

На правах рукописи



Сугак Семен Сергеевич

**Изучение пространственно-временных структур в дозвуковых вихревых
потоках с легкими ядрами и противотоком**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань – 2016

Работа выполнена на кафедре физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Завершинский Игорь Петрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий отделом ФГБУН
«Институт космических исследований РАН»
Ерохин Николай Сергеевич

доктор технических наук, старший научный
сотрудник ФГБУН «Институт теплофизики
им. С.С. Кутателадзе СО РАН»
Наумов Игорь Владимирович

Ведущая организация: **ФГБУН «Объединенный институт
высоких температур РАН»**

Защита состоится «22» декабря 2016 года в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.081.11 при Казанском (Приволжском) федеральном университете по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18, ауд. мех. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального университета по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 35 и на сайте <http://kpfu.ru>.

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 35, диссертационный совет Д 212.081.11.

Автореферат разослан «__» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук, доцент



А.А. Саченков

Общая характеристика работы

В работе проводилось теоретическое исследование формирования пространственно-временных структур в дозвуковых вихревых потоках с легкими ядрами.

Актуальность. Изучение условий формирования и свойств пространственно-временных структур в закрученных течениях традиционно привлекает большое внимание, поскольку они оказывают значительное влияние на режимы работы ряда технических устройств. Важным частным случаем при этом являются так называемые потоки с легкими ядрами, формирующиеся, прежде всего, в системах с горением или газоразрядной плазмой, таких как авиационные двигатели, горелочные устройства, плазмодинамические системы, МГД-генераторы и т. д.

При больших степенях закрутки обычно формируются профили течения с большими радиальными градиентами аксиальной и тангенциальной скорости. Локальный нагрев, в свою очередь, формирует градиенты плотности и температуры. Возникающие скачки скорости и плотности инициируют градиентные неустойчивости. Однако устойчивость неоднородных течений по отношению к вихревым возмущениям исследована недостаточно полно. Существующие работы в этой области в большинстве своем являются экспериментальными, либо посвящены, в основном, исследованию дисперсионных свойств возмущений изолированных вихрей, а также исследованию влияния скачка плотности на границу областей абсолютной и конвективной неустойчивостей. В теоретических работах, где рассматривается устойчивость вихревых потоков с градиентами плотности, дисперсионные свойства сред исследованы лишь в частных случаях. Таким образом, существующий анализ неустойчивости закрученных потоков с градиентами плотности неполон и не дает возможность составить цельной картины условий ее возникновения в зависимости от основных управляющих параметров.

На нелинейной стадии развития градиентных неустойчивостей формируются крупномасштабные структуры, такие как прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ), центральный рециркуляционный вихрь (РВ), внешний вихрь (ВВ) и т. д. В свою очередь, нагрев может заметно изменять параметры этих структур. В этой области существует целый ряд экспериментальных исследований, в которых наиболее подробно описывается поведение ПВЯ. Отмечается, что нагрев может приводить как к подавлению ПВЯ, так и, в других конфигурациях камер сгорания, к его усилению и индуцированию нетривиальной динамики пламени. В работах, посвященных исследованию газовых разрядов в закрученных потоках, получен ряд интересных результатов, демонстрирующих существенное влияние течения на структуру плазменных областей, наличие индуцированных потоком переходов между различными типами разряда. При этом теоретические исследования влияния областей горения или разрядных областей на параметры структур в закрученных потоках, таких как ПВЯ, неполны. Справедливо и обратное – влияние структуры потока на переходы между плазменными структурами недостаточно исследовано теоретически.

Описанные выше проблемы делают **актуальной** тему диссертационного исследования, ее цель и основные задачи.

Целью диссертации является теоретическое исследование структуры и динамики вихревых газодинамических возмущений закрученных газовых течений с легкими ядрами.

В соответствии с поставленной целью определены **основные задачи диссертации**:

- Исследовать дисперсионные и диссипативные свойства возмущений малой амплитуды дозвуковых закрученных потоков с легкими ядрами в зависимости от управляющих параметров.

- Теоретически изучить динамику прецессирующих вихревых ядер, а также плазменных структур в закрученных течениях с легкими ядрами.

- Провести численное моделирование обтекания кругового цилиндра с локализованным источником тепла, движущимся вдоль поверхности цилиндра.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

- Для базового потока вида вихря Ренкина с кусочно-непрерывным аксиальным потоком и легким ядром проведен детальный анализ дисперсионных и диссипативных свойств инерционных мод и моды Кельвина-Гельмгольца в зависимости от управляющих параметров задачи.

- Найдены зависимости частоты/числа Струхаля, а также амплитуды прецессии вихревого ядра закрученного потока воздуха с нестационарным источником тепловыделения от числа Дамкелера с использованием различных моделей турбулентности при различных частотах модуляции источника и массовых расходах газа. Показан резкий рост частоты прецессии, а также падение амплитуды колебаний при приближении частоты модуляции источника к акустической резонансной частоте, что сопровождается ростом амплитуды колебаний поля давления.

- На основе аналитического и численного исследования пространственно-временной структуры закрученного потока аргона в акустическом поле с источником нагрева, моделирующим нагрев газа ВЧЕ-разрядом атмосферного давления в закрытой трубке, предложены механизмы образования спиральных структур в закрученном потоке.

- Показано, что наличие азимутально движущейся вдоль поверхности обтекаемого цилиндра области тепловыделения, приводит к нарушению симметрии обтекания, появлению ненулевой подъёмной силы и циркуляции.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Дисперсионные и диссипативные характеристики возмущений вихря Ренкина с аксиальным потоком и легким ядром в зависимости от управляющих параметров: азимутального волнового числа m , параметра крутки S , параметра скорости a , параметра плотности Q и параметра конфайнмента K .

2. Зависимости частоты/числа Струхаля и амплитуды прецессии вихревого ядра закрученных потоков с легкими ядрами в открытой трубе от числа Дамкелера при различных частотах модуляции нестационарного источника тепловыделения.

3. Предложенные по результатам аналитического и численного моделирования структуры закрученного потока аргона в акустическом поле с источником нагрева механизмы образования спиральных структур.

4. Результаты численного моделирования обтекания кругового цилиндра с локализованным источником тепла, моделирующим МГД-актуатор, в котором плазменный дуговой канал движется вдоль поверхности цилиндра под действием силы Лоренца в радиальном магнитном поле, показавшего появление ненулевой подъёмной силы и циркуляции.

