На правах рукописи
УДК 533.6

СТРИЖАК СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И УСЛОВИЙ ПАССИВНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОДВИЖНОГО ЗОНДА В ЗАКРУЧЕННОМ, ОГРАНИЧЕННО-ПРОСТРАНСТВЕННОМ ДОЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ГАЗА

Специальность 05.07.01 – Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Калугин Владимир Тимофеевич, факультет СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, декан

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Вышинский Виктор Викторович, ФАЛТ МФТИ, декан

доктор технических наук, профессор Ципенко Владимир Григорьевич, МГТУ ГА, заведующий кафедрой АКПЛА

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Защита состоится «____» _____ 2012 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета ДС 212.008.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105007, г. Москва, Госпитальный пер., д.10, факультет Специального машиностроения МГТУ им. Н. Э. Баумана.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «___»_____2012 г.

Ваш отзыв в одном экземпляре, заверенный гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета ДС 212.008.01.

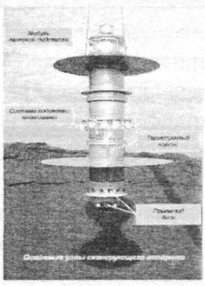
Ученый секретарь диссертационного совета, д.т.н., профессор Калугин В.Т.

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
2011393
Стрижак С.В.Определение ра

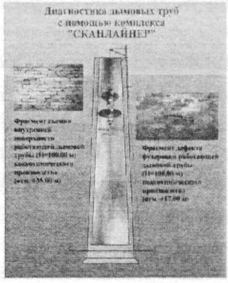
-394

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В начале 2000-х годов в организации ООО «ЦИЭКС» под руководством д.т.н. Сущева С.П. проводились работы по разработке опытной конструкции диагностического комплекса «Сканлайнер» для обследования внутренней поверхности дымовых и вентиляционных труб (рис. 1). Было создано несколько прототипов зондов, которые должны были работать при наличии восходящих высокотемпературных агрессивных дымовых газов. Экспериментальным путем была подобрана оптимальная аэродинамическая компоновка. В результате было предложено использовать два дисковых стабилизатора в качестве пассивной системы стабилизации. За короткий срок был изготовлен опытный образец диагностического комплекса «Сканлайнер», который успешно использовался для обследования различных промышленных дымовых труб. Таким образом, со стороны практикующих специалистов возник запрос на разработку различного класса диагностических аппаратов и зондов. Компоновка таких диагностических аппаратов и зондов могла включать в себя цилиндрический корпус, модуль сбора информации с видеокамерами, затупленную головную часть и стабилизирующие устройства (СУ), расположенные на боковой поверхности корпуса. Амплитуда колебаний комплекса «Сканлайнер» при спуске на тросе не должна была превышать 10 градусов и угловая скорость вращения не должна была быть более 5.6 об/мин, иначе происходило искажение изображения во время съемки поверхности дымовой трубы. Впоследствии разработчиками отмечалось, что в процессе эксплуатации на промышленных предприятиях РФ и СНГ возникали нежелательные режимы работы аппарата в закрученном потоке газа, приводящие к его сильной раскачке.



а)



б)

Рис. 1. Комплекс «Сканлайнер»: а) – основные компоненты;
б) - диагностика дымовых труб с использованием комплекса

В ходе выполнения поисковых работ не были полностью получены аэродинамические характеристики (АДХ) исследуемого тела. Также отсутствовали расчетные методики. Поэтому возникла необходимость решения научно-технической задачи по разработке конструктивной схемы системы стабилизации, повышению ее эффективности и определению АДХ зонда в закрученном вязком потоке газа применительно к созданию зондов последующих поколений.

МГТУ
им. Н.Э. Баумана
Библиотека

В связи с этим изучение дозвукового обтекания цилиндрических тел, систематизация структур течения, выработка рекомендаций по массогабаритным параметрам для различных зондов, работающих в ограниченном пространстве, в том числе для диагностического комплекса «Сканлайнер», создание научной методики расчета параметров обтекания и АДХ, представляется возможным считать актуальной задачей.

Целью работы являлось повышение эффективности функционирования зондов рассматриваемого класса путем разработки и выбора рациональных параметров и аэродинамической компоновки на основе совершенствования использования выбранной научной методики и повышения достоверности определения АДХ подвижного зонда при отрывных режимах в закрученном дозвуковом потоке вязкого газа.

Задачи исследования. В диссертации поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка аэродинамической системы стабилизации зонда.
2. Проведение комплекса экспериментальных аэродинамических исследований, включающих весовой и визуализационный эксперименты в различных установках с использованием специально созданных моделей, позволяющих варьировать геометрию рассматриваемого тела.
3. Анализ результатов экспериментальных исследований, определение физических структур, возникающих при дозвуковом обтекании СУ, выявление влияния геометрических параметров модели зонда на аэродинамические характеристики и выработка рекомендаций по выбору компоновок.
4. Создание программно-алгоритмического обеспечения численного моделирования пространственного обтекания зонда с дисковыми стабилизаторами в дозвуковым закрученном потоке газа, проведение параметрических исследований.
5. Выработка рекомендаций по массогабаритным характеристикам зонда.
6. Разработка модели динамики зонда в свободном и возмущенном потоке газа с целью определения максимальной амплитуды колебаний.

Объектом исследования являлся зонд, находящийся в ограниченном рабочем пространстве при наличии закрученного турбулентного потока газа.

Методы исследования. В работе использованы методы экспериментальной аэродинамики, предусматривающие визуализацию течений, проведение весовых экспериментов; методы математического моделирования обтекания цилиндрических тел с различными СУ на основе решения вязкой нестационарной задачи пространственного обтекания тел вращения с использованием метода конечного объема.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность результатов обеспечивается приемлемой точностью при проведении экспериментальных исследований, согласованием результатов расчета локальных и интегральных характеристик с результатами экспериментов автора и данными, полученными при проведении физических испытаний в ЦАГИ им. Н.Е Жуковского, ФГУП ЦНИИмаш, Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова и других организа-

циях, а также последовательным использованием при построении математических моделей обтекания зонда основных уравнений аэрогазодинамики, которые являются выражением фундаментальных законов сохранения массы, количества движения и энергии, корректностью выбора исходных ограничений и допущений.

