ISBN 5-12-003144-7.
7. Babenko V., Turick V. Coherent Vortical Structures Control in Flat and Curvilinear Parietal Flows / V. Babenko, V. Turick // Proc. of the World Congress “Aviation in the 21-st Century” (14-16 Sept., 2003). – Kyiv : NAU, 2003. – P. 2.54-2.58.
8. Турик В. Н. Когерентные вихревые структуры в ограниченных закрученных потоках / В. Н. Турик // Вісник Черкаського держ. технологічного ун-ту. – 2004. – №2. – С. 58-67.
9. Брэдшоу П. Введение в турбулентность и её измерение: [монография] / П. Брэдшоу; пер. с англ. В.Ф. Альимова [и др.] под ред. Г.С. Глушко. – М.: Мир, 1974. – 280 с.: ил., табл. – Библиогр.: с. 265-270.
10. Смольяков А. В. Измерение турбулентных пульсаций : [монография] / А. В. Смольяков, В. М. Ткаченко. – Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. – 264 с.: ил. – Библиогр.: с. 260-263.
11. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя: [монография] / Г. Шлихтинг; пер. с нем. Г.А. Вольперта под ред. Л.Г. Лойцянского. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974. – 712 с.: ил., табл. – Библиогр. в конце гл.
12. Wortman F.X. Visualization of Transition // J.Fluid Mech. –1969. – Vol.38, Part 3. – P.473-480.
13. Floryan J.M. and Saric W.S. Stability of Görtler Vortices in Boundary Layers//AIAA Journal. – 1982.-Vol.20, № 3. - P.316-324.
14. Blackwelder R.F. Coherent Structures Associated with Turbulent Transport // Transport Phenomena in Turbulent Flows. - Hemisphere Publ. Corp. - Eds.: M. Hirata and N. Kasagi, 1988. – P. 69 – 88.
15. Saric W.S. Low-speed Boundary-layer Transition Experiments // Experiments, Theory & Computations. – Oxford. – Eds.: T. C. Corke, G. Erlebacher, M.Y. Hussaini, 1994. – P. 14 – 114.
16. Никифорович Е.И. Асимптотические пространственно-временные свойства пограничных слоёв над искривлёнными поверхностями / Е.И. Никифорович // Прикладна гідромеханіка. –1999. – Т.1(73), № 1. – С.38-51.
17. Турик В.Н. О гидродинамической неустойчивости течений в вихревых камерах / В. Н. Турик // Промислова гідраліка і пневматика. – 2006. – № 3(13). – С. 32-37.
18. Бабенко В.В. Макет вихревых структур при течении потока в вихревой камере / В.В. Бабенко, В.Н. Турик // Прикладна гідромеханіка. – 2008. – Т. 10 (82), № 3. – С. 3–19.
19. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки: [монография] / А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред; пер. с англ. В.И. Васильева [и др.] под ред. С.Ю. Крашенинникова. – М.: Мир, 1987. – 588 с.: ил., табл. – Библиогр: с. 550-583
20. Маккормак П., Уилкер Г., Келхер М. Вихри Тейлора-Гёртлера и их влияние на теплообмен // Теплопередача. – 1970. – №2. – С. 106-118.
21. Эйбек П., Итон Дж. Влияние продольного вихря, погруженного в турбулентный пограничный слой, на теплообмен // Теплопередача. – 1987. - № 1. – С. 14-24.
22. Халатов А.А., Авраменко А.А., Шевчук И.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил: В 4 т. — К.: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2000. – Т. 3: Закрученные потоки. – 474 с. : ил., табл. – Библиогр. в конце гл.
23. Халатов А.А., Борисов И.И., Шевцов С.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. — К.: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2005. – Т.5: Тепломассообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков. – 500 с.: ил., табл. – Библиогр. в конце гл.
24. Гольдштик М.А. Вихревые потоки : [монография] / М.А. Гольдштик – Новосибирск : Наука, Сиб.отд-ние, 1981. – 366 с.: ил., табл. – Библиогр. в конце гл.
25. Сухович Е.П. Турбулентное смешение ограниченных закрученных струй / Е.П. Сухович // Изв. АН Латв. ССР. Сер. физич. и техн. наук. – 1982. – № 1. – С. 72-80.
26. Левин В.Б. О стабилизирующем влиянии вращения потока на турбулентность / В.Б. Левин // Теплофизика высоких температур. – 1964. – 2, № 6. – С. 892-900.
27. Петриченко М.Р. Блокирующее действие вращательного движения газа на теплопередачу в камере сжатия (сгорания) / М.Р. Петриченко // Двигателестроение. – № 4. – 1990. – С. 57-58.
28. Струйные и нестационарные течения в газовой динамике / [В.Н. Глазнев, В.И. Запругаев, В.Н. Усков и др.]; под ред. С.А. Гапонова и А.А. Маслова. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2000. – 200 с.
29. Кочин В.А. Особенности методики проведения термоанемометрического эксперимента при исследовании структуры течений в вихревой камере / В.А. Кочин, В.Н. Турик // Вестник Нац. техн. ун-та Украины “КПИ”. Машиностроение. – К., 2005. – Вып. 47. – С. 54–57.
30. Babenko V.V., Turick V.N., Voskobijnyk A.V. Energy Spectrum of Turbulence near Dimple-Flow // International Conference on Turbulence in Shear-Flows (October, 2005). – Montreal, Canada, 2005. - P.612-613.
31. Турик В.Н. Вихревое движение в полусферической лунке на поверхности обтекаемой пластины / В.Н. Турик, В.В. Бабенко, В.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник // Вестник Нац. техн. ун-та Украины “КПИ”. Машиностроение. – К., 2006. – Вып. 48. – С. 79–85.
32. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Основания синергетики. Синергетическое мировидение : [монография] / Е.Н. Князева, С.П. Курдюмов. – М. : Ком книга, 2005. – 240 с. – Библиогр.: с. 204-230.
33. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета): Монография / В.И. Субботин, М.Х. Ибрагимов, П.А. Ушаков [и др.]. – М.: Атомиздат, 1974. 408 с.: ил., табл. – Библиогр.: с. 381-406.