Связь с государственными программами.

Работы по теме диссертации выполнялись в соответствии с планами фундаментальных научно-исследовательских работ по следующим программам: грант ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. № 14.В37.21.0767, государственного задания Минобрнауки РФ № 2.560.2011, 3.102.2014/К, грант РФФИ 13-01-97001 р_поволжье_a, программа повышения конкурентоспособности «Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета)» на 2013–2020 гг., соглашения № СИ1/10-2014, № СИ1/10-2015.

Теоретическая и практическая ценность проведенных исследований заключается в том, что их результаты могут быть использованы при проектировании систем с горением, газоразрядных камер и в других системах, где используются закрученные потоки газа в присутствии локализованных источников тепловыделения. Результаты исследования являются вкладом в развитие теории дозвуковых закрученных течений газовой среды.

Достоверность результатов основана на обоснованности принятых в механике жидкости, газа и плазмы физических и математических моделей и подтверждается сравнением с опубликованными теоретическими результатами, которые могут быть получены предельным переходом из результатов, полученных автором, а также качественным соответствием расчетных данных экспериментальным.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Всероссийской молодёжной конференции «Перспективы развития фундаментальных наук» (Долгопрудный, 2011), Международной научной школе «Нелинейные волны» (Нижний Новгород, 2012), 55-й научной конференции МФТИ (Долгопрудный, 2012), 11th–15th Workshop on magnetoplasma aerodynamics (Moscow, 2012–2016), 9th European Fluid Mechanics Conference (Rome, 2012), X Международной школе-конференции «Хаотические автоколебания и образование структур» (Саратов, 2013), 10th European Fluid Mechanics Conference (Copenhagen, 2014), 2-й Международной конференции «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность» (Москва, 2014), 2nd International Conference and Summer School “Numerical Computations: Theory and Algorithms (Pizzo Calabro, 2016), 3-й Международной научно-технической конференции «Динамика и виброакустика машин» (Самара, 2016), Euromech 581 Colloquium “Dynamics of concentrated

vortices” (Novosibirsk, 2016), 23rd International Congress of Sound and Vibration (Athens, 2016), 22nd International Congress on Acoustics (Buenos Aires, 2016).

Основные публикации. По материалам диссертации опубликована 26 печатных работ, в том числе 6 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 18 трудов Международных и Всероссийских конференций.

Авторский вклад. Все результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично, либо при его определяющем личном участии. Из работ в соавторстве на защиту выносятся результаты, в получении которых автор принимал непосредственное участие.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы (166 наименований), изложена на 128 страницах, содержит 60 рисунков.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, дан краткий обзор работ по теме исследования, показана научная новизна, теоретическая и практическая ценность полученных результатов, приводятся положения, выносимые на защиту, описана структура и приведено краткое содержание диссертации.

В первой главе проведено исследование дисперсионных свойств и классификация областей неустойчивости вихревых возмущений модельных закрученных потоков с легкими ядрами в зависимости от управляющих параметров задачи в приближении дозвукового невязкого течения.

В разделе 1.1 приведен обзор основных работ, посвященных изучению дисперсионных свойств вихревых возмущений малой амплитуды стационарных кусочно-непрерывных профилей закрученных течений с легкими ядрами.

В разделе 1.2 приведен вывод дисперсионного соотношения для вихревых мод вида $\hat{v}_{r;\varphi;z} = \hat{v}_{r;\varphi;z}(r)e^{i(kz+m\varphi-\alpha t)}$, $\hat{P} = \hat{P}(r)e^{i(kz+m\varphi-\alpha t)}$

$$S^2(1-Q) + \frac{\bar{\omega}_2^2}{k} \frac{K_m(\bar{k}) - \alpha I_m(\bar{k})}{K_m'(\bar{k}) - \alpha I_m'(\bar{k})} + Q \frac{\bar{\omega}_1^2 \bar{\beta}^2}{\Xi k^2} = 0, \quad (1)$$

где $\Xi = \bar{\beta} J_m'(\bar{\beta}) / J_m(\bar{\beta}) - 2mS / \bar{\omega}_1$, $\alpha = K_m(k\bar{k}) / I_m(k\bar{k})$, $K_m'(x) = dK_m(x) / dx|_{x=k\bar{k}}$, $\bar{k} = kR_0$, $\bar{\beta} = \beta R_0$, $\bar{\omega} = R_0 \omega / v_2$, $\bar{\omega}_1 = \bar{\omega} - mS - \bar{k}a$, $\bar{\omega}_2 = \bar{\omega} - mS - \bar{k}$.

в зависимости от управляющих параметров задачи: азимутального волнового числа m , параметра крутки $S = R_0 \Omega / v_2$, параметра скорости $a = v_1 / v_2$, параметра плотности $Q = \rho_1 / \rho_2$ и параметра конфинмента $K = R / R_0$, Ω – частота вращения потока, R – радиус трубки, R_0 – радиус вихря. v_1 , ρ_1 и v_2 , ρ_2 – скорость и плотность газа в приосевой и пристеночной областях соответственно.

В разделе 1.3 дисперсионное соотношение (1) проанализировано численно с использованием пакета Mathcad. Для верификации алгоритма расчетов было проведено сравнение результатов, полученных на основе соотношения (1) и результатов расчетов, проведенных в известных работах в отсутствие скачка плотности. Для каждого азимутального числа m существует

единственная неустойчивая мода (мода Кельвина-Гельмгольца) и бесконечное число нейтральных инерционных мод, свойства которых исследованы Саффманом, рис. 1а. Дисперсионные кривые для мод Кельвина-Гельмгольца имеют вид, характерный для волн отрицательной энергии.