Научная новизна. В диссертации разработаны теоретические основы аэродинамического проектирования зондов. Получены и выявлены основные структуры течений, установлены закономерности их изменений в зависимости от геометрии изучаемой компоновки. Определено влияние геометрических параметров модели зонда на АДХ и установлено, при каких значениях параметров наблюдается перестройка структуры течения, приводящая к срыву потока и образованию рециркуляционных зон в форме тороидальных вихрей. Создана методика численного моделирования обтекания зонда при малых дозвуковых скоростях обтекания, позволяющая определять параметры сложных, в том числе отрывных течений, с достаточной для инженерной практики точностью в широких диапазонах определяющих параметров.

Практическая значимость диссертации заключается в разработке систем стабилизации, алгоритмов расчета и прикладных программ, которые позволяют проводить математическое моделирование дозвукового пространственного обтекания аппарата со стабилизирующими устройствами. Кроме того, получен большой объем экспериментальных данных по аэродинамическим характеристикам цилиндрических аппаратов с различными дисковыми стабилизаторами и выработаны рекомендации по выбору конструктивных параметров компоновок и особенностям исполнения СУ, функционирующих в условиях закрученного потока и возможного отрыва потока. Даны рекомендации по выбору массогабаритных характеристик. Для создания математической модели использовалось свободное программное обеспечение: пакеты Salome, OpenFOAM, Paraview. Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, используются в учебном процессе кафедры СМ3 МГТУ им. Н. Э. Баумана, а также явились составной частью госбюджетной НИР «Проведение исследований и создание научно-технического задела по созданию вычислительной платформы с набором средств разработки (API) для проведения автоматизированных инженерных расчетов больших задач аэрогидродинамики на суперкомпьютерах петафлопного класса» в 2011-2012.

На защиту выносятся названные методики и перечисленные результаты.

1. Результаты выбора системы аэродинамической стабилизации.
2. Результаты экспериментальных исследований обтекания стабилизирующих устройств зондов дозвуковым турбулентным потоком.
3. Методика и алгоритм расчета аэродинамических характеристик органов управления зонда, результаты математического моделирования и параметрических исследований.
4. Рекомендации по выбору конструкционных параметров компоновки зонда в закрученном дозвуковом потоке газа.
5. Анализ амплитуды колебания зонда по углу атаки.

Личный вклад автора состоит в разработке методик аэродинамических испытаний, расчетных методик, анализе и обобщении полученных результатов.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на конференциях: Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (г. Калуга, 2005; г. Санкт-Петербург, 2007; г. Жуковский, 2009); XVII Международная Интернет-конференция молодых ученых и студентов по современным проблем машиноведения (г. Москва, 2005); Школа – семинар «Современные проблемы аэрогидродинамики», (г. Туапсе, 2005,2006,2007); Международная научно-техническая конференция «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества» (г. Москва, 2006, 2007); Российская Национальная конференция по теплообмену (г. Москва, 2006 и 2010); Международная научная конференция «Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы механики» (г. Москва, 2007); Школа-семинар «Аэродинамика летательных аппаратов» (п. Володарского, 2008 и 2010); Научно-техническая конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов «Будущее авиационной науки» (г. Жуковский, 2008); Международная научная конференция ПАВТ (г. Нижний Новгород, 2009); Всероссийская научно-техническая конференция «Фундаментальные основы баллистического проектирования» (г. Санкт-Петербург, 2010 и 2012); Всероссийская конференция «Свободное программное обеспечение-2010» (г. Санкт-Петербург, 2010); XXXVI Академические Чтения по космонавтике (г. Москва, 2012).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 25 научных работах, в том числе 5 научных статьях перечня ВАК [1-5] и 20 тезисах докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов и приложения, содержит 236 страниц текста, 150 рисунков, 29 таблиц. Библиография включает 180 работ.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

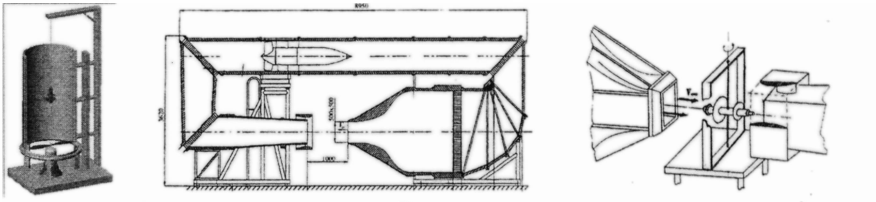
Во введении проведен обзор литературы по теме исследования, обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту. Приведены данные о структуре и объеме диссертационной работы.

Первая глава носит обзорно-аналитический характер. В данной главе проводится обзор работ по изучению отрывного обтекания различных аппаратов, аэродинамике плохообтекаемых тел, изучению устойчивости аппаратов, использованию различных органов управления для аэродинамической стабилизации, изучению различных тел в закрученном потоке газа. В главе сделан акцент на работы по аэродинамике тел с дисковыми надстройками, в том числе с проницаемыми дисками, с целью их стабилизации и снижения сопротивления (Бон М., Морель Т., Чжен П., Koenig K., Roschko A., Краснов Н.Ф., Белов И.А., Исаев С.А., Гувернюк С.В., Бобышев В.К., Синявин А.А.). Выполнен обзор работ по динамике тела, закрепленного на тросе (Ишлинский А.Ю., Рябинин А.Н.

и др.), по анализу устойчивости аппаратов в потоке, по численному моделированию процессов дозвукового отрывного обтекания различных летательных аппаратов (Белоцерковский С.М., Стрелец М.Х., Вышинский В.В. и др.).

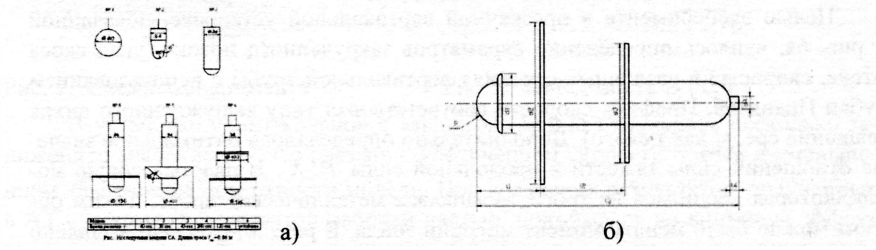
Вторая глава посвящена экспериментальному моделированию. Целью эксперимента являлся выбор оптимальной формы зонда, удовлетворяющей условию статической и динамической устойчивости, а также определение основных АДХ. Экспериментальные исследования по выбору формы зонда проводились на следующих установках: вертикальная труба-воздуходувка, дозвуковая аэродинамическая труба (АТ), динамическая установка свободных колебаний, установка «винт-кольцо». Проведен анализ точности измерений.

Для создания закрученного потока и выбора оптимальной компоновки зонда использовались вертикальные установки (рис. 2а и 6а). Поток с требуемыми характеристиками создавался с помощью электродвигателя и воздушного винта в ограниченном пространстве трубы. В ходе эксперимента рассматривались различные экспериментальные модели зондов, представленные на рис. 3а. Модели зондов закреплялись на тросе. По результатам эксперимента была выбрана модель № 6, показанная на рис. 3а. Для данной модели не возникало раскачки в ходе эксперимента при наличии закрученного потока, в то время, как другие модели были подвержены раскачке. На основе выбранной модели была изготовлена экспериментальная модель для испытаний в АТ. Целью эксперимента в установке свободного потока являлось определение АДХ зонда при различных режимах обтекания (скорость, угол атаки), а также определение демпфирующих свойств модели в дозвуковой АТ Т-500 МГТУ им. Н.Э. Баумана (рис. 2б и 2в).



а) б) в)

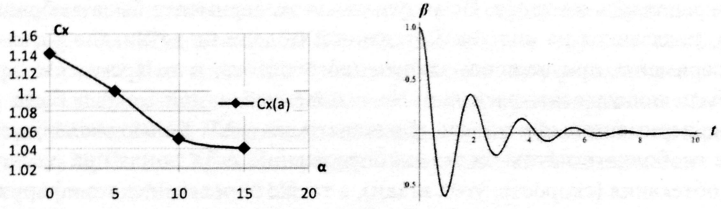
Рис. 2. Экспериментальные установки: а) – вертикальная воздуходувка; б) - дозвуковая АТ Т-500; в) – динамическая установка свободных колебаний



а) б)

Рис. 3. Экспериментальные модели: а) – различные модели; б) - аэродинамическая модель для трубных испытаний

В ходе эксперимента в аэродинамической трубе для различных значений V_∞=22...30 м/с, Re=(2...8)×10^5 были получены зависимости коэффициента продольной силы $c_x(\alpha)$ при изменении угла атаки (рис. 4а) и взаимного расположения дисков на исследуемой модели. Значения коэффициентов нормальной силы $c_y(\alpha)$ и момента тангажа $m_z(\alpha)$ были близки к нулю. В установке свободных колебаний модель отклонялась на угол в 10-30 градусов. Процесс колебаний модели регистрировался на видеокамеру. Зависимость угла скольжения от времени $\beta(t)$ при отклонении модели представляла собой затухающий колебательный процесс (рис. 4б). Дополнительно в потоке создавалось возмущение с помощью винта для создания закрутки потока. Также проводились исследования по изучению структуры обтекания в АТ с помощью метода шелковинок. Для регистрации течения использовалась видеокамера. В результате были выявлены нестационарные режимы обтекания модели с образованием крупномасштабных вихревых структур за дисками (рис. 5).



а) б)

Рис. 4. Зависимости: а) - $c_x(\alpha)$; б) - $\beta(t)$

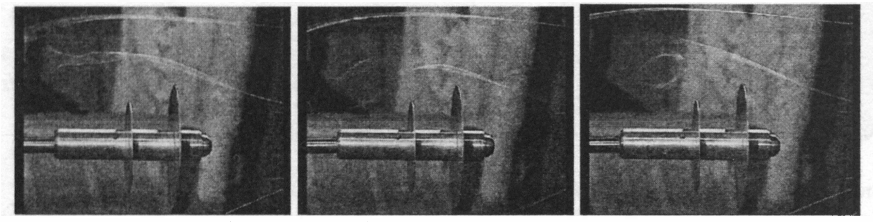
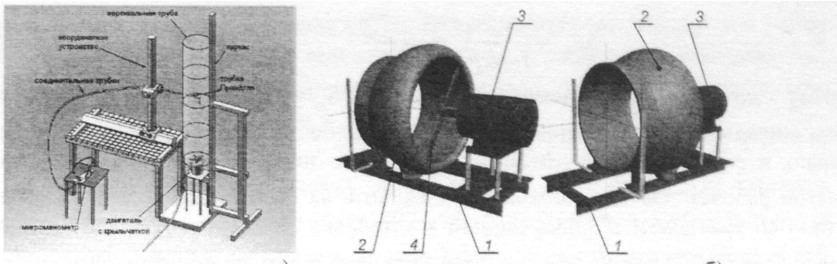


Рис. 5. Структуры обтекания в различные моменты времени

Целью эксперимента в прозрачной вертикальной установке, показанной на рис. 6а, явилось определение параметров закрученного потока (угол скоса потока, скорость) в различных сечениях вертикальной трубы с использованием трубки Прандтля. Профиль скорости соответствовал типу вынужденного вихря (вращение среды как целого). Дополнительно определялось оптимальное значение отношений силы тяжести и продольной силы P/X. В пластмассовую модель, которая крепилась на тросе, засыпалась металлическая дробь. Таким образом можно было менять момент инерции зонда. В результате было выявлено рациональное соотношение $P/X \geq 10$, при котором модель зонда была устойчива в ограниченном восходящем закрученном потоке газа.