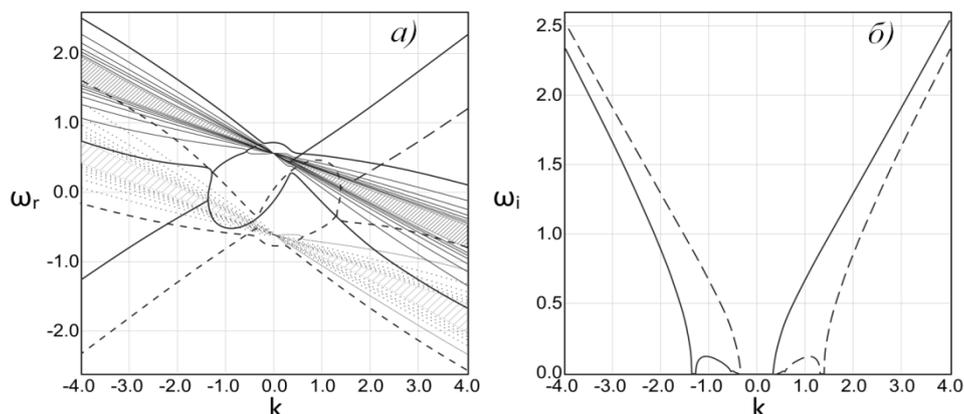


Рис. 1. Частота (а) и инкремент (б) для изгибных мод $m = +1$ (сплошные линии) и $m = -1$ (штриховые) при $a = -0.3$, $K = 2.5$, $S = 0.6$, $Q = 0.6$.

Поведение инкремента моды Кельвина-Гельмгольца в зависимости от волнового числа k различно в различных спектральных диапазонах. В сверхкритической области $k > k_c$ существует единственная неустойчивая ветвь, что соответствует известным результатам. Показано, что в докритической области $0 < k < k_c$ одна из ветвей может содержать неустойчивую подобласть $k_1 < k < k_2$, где $0 \leq k_1, k_2 \leq k_c$, рис. 2. В этой области образуются зоны неустойчивости, разделенные полосами нейтральной устойчивости, рис. 3. Эти зоны образуются благодаря резонансным взаимодействиям между неустойчивой модой и нейтрально устойчивыми волнами. Показано, что условия возникновения зон неустойчивости зависят от величины Q : для легких ядер $|Q| < 1$ при $Q < Q_c$ область неустойчивости расположена на нижней ветви, а при условии $Q > Q_c$ - на верхней ветви.

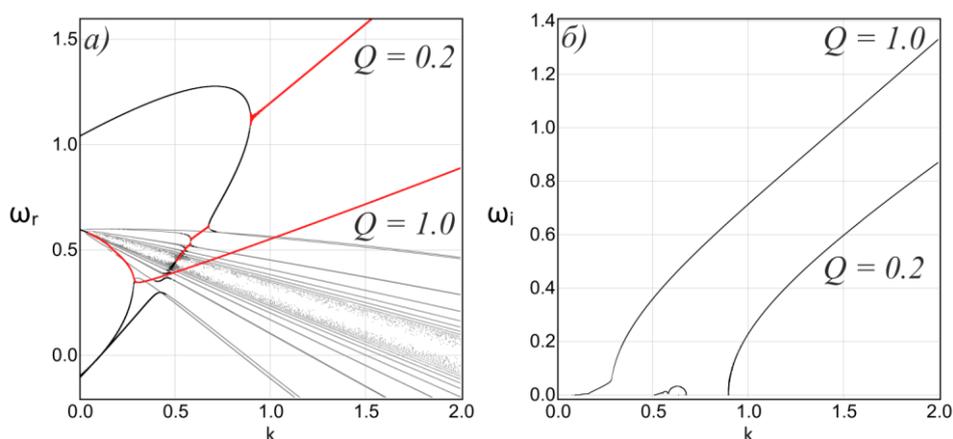


Рис. 2. Действительная ω_r (а) и мнимая ω_i (б) части частоты как функции k при различных значениях параметра плотности Q . Здесь $m = +1$, $a = -0.3$, $K = 2.5$.

Анализ показал, что наиболее неустойчивыми спиральными возмущениями являются изгибные моды $|m| = 1$, однако осесимметричная мода $m = 0$ может иметь больший инкремент, чем спиральные. Инкремент моды Кельвина-Гельмгольца увеличивается при переходе течения из зоны струи со

спутным потоком ($a > 0$) в зону течений с противотоком ($a < 0$). При этом происходит сужение области устойчивости мод Кельвина-Гельмгольца. Область нейтральных инерционных мод при этом вращается по часовой стрелке. Наличие ненулевой закрутки течения приводит к появлению области нейтральной устойчивости, причем для положительных мод закрутка имеет стабилизирующее влияние при любых значениях S , что соответствует известным результатам в соответствующей области управляющих параметров. Изменение параметра конфайнмента K слабо меняет частоту и инкремент мод.

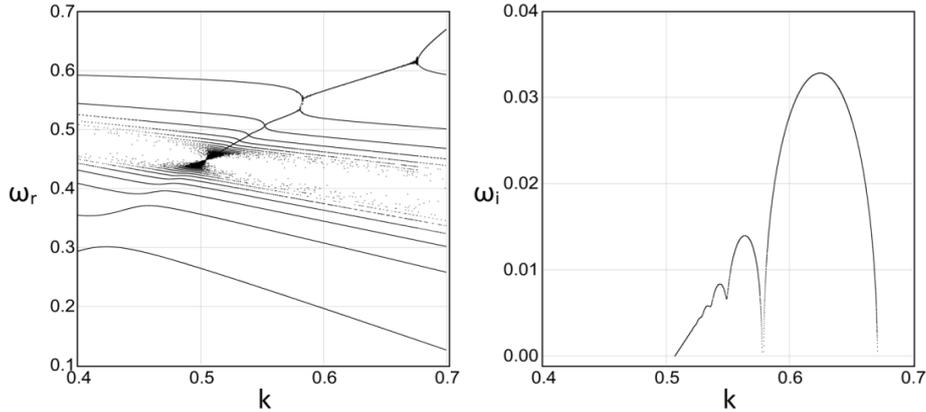


Рис. 3. Детальная структура дисперсионных кривых и инкремента в зависимости от k в области параметрической неустойчивости, $m = +1$, $S = -0.6$, $a = -0.3$, $Q = 0.2$.

Во второй главе с использованием численного моделирования исследуются явления образования пространственно-временных структур в дозвуковых газовых закрученных потоках в цилиндрических трубках круглого сечения с параксиальными источниками тепловыделения. Достоверность проверялась путем сравнения результатов расчетов с использованием различных моделей турбулентности, сравнением с результатами анализа дисперсионных свойств возмущений малой амплитуды, проведенного в главе 1 и с экспериментальными результатами.