а) б)

Рис. 6. Экспериментальные установки: а) - вертикальная воздуходувка; б) - «винт-кольцо»

Для создания горизонтального закрученного потока использовалась установка «винт-кольцо», в состав которой входили корпус основания 1, профилированное кольцо 2, электродвигатель 3 с двухлопастным винтом 4 (рис. 6б). Целью данного эксперимента было получение экспериментальных зависимостей $c_x(L_k,\alpha), m_z(L_k,\alpha)$ в дозвуковом закрученном потоке. Модель закреплялась на специальной державке, которая устанавливалась на тензометрических весах. Тарировка весов проводилась нагружением по каналам X, Y и M_z известной силой и моментом. Для нахождения осредненной скорости и аэродинамических коэффициентов использовался критерий осреднения потока – равенство полных импульсов (Черный Г.Г., Абрамович Г.Н.). Значения углов атаки выбирались равными 0,3,6,8,10°. Дополнительно осуществлялось перемещение модели вдоль оси установки «винт-кольцо» на расстояние L_k=0-0.25 м с шагом 0.05 м (рис. 7). В результате расчета осредненная скорость потока была равна V_{cp}=25.6 м/с. Получены зависимости $c_x(L_k)$, которые представлены на рис. 8. В исследуемом диапазоне углов атаки коэффициент $m_z(L_k,\alpha)$ был равен нулю.

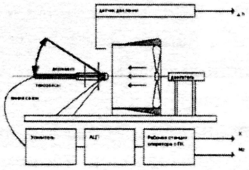


Рис. 7. Схема эксперимента

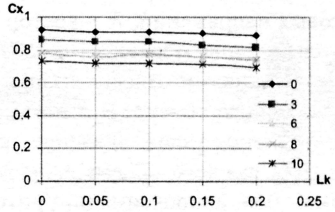


Рис. 8. Зависимость $c_x(L_k)$

В установке «винт-кольцо» с закрытой частью получалось несколько заниженное значение c_x. Это связано с увеличением скорости потока и уменьшением давления на поверхности модели. При сравнении результатов, полученных в АТ с открытой и закрытой рабочей частью, принимался во внимание эффект загромождения потока; использовалась формула для поправки значения коэффициента продольной силы для составляющей сил поверхностного давления (Koenig K., Roschko A.):

$$\Delta c_{xp} = \frac{\alpha_b}{1-\alpha_b};\ \ \alpha_b = \frac{S_M}{S_T}, \qquad (1)$$

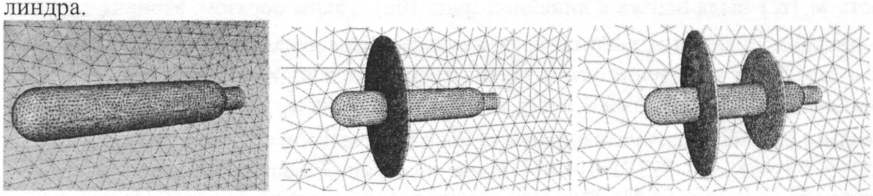
где α_b - коэффициент загромождения потока; S_M - площадь модели, S_T - рабочая площадь трубы. Значение поправки для составляющей сил трения незначительно, и его можно не учитывать. Полученное значение c_x в установке с закрытой рабочей частью необходимо увеличить на величину поправки по сравнению со значением c_x, полученным в установке с открытой рабочей частью. Для случая эксплуатации зонда в промышленной трубе также необходимо пересчитывать значения c_x. По результатам эксперимента выбрана оптимальная аэродинамическая компоновка в форме цилиндра с двумя дисками и получены экспериментальные зависимости АДХ.

Третья глава посвящена математическому моделированию дозвуковых течений. Приведено описание пакета OpenFOAM и его возможностей. Расчеты проводились средствами пакета OpenFOAM 1.6-2.1, использовался решатель pisoFoam. Математическая модель в pisoFoam основана на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, которые замыкаются с помощью какой-либо модели турбулентности. Обобщенное уравнение, отражающее законы сохранения и модель турбулентности, в интегральной форме записывалось в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{\Omega}\rho\phi\,\mathrm{d}\Omega + \int_{S}\rho\phi\vec{V}\cdot\vec{n}\,\mathrm{d}S = \int_{S}\Gamma\ grad\phi\cdot\vec{n}\,\mathrm{d}S + \int_{\Omega}q_{\phi}\,\mathrm{d}\Omega\ , \qquad (2)$$

где ϕ - обобщенная переменная $\phi = \{1,u,\upsilon,w,k,\omega,h,R\}$, ρ - плотность, u,υ,w - составляющие скорости вдоль осей 0x,0y,0z, h – энтальпия; Ω - конечный объем, $\vec{V}$ - вектор скорости, dS - дифференциальный элемент площади, Г - коэффициенты переноса, q_{ϕ} - источниковый член, k - турбулентная кинетическая энергия, ω - удельная скорость диссипации турбулентной энергии, R - тензор рейнольдсовых напряжений, $\vec{n}$ – вектор нормали. В качестве модели турбулентности использовались модели $k-\omega$ *SST* Ментера и Спаларта-Аллмараса с пристеночными функциями. Дискретизация уравнений в OpenFOAM проводилась методом конечного объема. В данном подходе использовалась совмещенная схема расположения узлов. Значения скоростей и давления вычислялись в центрах ячеек. Для каждого объема записывались законы сохранения в интегральной форме. Для аппроксимации интегралов использовалась теорема о среднем. В качестве среднего значения по объему принималось значение в центре ячейки, а в качестве среднего значения на грани – значение в центре грани. Для нахождения значений в центре грани ячеек использовалась линейная интерполяция. Расчетная схема имела второй порядок точности по времени и пространству. На границах выбирались условия продолжения решения. Для расчета скоростей и давления использовался итерационный метод PISO с поправкой Рхи-Чоу. После дискретизации уравнений получались системы линейных алгебраических уравнений, которые решались итерационными методами сопряженных и бисопряженных градиентов PCG, PBiCG с предобуславливателем. Рас-

четный шаг по времени был равен 10^{-4} с. Общее время счета составляло 1-2 секунды. Значения невязок для величин $u,k,e,\omega,R,\tilde{\nu}$ задавались равными 10^{-5}. Для поправки давления значение невязки выбиралось 10^{-6}. В ходе расчета проводился анализ значения $y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu}$, где u_τ - динамическая скорость, y - расстояние от ближайшего центра ячейки до стенки, ν - кинематическая вязкость. Среднее значение y^+ не превышало 100, что удовлетворяло требованиям для пристеночной функции выбранной модели турбулентности. Для апробации математической модели был рассмотрен пример обтекания обратного уступа, а также затупленного цилиндра с удлинением 6. Расчетная область для затупленного цилиндра представляла собой цилиндр, в центре которого находилось исследуемое тело. Внешние границы расчетной области выбирались достаточно далеко от зон возмущения потока. Границы расчетной области удалены от «носка» исследуемого тела на 10 калибров вверх и вниз по потоку, диаметр расчетной области равен 10 калибрам. Расчеты были выполнены для числа Рейнольдса $\mathrm{Re} = 2.0 \times 10^5$, которое соответствовало условиям эксперимента, проведенного в дозвуковой аэродинамической трубе (Горлин С.М., Девнин С.И., Петров К.П.). Скорость набегающего потока равна V_∞=25 м/с, интенсивность турбулентности 1%. Для цилиндра были вычислены АДХ и построены графики их зависимостей от угла атаки в диапазоне от 0 до 10 градусов. Коэффициент m_z рассчитывался относительно точки подвеса модели на тросе. В результате число тетраэдральных ячеек для цилиндрического тела составило около 820 тысяч (рис. 9а). Полученные АДХ показали, что цилиндрическое тело являлось неустойчивым в потоке относительно точки подвеса. При возрастании угла атаки увеличивалось значение коэффициента m_z. На рис. 10а показаны зависимости коэффициентов нормальной силы $c_y(\alpha)$ и момента тангажа $m_z(\alpha)$ для цилиндра.



а) б) в)

Рис. 9. Расчетные модели зондов: а) – цилиндр; б) - цилиндр с одним диском; в) – цилиндр с двумя дисками

Четвертая глава посвящена расчету обтекания зонда в свободном и ограниченном пространстве при наличии закрученного потока вязкого газа, а также параметрическим исследованиям. В работе проведены расчеты для различных тел: цилиндр с одним диском, цилиндр с двумя дисками (рис.9 б,в). При определении АДХ в качестве характерной площади была выбрана площадь первого диска с диаметром D_1, за характерную длину принято значение длины модели l. Полученные АДХ показали, что данные цилиндрические тела являлись ус-

тойчивыми в потоке относительно точки подвеса. При увеличении угла атаки уменьшались значения коэффициента момента тангажа (рис. 10б и 10в).

Для случая цилиндра с одним диском оказалось, что зависимость коэффициента момента тангажа $m_z(\alpha)$ меняла свой знак на противоположный по сравнению со случаем обтекания для цилиндра (рис. 10б). В диапазоне углов от 0 до 3 градусов значение $m_z(\alpha)$ было близко к нулю. Таким образом, для исследуемого тела стабилизирующий момент отсутствовал. Зависимость $m_z(\alpha)$ была близка к параболической зависимости.

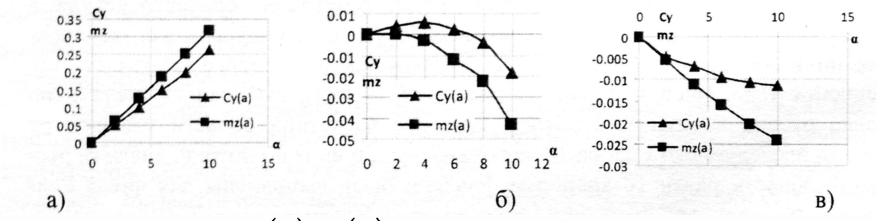
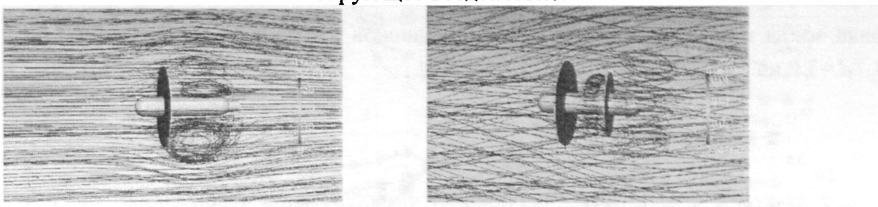


Рис. 10. Зависимости $c_y(\alpha), m_z(\alpha)$: а) – цилиндр, б) - цилиндр с одним диском; в) - цилиндр с двумя дисками

При наличии небольшого возмущения в случае закрутки потока возможна раскачка тела на тросе, которая может приводить к возрастанию амплитуды колебаний, превышающей допустимое значение в 10 градусов. Данное явление наблюдалось в эксперименте, проведенном в вертикальной воздуходувке. При дальнейшем увеличении угла атаки возникал стабилизирующий момент. Таким образом, можно констатировать, что цилиндр с одним диском-стабилизатором условно устойчив в потоке при увеличении угла атаки. В отличие от цилиндра с одним диском, компоновка зонда в форме цилиндра с двумя дисками была устойчива в диапазоне углов атаки от 0 до 10 градусов, при которой зависимость $m_z(\alpha)$ была близка к линейной (рис. 10в). Таким образом, вариант с двумя дисками предпочтителен по сравнению с одним диском-стабилизатором во всем диапазоне изменения углов атаки. Дополнительно были проведены исследования по влиянию размера ячеек сетки на значения c_x для цилиндра с двумя дисками. Рассматривались варианты сеток с количеством тетраэдральных ячеек: 315739, 451478, 971 823, 1 014 674. Влияние сетки оказалось незначительным и находилось в пределах 8%. В дальнейшем расчеты выполнялись только для сетки с 451 478 ячейками. На рис. 11 представлены пространственные линии тока, соответствующие обтеканию тел с одним и двумя дисками. Между дисками и в донной области формируются крупные тороидальные вихри. Данные вихри оказывают стабилизирующее воздействие на положение тела. В результате зонд двигался в «отрывном пузыре». Получены зависимости распределения давления c_p по поверхности и длине цилиндра с двумя дисками. На переднем диске давление существенно возрастало, в то время как на заднем диске давление падало. Аэродинамическая сила Y была направлена вниз. В результате создавался стабилизирующий момент относительно точки подвеса и возникало дополни-

тельное усилие, направленное вверх по потоку. Результирующая аэродинамическая сила оказывала стабилизирующее воздействие.