Для расчетов использовался пакет ANSYS FLUENT в режиме нестационарного трехмерного закрученного потока и уравнение энергии с использованием RANS - модели

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0, \quad \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \right] + \Theta_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho E + P)}{\partial t} + \frac{\partial[v_i(\rho E + P)]}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\kappa + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[v_i \mu_{eff} \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \right] + N.$$

Во всех расчетах число Дамкелера менялось в диапазоне $0.1 < Da < 1$, число Рейнольдса - в диапазоне $10^3 < Re < 10^4$, а параметр крутки $S < 1.5$. Здесь E , P и T – объемная плотность энергии, давление и температура газа, Θ_i - объемная плотность внешней силы, N – объемная плотность мощности стационарного источника нагрева, c_p – теплоемкость при постоянном давлении, μ_t , μ_{eff} – коэффициенты турбулентной и эффективной вязкости, κ - коэффициент теплопроводности, Pr_t – турбулентное число Прандтля.

В разделе 2.1 приведен обзор основных работ, посвященных изучению образования пространственно-временных структур в закрученных потоках с источниками тепловыделения.

В разделе 2.2 проведена физическая и математическая постановка задачи, описана расчетная сетка и методика численного эксперимента, дан обзор свойств и условий использования моделей турбулентности.

В разделе 2.3 проведено численное моделирование закрученных потоков воздуха в трубке, открытой с одной стороны, в области параметров течения, соответствующих возникновению осевого противотока при $\Theta_i = 0$.

Геометрия трубки и завихрителя с независимыми тангенциальным и аксиальными вводами, рис. 4, соответствовали экспериментальным условиям (Климов et al, 2011). Были использованы условия прилипания и фиксированной температуры на стенках трубки. На выходе использовалось условие равенства статического давления атмосферному. Расчетная сетка состояла из гексаэдрических ячеек, около стенок была структурированной и сгущалась для минимизации влияния численной диффузии и расчёта структуры потоков с большими градиентами. Максимальное количество ячеек достигало $2.2 \cdot 10^7$.

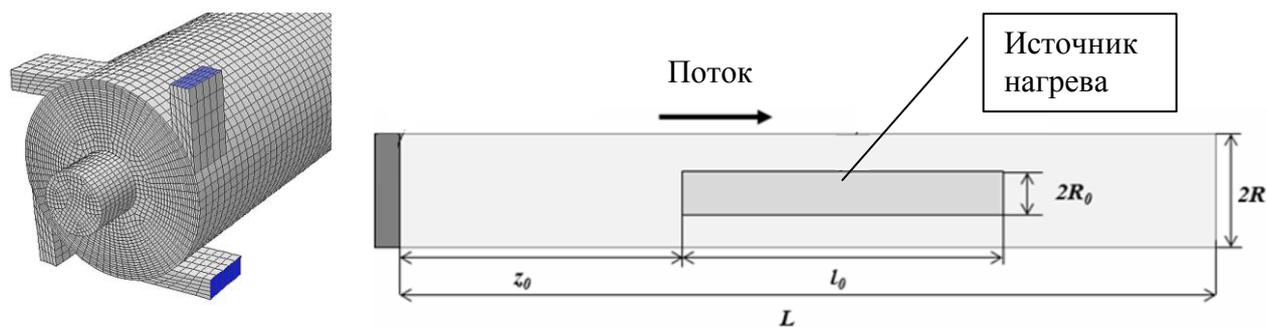


Рис. 4. Схематическая диаграмма завихрителя и трубки, использованных при численном моделировании. $L = 50$ см, $R = 1.9$ см, $l_0 = 16$ см, $R_0 = 0.5$ см, $0.2 < z_0/L < 0.6$.

Для замыкания системы (2) использовались модель турбулентности Спаларта-Аллмараса, $k-\epsilon$, $k-\omega$, SST и RSM - модели. Сравнительный анализ результатов показал, что использование $k-\epsilon$ и RSM – моделей приводит к результатам, противоречащим экспериментальным (Климов et al., 2011). Использование других моделей дает хорошее согласие с экспериментом, рис. 5.

Численный эксперимент показал, что в области значений массовых расходов, соответствующих существованию областей развитого противотока, имеет место прецессия вихревого ядра, а направление прецессии совпадает с направлением вращения базового потока, рис. 6. Получены зависимости числа Струхаля и частоты прецессии, а также амплитуды прецессии от числа Дамкелера и расположения источника. Эти зависимости для различных поперечных сечений приведены на рис. 7. Видно, что число Струхаля растет, а безразмерная амплитуда прецессии падает с ростом числа Дамкелера практически во всех сечениях по линейному закону при использовании выбранных моделей турбулентности, которые дают качественно и количественно близкие результаты.

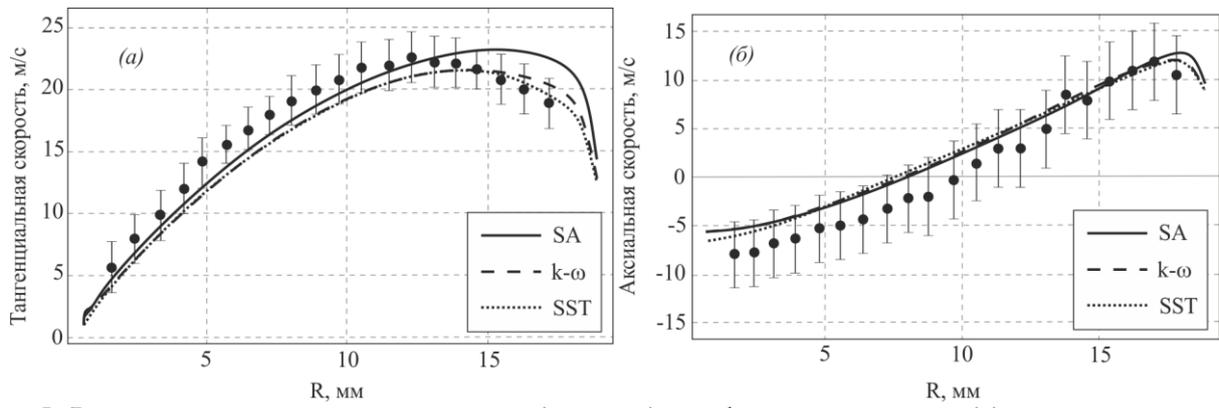


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные (кружки) профили аксиальной (а) и тангенциальной (б) скоростей в сечении $z = 45$ см. Массовый расход газа на оси трубки $m_t = 8$ г/с, через аксиальный $m_{ax} = 0$ г/с. Мощность источника нагрева $N = 700$ Вт.