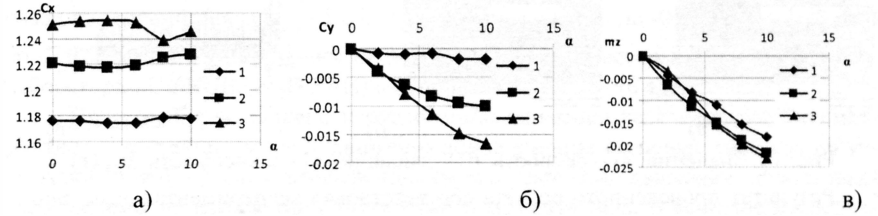


а) б)

Рис. 11. Результаты расчета обтекания зондов с линиями тока: а) - цилиндр с одним диском; б) - цилиндр с двумя дисками

Дополнительно рассматривался метод моделирования крупных вихрей (LES) с одним дифференциальным уравнением для подсеточной кинетической энергии. Для задания граничных условий на входе использовался метод случайных возмущений. В результате расчета получено нестационарное поле для турбулентной вязкости, среднеквадратические значения пульсаций U', p'.

С целью определения оптимальной компоновки были проведены параметрические исследования. В ходе исследования изменялось взаимное расположение дисков на цилиндре. Первый диск располагался, как показано на рис. 9в. Рассматривалось три различных варианта расположения второго диска. Максимальное значение c_x=1.25 получено для случая, когда диски находились на максимальном расстоянии относительно друг друга. Минимальное значение c_x=1.18 получено для случая, когда диски находились на минимальном расстоянии (рис. 12а). На рис. 12в показана зависимость $m_z(\alpha)$ для различных исследуемых тел. Определено, что максимальное значение $m_z(\alpha)$ по модулю получено для случая, когда диски находились на максимальном расстоянии.



а) б) в)

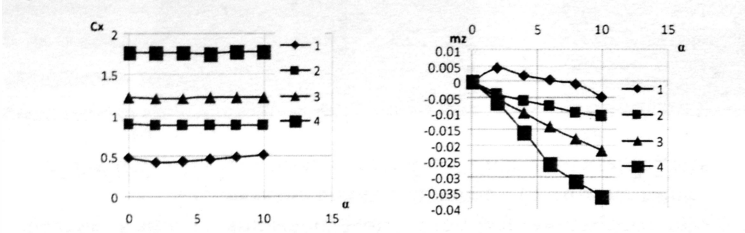
Рис. 12. Зависимости: а) - $c_x(\alpha)$; б) - $c_y(\alpha)$ в) - $m_z(\alpha)$,

где L_d / d = 0.04 / 0.034 (1); L_d / d = 0.07 / 0.034 (2); L_d / d = 0.092 / 0.034 (3)

L_d –расстояние между дисками, d – диаметр основного цилиндра

Выполнено сравнение по распределению поперечной и продольной компоненты скорости. АДХ сравнивались с экспериментальными данными. Различие составило 6 %. Построены пространственные линии тока и распределение турбулентной вязкости, которое являлось самым точным индикатором интенсивного вихреобразования. Были проведены параметрические исследования по влиянию геометрии дисков. Проводились расчеты при изменении диаметра

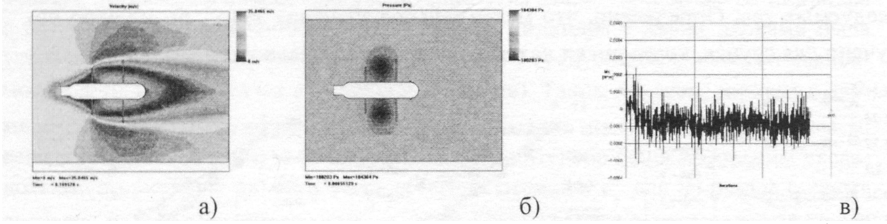
первого диска D_1/d = 4.0 (1); 4.7 (2); 3.5 (3); 3.0 (4). В результате менялось положение центра давления $\bar{x}_{ц.д.}$ зонда. Оптимальным вариантом являлась компоновка зонда при взаимном расположении дисков с диаметрами D_1/d =4.0-4.5, D_2/d =3.0 на расстояние L_d/d =2.7 (рис. 13).



а) б)

Рис. 13. Зависимости: а – $c_x(\alpha)$; б - $m_z(\alpha)$

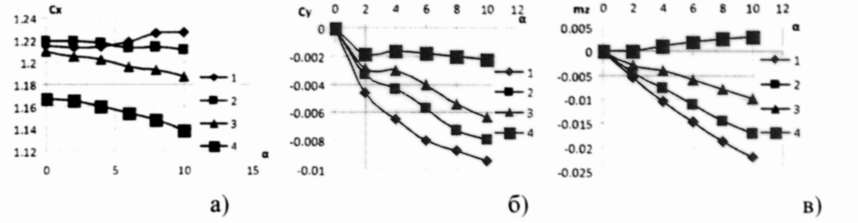
Также моделировалось обтекание зонда в цилиндрической трубе с D_T=0.312 м и L_T=0.43 м, что соответствовало условию эксперимента в установке «винт-кольцо» при одном из положений модели внутри профилированного кольца. Для случая закрученного потока выбиралось условие течения с вращением газа по закону твердого тела. Задавался расход, равный Q=2 $м^3/с$, что соответствовало начальной скорости потока V_∞=25 м/с. Окружная скорость равнялась 6 м/с, угловая – 16 и 24 рад/с. В результате зонд находился в области с низкой скоростью, а между дисками образовывалась область пониженного давления (рис. 14а и 14б). В случае закрученного потока значения сил Y, Z и моментов M_Y, M_Z для зонда были также близки к нулю.



а) б) в)

Рис. 14. Значения: а) – скорость, б) – давление, в) - зависимость $M_X(t)$

Результат проведенного расчета соответствовал экспериментальным данным в установке «винт-кольцо» с точностью 5 % для значения силы X =4.5 Н. Значение момента крена $M_X(t)$ практически не менялось во времени и оставалось близким к нулю (рис. 14в). Проведены расчеты обтекания с различной закруткой потока ω_0 на входе для случая обтекания цилиндра с двумя дисками при фиксированном положении дисков L_d/d =1.9. Для формирования закрутки потока по закону твердого тела на входе расчетной области использовалась специально подготовленная утилита в OpenFOAM.



а) б) в)

Рис. 15. Зависимости при изменении угловой скорости вращения потока: а) - $c_x(\alpha)$; б) - $c_y(\alpha)$; в) - $m_Z(\alpha)$. ω_0= 3 (1); 10 (2); 16 (3); 24 (4) рад/с

На рис. 15 показаны зависимости от угла атаки $c_x(\alpha), c_y(\alpha), m_Z(\alpha)$. Компоновка в форме цилиндра с двумя дисками была устойчива практически во всем диапазоне углов атаки от 0 до 10 градусов при наличии небольшой скорости закрутки потока. Оказалось, что закрутка влияла на значения АДХ для цилиндра с двумя дисками. При увеличении угловой скорости возникала динамическая неустойчивость (рис. 15в). Аналогичные результаты были получены для аппаратов с вращением (Любимов А.Н., Тюмнев Н.М., Хут Г.И.).

При выборе компоновки зонда требуется знание распределения тепловых нагрузок во всех областях течения: вблизи поверхности тела, в местах крепления троса к зонду. Проведен расчет поля температуры и исследование распределения числа Нуссельта Nu по поверхности зонда. С увеличением продольной координаты вдоль тела среднемассовая температура имела тенденцию к уменьшению. Высокие значения числа Нуссельта на переднем диске вызваны натеканием горячего потока. Дополнительно проводился расчет обтекания зонда с моделью, аналогичной модели «Сканлайнер» (рис. 1а). Расчетная сетка включала в себя 4 млн. ячеек. Расчеты проводились при изменении угла атаки от 0 до 10 градусов, с шагом 2 градуса. Проводился анализ значений c_x, c_y, m_z. Диапазон изменений для $c_x(\alpha)$=1.04...1.16, для $m_z(\alpha)$ от 0 до -0.03, для $c_y(\alpha)$ от 0 до -0.02. Расчеты выполнялись на вычислительных кластерах ТТИ ЮФУ, web-лаборатории UniHUB (ИСП РАН) с использованием 16–96 ядер.

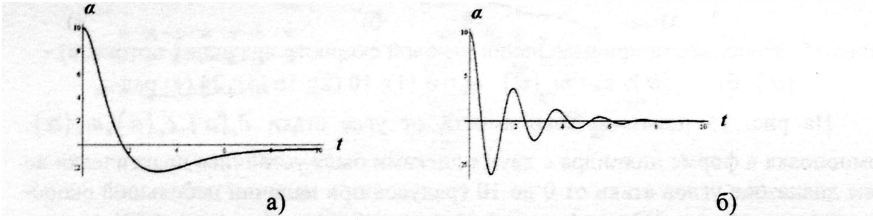
Приложение посвящено исследованию динамики тела в потоке. Рассматривалась простейшая модель движения зонда с одной степенью свободы по углу атаки. Для получения дифференциального уравнения движения использовалась теоремы об изменении кинетического момента тела. В качестве исследуемого тела рассматривалась экспериментальная модель. Уравнение вращательных колебаний зонда записывалось в виде:

$$J_Z\ddot{\alpha} + m_Z^{\bar{\alpha}}(\alpha)\frac{qSl^2}{V}\dot{\alpha} + m_z(\alpha)qSl = 0, \qquad (3)$$

где J_Z - момент инерции тела, q - скоростной напор, S - площадь миделева сечения, l - длина зонда, V - скорость набегающего потока. Значения демпфирующего коэффициента момента $m_Z^{\bar{\alpha}}(\alpha)$ получены для исследуемого тела при различных числах Маха и известных значениях M по аналитической методике

МГТУ им. Н.Э. Баумана Библиотека

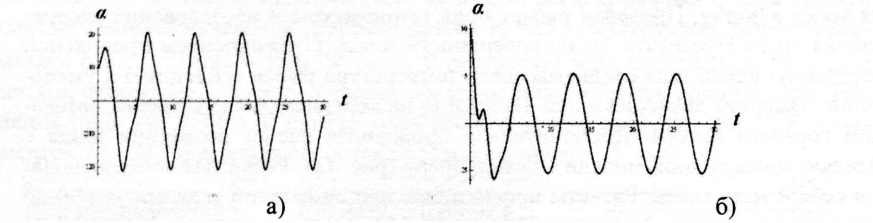
ЦНИИмаш. По результатам численного моделирования были найдены зависимости коэффициента момента тангажа $m_z(\alpha)$ для различных тел. Эти зависимости были аппроксимированы в виде $m_{z2} = k_2 \cdot \alpha^2$ для зонда с одним диском, $m_{z1} = k_1 \cdot \alpha$ для зонда с двумя дисками. Для зонда с одним диском получен апериодический процесс, с двумя дисками - затухающий колебательный процесс при начальном отклонении зонда на 10 градусов (рис. 16).



а) б)

Рис. 16. Зависимость $\alpha(t)$ при свободных колебаниях: а) - цилиндр с одним диском; б) - цилиндр с двумя дисками

Дополнительно рассматривались вынужденные колебания зонда с учетом влияния возмущающего момента $M = M_0 \cdot \cos(pt); M_0 = 0.1, p = 1.0$. На рис. 17 показана зависимость $\alpha(t)$ для начального угла отклонения зонда на 10 градусов.