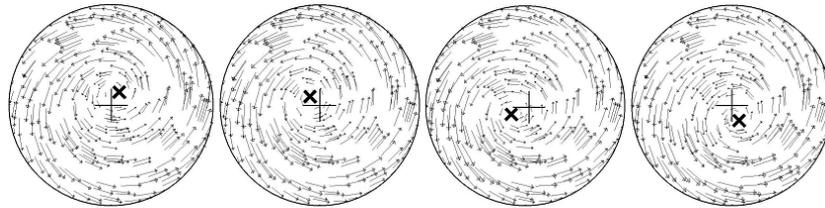


Рис. 6. Поле скоростей в фиксированном сечении $z = 11$ см в различные моменты времени. Время t возрастает слева-направо. + - положение оси трубки, × - центр вихря.

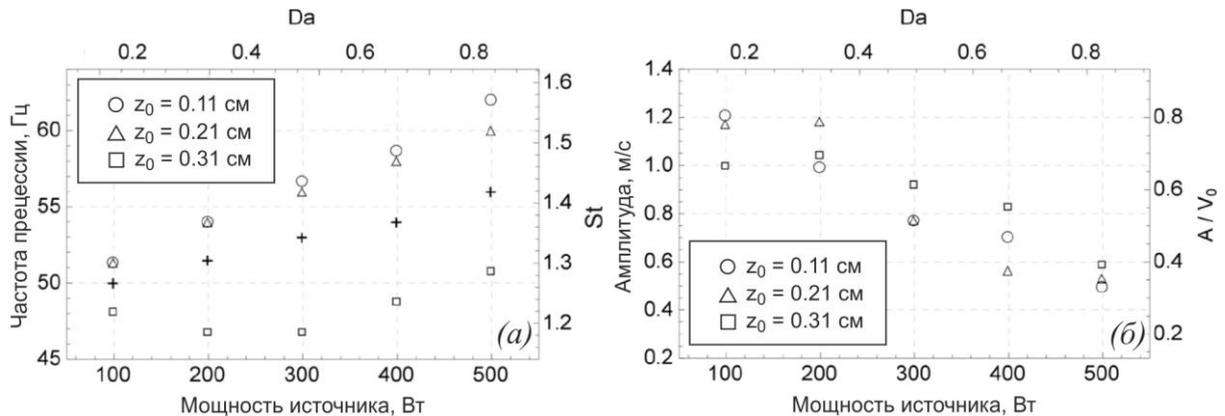


Рис. 7. Частота (а) и амплитуда (б) прецессии на оси трубки в зависимости от числа Дамкелера и расположения источника нагрева. Здесь $m_t = 2$ г/с. Крестики соответствуют результатам линейного анализа (раздел 1.3).

При малых числах Дамкелера и расположении источника в окрестности выхода число Струхаля может падать с ростом числа Дамкелера. Приведенные результаты качественно совпадают с результатами анализа линейной устойчивости, полученными в главе 1.

В разделе 2.4 исследуется структура течения и параметры ПВЯ в поле нестационарного периодического источника нагрева $N = N(r, z, t)$ и $\Theta_i = 0$ в геометрии, совпадающей с условиями раздела 2.3. Зависимости, полученные для стационарного источника, совпали с приведенными в разделе 2.3. Зависимости частоты и амплитуды ПВЯ от мощности нагрева в случаях источника с нерезонансными частотами модуляции слабо отличаются от случая стационарного источника, однако при ее совпадении с низшей резонансной частотой открытого резонатора наблюдается резкий скачок частоты прецессии и падение ее амплитуды, рис. 8.

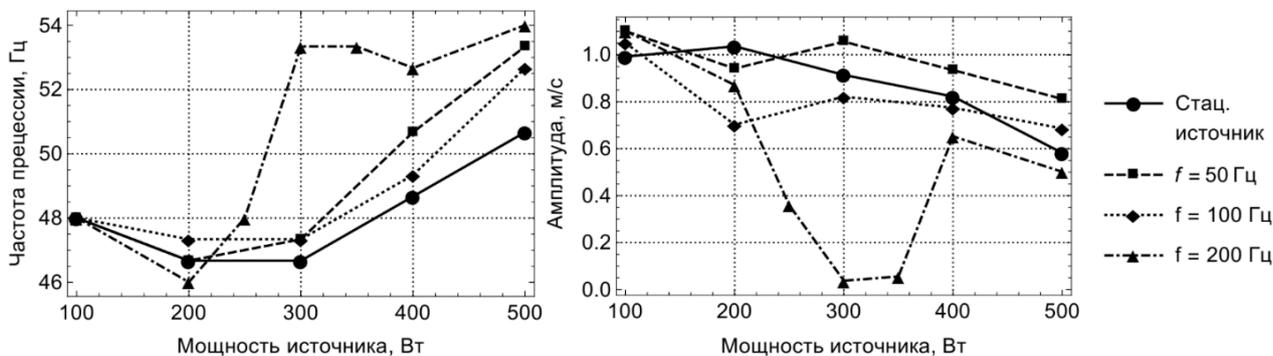


Рис. 8. Зависимости частоты и амплитуды колебаний прецессии от мощности источника для трубы длины $L = 50$ см в сечении $z = 11$ см и массовом расходе $m_t = 2$ г/с.

В разделе 2.5 рассматриваются механизмы формирования петлевых структур импульсно-периодического ВЧЕ-разряда в закрученном потоке аргона, наблюдаемых экспериментально (Климов et al., 2011) при совпадении частоты модуляции электромагнитного поля f_M , поддерживающего горение разряда, с низшей собственной акустической частотой f_S разрядной трубки.

В подразделе 2.5.1 аналитически показана возможность появления спиральных вихревых структур при резонансном трехволновом взаимодействии акустической моды с изгибными газодинамическими модами, допускаемым дисперсионным соотношением (1) и дисперсионным соотношением для акустической моды. В результате может формироваться вторичное спиральное течение. Показано, что при больших амплитудах акустической волны накачки наблюдаемые уединенные структуры имеют вид, совпадающий по форме с вихревым солитоном Хасимото.

В подразделе 2.5.2 с использованием системы (2) было проведено численное моделирование структуры течения в закрытой трубке с двумя тангенциальными входами и асимметричным отводом газа при атмосферном давлении, рис. 9. Стоячая акустическая волна, возбуждаемая разрядными импульсами, моделировалась внешней периодической силой $\Theta_z(t) = \Theta_z(t + 2\pi/f_M)$ в уравнении движения системы (2). Мощность и пространственная структура источника тепловыделения соответствовала данным (Климов et al., 2010).