а) б)

Рис. 17. Зависимость $\alpha(t)$ при вынужденных колебаниях: а) - цилиндр с одним диском; б) - цилиндр с двумя дисками

При прочих равных условиях зонд с двумя дисками более устойчив в потоке. Амплитуда колебаний для данного зонда составила около 5 градусов, в то время как для зонда с одним диском амплитуда колебаний составила 20 градусов. В работе рассматривалась более сложная модель динамики зонда на тросе, которая может быть использована для изучения явления резонанса. Приняты следующие допущения: 1) принцип обратимости потока; 2) скорость потока значительно больше скорости спуска зонда; 3) шарнирное закрепление троса в точке подвеса и крепления троса к зонду; 4) трение в шарнирах отсутствует; 5) трос нерастяжимый и неинерционный; 6) аэродинамические силы приложены в центре давления; 7) положения центров масс и давления известны; 8) углы – малые величины. В качестве обобщенных координат выбраны углы $\psi_1, \theta_1, \gamma_1$, $\psi_2, \theta_2, \gamma_2$. Система координат $OX_1Y_1Z_1$ задавала положение троса в пространстве, $OX_2Y_2Z_2$ задавала положение зонда в пространстве. Для получения уравнений движения зонда использовались уравнения Лагранжа 2-го рода. Также определялись квадраты собственных частот системы и главные формы колебания сис-

темы. Были заданы начальные условия для интегрирования системы уравнений, которое проводилось методом Рунге-Кутты 2-го порядка. Были получены траектории движения троса и зонда, фазовые портреты. Для случая с одной степенью свободы проведено сравнение численного и аналитического решений. Амплитуда колебаний центра масс зонда и троса не превышала 10 градусов в возмущенном дозвуковом потоке.

В заключении диссертационной работы приводятся основные выводы по результатам проведенных исследований в целом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выбрана оптимальная система пассивной аэродинамической стабилизации для зонда в форме цилиндра с двумя дисками. Зонд с СУ был устойчив в закрученном ограниченном потоке газа.

2. Проведен комплекс экспериментов, анализ результатов которых позволил выявить характерные структуры течения, закономерности их трансформации и их влияние на АДХ. Показано, что при дозвуковых скоростях обтекание СУ сопровождается образованием зон отрывного течения.

3. Разработана методика численного моделирования течений при малых дозвуковых скоростях, позволяющая определять параметры отрывных течений с достаточной инженерной точностью в широких диапазонах определяющих параметров. Проведена серия вычислений, подтверждающая приемлемость методики, а также позволившая проанализировать требования, предъявляемые к сеткам. В результате расчетов получено распределение параметров потока при закрутке, существенно дополняющее результаты экспериментов. При увеличении закрутки возможно развитие неустойчивости.

4. Установлено, что геометрия СУ оказывает влияние на интегральные АДХ и распределение давления. Получено для случая закрученного потока изменение продольной силы происходит до 10%, нормальной силы более 50%, увеличение момента тангажа по модулю до 25%, что обусловлено возникновением отрывного течения вблизи зонда. Определено влияние СУ на АДХ, которое связано с интерференционным воздействием течений. Различие с экспериментом составило 6 %. Ошибка в расчете коэффициента давления для различных зондов была 5 %.

5. С помощью полученных методик были проведены расчеты и даны рекомендации по выбору массогабаритных параметров зондов. При выборе массы зонда необходимо использовать соотношение $P/X \geq 10$. Для выбора геометрических параметров необходимо использовать соотношения: D_1/D_2=1.3-1.6, L_d/d= 2.5-3.0, D_1/d=3.8-5.0; L/d=5.5-6.0.

6. Проведены исследования зонда в свободном и возмущенном потоке. Разработана модель динамики зонда на тросе. Показано, что при выбранных конструктивных параметрах амплитуда колебаний зонда не превышает 10 градусов.

201 1393

МГТУ им. Н.Э. Баумана Библиотека

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В НАУЧНЫХ РАБОТАХ

1. Калугин В.Т., Стрижак С.В., Сущев С.П. Аэродинамическая стабилизация диагностического комплекса «Сканлайнер» // Известия РАН. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. № 3. С. 87–94.

2. Калугин В.Т., Стрижак С.В. Физическое и математическое моделирование отрывного обтекания аппарата-зонда с дисковыми стабилизаторами в закрученном потоке газа // Научный Вестник МГТУ ГА. Аэромеханика и прочность. 2008. № 125. С. 63–67.

3. Калугин В.Т., Стрижак С.В. Конструирование многоблочных сеток для тел вращения с дисковыми надстройками // Научный Вестник МГТУ ГА. Аэромеханика и прочность. 2009. № 138 (1). С. 82–85.

4. Калугин В.Т., Стрижак С.В. Параметрические исследования аппарата-зонда в закрученном потоке газа // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 6. С. 14–18.

5. Калугин В.Т., Стрижак С.В. Выбор аэродинамической компоновки аппарата-зонда, обтекаемого турбулентным закрученным потоком газа // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 10. С. 1–12.

6. Калугин В.Т., Стрижак С.В. К задаче определения аэродинамических характеристик диагностического комплекса «Сканлайнер» // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XV Всерос. школы-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. М., 2005. Т.1. С. 83–86.

7. Калугин В.Т., Стрижак С.В., Сущев С.П. Численное моделирование процесса теплообмена на поверхности диагностического комплекса «Сканлайнер» // Четвертая Российская Национальная конференция по теплообмену: Труды конференции. М., 2006. Т.2. С. 124–127.

8. Калугин В.Т., Стрижак С.В. Модель обтекания диагностического комплекса «Сканлайнер» в закрученном потоке газа // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XVI Всерос. школы-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. М., 2007. Т.1. С. 156–159.

9. Стрижак С.В. Математическое моделирование отрывного обтекания цилиндрических тел с дисковыми надстройками // Проблемы газодинамики и тепломассобмена в аэрокосмических технологиях: Труды XVII Всерос. Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. М., 2009. Т.1. С.101–104.

10. Возможности открытого пакета OpenFoam для решения задач аэрогидродинамики и теплообмена / С.В. Стрижак [и др.] // Пятая Российская Национальная конференция по теплообмену: Труды РНКТ-5. М., 2010. Т.1. С.85–88.