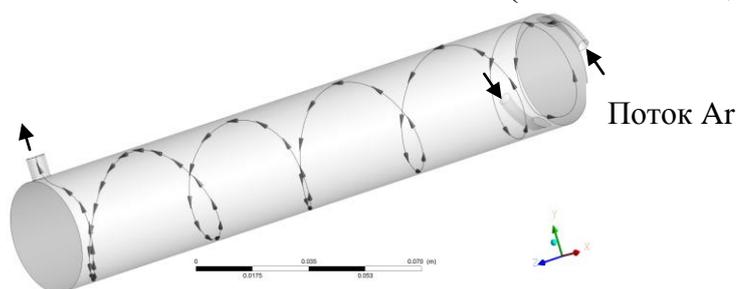


Рис. 9. Геометрия разрядной трубки.

Показано, что течение представляет собой узкую кольцевую область прямого течения вблизи стенок и зону противотока спиральной формы в приосевой зоне. Возбуждение акустической волны приводит к появлению знакопеременного продольного градиента давления ΔP (М.А Исакович, 1973). При выполнении резонансных условий $f_M = f_S$ этот градиент становится

достаточно большим, что при выполнении условия $|\Delta P| > \rho \frac{v_{ax}^2}{2}$ приводит к периодическому запиранию частиц во внутренней приосевой зоне в промежутки времени, в течение которого градиент давления направлен против течения. В результате формируется внешнее течение спиральной формы, рис. 10б). В приосевой области поток нагревается, в результате чего в области внешнего течения формируется конвективный поток тепла, имеющий спиральную структуру. При этом, если тепловой поток попадает в область, занятую разрядом, то эффект существенно усиливается и в нагретых областях происходит рост частоты ионизации, сильное падение погонного сопротивления канала и образование разрядного канала со структурой, по форме, на начальной стадии эволюции близкой к форме спирального течения. Дальнейшая эволюция этого витка определяется структурой течения, где виток спирали деформируется и принимает форму уединенной петли, что качественно совпадает с экспериментально наблюдаемой формой разряда.

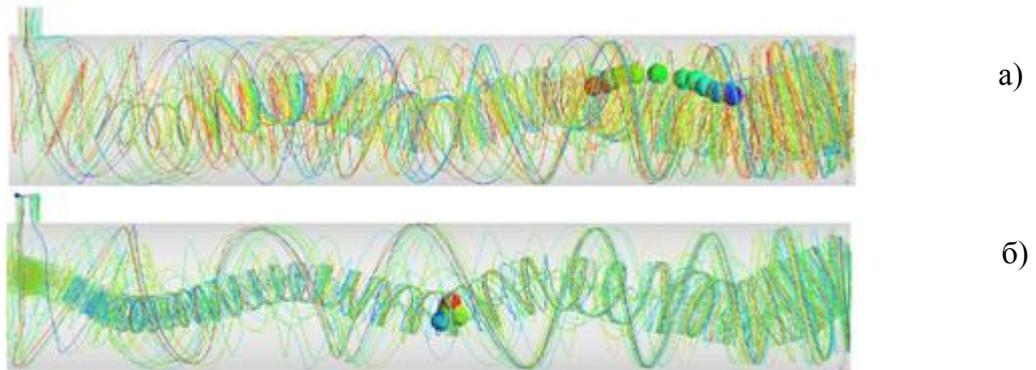


Рис. 10. Траектории модельных частиц в потоке без а) и в присутствии б) стоячей волны.

В главе 3 проведено исследование обтекания кругового цилиндра в воздухе при атмосферном давлении с источником тепловыделения, моделирующим электрическую дугу, вращающуюся во внешнем радиальном магнитном поле.

В разделе 3.1 приведен обзор основных экспериментальных и теоретических работ в рассматриваемой области.

В разделе 3.2 проведена физическая и математическая постановка задачи, проведен анализ экспериментальных данных, демонстрирующих, что включение дугового разряда приводит к появлению подъемной силы.

В разделе 3.3 для качественного объяснения наблюдаемых эффектов проведено численное моделирование процесса обтекания цилиндра с локализованным источником тепла, представляющим собой цилиндрическую область, вращающимся вокруг цилиндра с большим радиусом. В качестве базовой использовалась система (2) при $\Theta_i = 0$.

По результатам расчетов получены зависимости от времени коэффициентов подъемной силы, тангенциальной и радиальной скоростей, а также циркуляции Γ . Было показано, что наличие движущейся области тепловыделения приводит к нарушению симметрии системы, появлению подъемной силы и циркуляции. На рис. 11а) показаны полученные

теоретически и измеренные экспериментально зависимости коэффициента подъёмной силы C_L от частоты вращения ω области тепловыделения при различных числах Маха набегающего потока и фиксированной погонной мощности источника тепловыделения. Показано, что экспериментально измеренные и теоретически рассчитанные зависимости коэффициента подъёмной силы от частоты качественно согласуются друг с другом. На рис. 11б) приведены теоретические зависимости циркуляции Γ от радиуса окружности, по которой проводилось интегрирование при числе Маха $M = 0.21$.

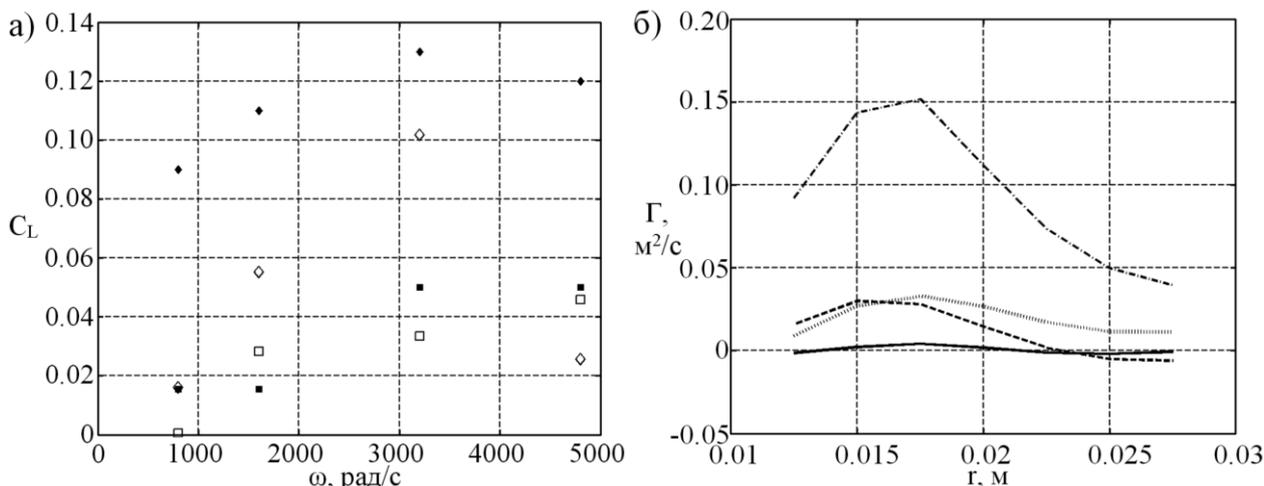


Рис. 11. а) Зависимость коэффициента подъёмной силы от частоты при числах Маха $M = 0.15$ (ромбы) и $M = 0.21$ (квадраты). Сплошные значки – эксперимент, пустые – расчет. б) Зависимость циркуляции Γ от радиуса окружности r при числе Маха $M = 0.21$. Сплошные линии – $\omega = 800$ рад/с, штриховые - $\omega = 1600$ рад/с, пунктирные - $\omega = 3200$ рад/с и штрихпунктирные - $\omega = 4800$ рад/с. Погонная мощность источника тепловыделения 100 Вт/см.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в ходе выполнения работы:

1. Проведен детальный анализ дисперсионных свойств инерционных мод и моды Кельвина-Гельмгольца для базового потока типа вихря Ренкина с дозвуковым аксиальным потоком и легким ядром $Q < 1$ в зависимости от управляющих параметров задачи: параметра крутки S , параметра скорости a , параметра плотности Q и азимутального волнового числа m . Проведено описание дисперсионных и диссипативных свойств радиально-симметричной моды и спиральных мод от управляющих параметров задачи во всем диапазоне их изменения. Показано, что в докритической области $0 < k < k_C$ одна из ветвей может содержать неустойчивую подобласть. Эта область неустойчивости имеет параметрическую природу. Проведено сравнение полученных результатов с частными случаями, рассматриваемыми ранее и экспериментальными данными.

2. Проведено численное моделирование пространственно-временной структуры дозвукового закрученного потока воздуха атмосферного давления в открытой трубке с параксиальным стационарным и нестационарным источниками тепловыделения в области существования развитого центрального противотока. Найдены зависимости частоты/числа Струхалия и амплитуды прецессии вихревого ядра от числа Дамкелера при различных частотах модуляции источника в открытой трубке и расположениях источника.

Показано, что увеличение числа Дамкелера приводит к росту числа Струхалия по закону, близкому к линейному. При малых числах Дамкелера могут существовать области падения числа Струхалия с ростом числа Дамкелера. Проведен сравнительный анализ результатов расчетов с использованием модели турбулентности Спаларта-Аллмараса, k - Ω , SST, k - ϵ и RSM – моделей. Получено, что использование k - ϵ и RSM - моделей в рассматриваемых условиях приводит к неадекватным результатам. Показано, что при совпадении частоты модуляции источника с резонансной частотой четвертьволнового резонатора происходит резкое увеличение амплитуды колебаний давления и скорости и подавление ПВЯ.

3. На основе численного и аналитического моделирования структуры закрученного потока в закрытой трубке в присутствии акустического поля предложены механизмы образования крупномасштабных вихревых структур: формирование спиральных структур при трехволновом взаимодействии акустической и изгибных мод и формирование спирального потока при периодическом запираии внутреннего противотока в акустическом поле сверхкритической амплитуды. Предложенные механизмы использованы для качественной интерпретации явления формирования плазменных петлевых структур в газовом разряде в закрученном потоке аргона при наличии резонансного источника акустических волн, генерируемых газоразрядными импульсами при амплитудно-импульсной модуляции ВЧ-источника.

4. На основе численного моделирования дозвукового обтекания цилиндра с локализованным источником тепла, моделирующим МГД-актуатор, в котором плазменный канал движется вдоль поверхности цилиндра под действием силы Лоренца в радиальном магнитном поле, показано появление ненулевой подъёмной силы и циркуляции. Найдены их зависимости от частоты вращения и от радиуса окружности. Показано, что экспериментально измеренные и теоретически рассчитанные зависимости коэффициента подъёмной силы от частоты качественно согласуются друг с другом.

Публикации по теме диссертации

В журналах из перечня ВАК

1. Сугак С.С. Взаимодействие закрученных течений с газоразрядной плазмой [Текст] / С.С. Сугак // Физическое образование в вузах. – 2012. – Т. 18. – N 4. – С.П8.

2. Завершинский, И.П. Численное моделирование прецессии вихревого ядра в присутствии локализованных источников тепловыделения [Текст] / И.П.Завершинский, Е.Я.Коган, В.Г.Макарян, Н.Е.Молевич, Д.П.Порфирьев, С.С.Сугак // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т.39. – N 7. – С.34-42.

3. Анчиков, Д.А. Устойчивость закрученных потоков с градиентом плотности [Текст] / Д.А.Анчиков, В.А.Гусев, И.П.Завершинский, В.А.Макарян, С.С.Сугак // Вестник СГАУ. – 2013. – N 2(40). – С.23-28.

4. Завершинский И.П. О формировании структур в неравновесных средах при резонансном трёхволновом взаимодействии [Текст] / И.П.Завершинский, В.С.Красноухов, Н.Е.Молевич, С.С.Сугак // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39. – N 4. – С.12-15.

5. Gorbunova, A. Precessing vortex core in a swirling wake with heat release [Текст] / A.Gorbunova, A.Klimov, N.Molevich, I.Moralev, D.Porfiriev, S.Sugak, I.Zavershinskii // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2016. – V. 59. – P.100-108.

6. Битюрин, В.А., Обтекание цилиндра с электрической дугой, вращающейся в магнитном поле [Текст] / В.А.Битюрин, И.П.Завершинский, А.И. Климов, Н.Е. Молевич, И.А. Моралев, Д. Мунхоз, Л.А. Поляков, Д.П. Порфирьев, С.С. Сугак // ТВТ. – 2016. – Т. 54. – N 4. – С.632-635.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

7. Сугак, С.С. Исследование устойчивости закрученных потоков с радиальными градиентами плотности [Текст] / С.С.Сугак // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015617644.

8. Сугак, С.С. Модуль автоматизации вычислений в Ansys Fluent [Текст] / С.С.Сугак // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015663612.

В других изданиях

9. Сугак, С.С. Исследование взаимодействия закрученных течений с газоразрядной плазмой [Текст] / С.С.Сугак // Материалы научной школы «Нелинейные волны 2012». – Нижний Новгород. – 29.02-6.03.2012. – С. 111.

10. Завершинский, И.П. Генерация акустических возмущений прецессирующим вихревым ядром в открытых трубках с локализованными источниками тепловыделения [Текст] / И.П.Завершинский, С.С.Сугак // Международный научно-технический форум, посвященный 100-летию ОАО «Кузнецов» и 70-летию СГАУ. – Самара. – 5-7.09.2012. – Т. 2. – С.23-24.

11. Майлян, М.Р. Численное исследование устойчивости вихревых потоков с локализованными источниками нагрева [Текст] / М.Р.Майлян, И.П.Завершинский, С.С.Сугак // Ibid. - С.30-31.

12. Завершинский, И.П. Исследование взаимодействия закрученных течений с газоразрядной плазмой [Текст] / И.П.Завершинский, С.С.Сугак // Труды 55-й научной конференции МФТИ. – Москва. – 2012. – С.331.

13. Makaryan, V.G. Nonstationary structure of swirling flows in an open tube channel with heat sources [Текст] / V.G.Makaryan, N.E.Molevich, D.P.Porfiriev, S.S.Sugak, I.P.Zavershinsky // Proc. 11th Workshop on magneto-plasma aerodynamics. – Moscow. – 10.04-12.04.2012. – С.65-66.

14. Zavershinsky, I.P. Precessing vortex core in a wake with counterflow in presence of heat source [Текст] / I.P.Zavershinsky, N.E.Molevich, D.P.Porfiriev, S.S.Sugak // Book of Abstracts of 9th European Fluid Mechanics Conference. – Rome. – September 9-13, 2012. – 0645_VO5.

15. Makaryan, V.G. Precessing vortex core in the variable density swirling flows [Текст] / V.G.Makaryan, N.E.Molevich, D.P.Porfiriev, S.S.Sugak, I.P.Zavershinsky // 12th Workshop on magneto-plasma aerodynamics (Abstracts). – Moscow. – 26.03-28.03.2013. – P.106-108.

16. Гусев, В.А. Индуцированные переходы между коронным и шнуровым ВЧЕ-разрядами в закрученных газовых потоках [Текст] / В.А.Гусев, И.П.Завершинский, Н.Е.Молевич, Д.П.Порфирьев, С.С.Сугак // Материалы X Международной школы-конференции «Хаотические автоколебания и образование структур» – Саратов. – 7-12.2013. – С.91.

17. Molevich, N.E. Absolute instability of variable density swirling flows [Текст] / N.E.Molevich, D.P.Porfiriev, S.S.Sugak, I.P.Zavershinskii // Book of Abstracts of 10th European Fluid Mechanics Conference. – Copenhagen. – September 14-18, 2014. – P.588.
18. Zavershinsky, I.P. Evolution of spiral modes in the swirling flows with paraxial heat sources [Текст] / I.P.Zavershinsky, N.E.Molevich, D.P.Porfiriev, S.S.Sugak // Proc. 13th Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. – 2014 – P.130-131.
19. Завершинский, И.П. Обтекание цилиндра в присутствии импульсного разряда и магнитного поля [Текст] / И.П.Завершинский, А.И.Климов, Н.Е.Молевич, Д.П.Порфирьев, С.С.Сугак // 14th Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. 2015. P. 102-103.
20. Горбунова, А.О. Солитоноподобные газоплазменные вихревые структуры в закрученном потоке аргона в присутствии ВЧЕ-разряда [Текст] / А.О.Горбунова, И.П.Завершинский, А.И.Климов, Н.Е.Молевич, С.С.Сугак // Proc. 15 Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. Abstracts. – 2016. – P.30-31.
21. Мунхоз, Д. Управление воздушным потоком вокруг цилиндрической модели с помощью вращающейся электрической дуги во внешнем магнитном поле [Текст] / Д.Мунхоз, И.П.Завершинский, А.И.Климов, Н. Е.Молевич, И.А.Моралев, Л.А.Поляков, Д.П.Порфирьев, С.С.Сугак // Материалы Международной конференции «Динамика и виброакустика машин». – Самара. – 29.06-01.07.2016. – С.234-245.
22. Gorbunova, A. Dynamics of PVC in swirling flows with heat release [Текст] / A.Gorbunova, N.Molevich, D.Porfiriev, S.Sugak, I.Zavershinskii // Euromech 581 Colloquium “Dynamics of concentrated vortices”. – 30.05-01.06.2016. – Novosibirsk, Russia. – P.197-198.
23. Gorbunova, A. Formation of plasma loop in swirling flow [Текст] / A.Gorbunova, N.Molevich, S.Sugak, I.Zavershinskii // Euromech Colloquium 581 “Dynamics of concentrated vortices”. – 30.05-01.06.2016. – Novosibirsk, Russia. – P.199-200.
24. Gorbunova, A. Numerical simulation of precessing vortex core dumping by localized nonstationary heat source [Текст] / D.Porfiriev, A.Gorbunova, I.Zavershinskii S.Sugak, N.Molevich // Book of Abstracts of the 2nd International Conference and Summer School “Numerical Computations: Theory and Algorithms” - Pizzo Calabro, Italy. - 19–25.06.2016. - P. 144.
25. Gorbunova, A. Hasimoto soliton on vortex cores in acoustic field [Текст] / A.Gorbunova, N.Molevich, S.Sugak, I.Zavershinskii // Proc. 23rd International Congress of Sound and Vibration. – Athens, Greece – 10-14.07.2016. – P.2134-2138.
26. Gogbunova, A.O. Acoustically induced transitions of CHFD discharge in swirl flow [Текст] / А.О.Гогбунова, Н.Е.Молевич, С.С.Сугак, А.И.Климов, И.П.Завершинский // Proc. 22nd International Congress on Acoustics. – Buenos Aires, Argentina. – September 5-9. 2016. – P.124-127.