

На правах рукописи

ПРОДАН Николай Васильевич

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ  
МЕЖДУ СОБОЙ ИЛИ С ПРЕГРАДОЙ

Специальность 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель работы: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Матвеев Сергей Константинович

Официальные оппоненты: Ткаченко Игорь Вячеславович  
доктор технических наук,  
Санкт-Петербургский государственный  
морской технический университет,  
заведующий кафедрой Гидроаэромеханики и  
морской акустики

Чернышов Михаил Викторович  
доктор технических наук, доцент,  
Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого, заведующий  
кафедрой «Экспериментальные процессы в  
материалах и взрывобезопасность»

Ведущая организация Военно-космическая академия имени  
А.Ф. Можайского (Санкт-Петербург)

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_ декабря \_\_\_ 2016 г. в \_\_\_\_\_ на заседании  
совета Д212.232.30 по защите докторских и кандидатских диссертаций при  
Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504,  
Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский пр., 28, математико-  
механический факультет, ауд. 405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М.  
Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу:  
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9 и на сайте  
<https://dissser.spbu.ru/files/dissser2/dissser/mWDb82TJgH.pdf>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Е.В. Кустова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одной из самых актуальных задач, возникающих при проектировании авиационных и ракетно-космических транспортных систем, является задача уменьшения донного сопротивления. На протяжении минимум шестидесяти последних лет для моделирования течений в окрестности донных частей летательных аппаратов, а также в соплах двигательных установок использовалось течение в цилиндрическом канале с внезапным расширением поперечного сечения.

Среди многих задач газовой динамики, связанных с взаимодействием сверхзвуковых струй с преградами, течение сверхзвуковых струй в каналах с внезапным расширением представляет особый вид, относящийся к отрывным. Такие течения реализуются в различных технических устройствах ракетно-космической техники и технологических установках: в пусковых трубах, соплах с разрывом образующей, газодинамических лазерах, диффузорах стендов имитации высотных условий, фурмах и дутьевых устройствах металлургических печей, в газовой арматуре и трубопроводах химической промышленности. Явление турбулентного отрыва, как и всякое явление природы, по мере углубленного изучения представляется все более сложным по своим свойствам, формам и проявлениям. Однако, с практической точки зрения, в исследовании турбулентного отрыва достигнут несомненный прогресс, благодаря чему наличие развитого отрыва и его главные свойства можно предсказать и правильно учитывать при проектировании технических устройств. Разнообразие реальных отрывных турбулентных течений, их сложная физическая природа и отсутствие общей теории приводят к необходимости сочетания физического эксперимента и расчетных приближенных и аналитических исследований в большей степени, чем в других разделах газовой динамики. Задача о распространении сверхзвуковых струй в каналах с внезапным расширением является традиционной для прикладной газовой динамики. Интенсификация исследований в данном направлении обусловлена требованиями практики создания новой транспортной техники, в том числе, рассчитанной на большие сверхзвуковые скорости полета.

**Цель работы.** Целью работы является исследование истечения сверхзвуковых струй с внезапным расширением на различных режимах и выявление основных физических механизмов и процессов, сопровождающих эти явления.

В настоящей работе в качестве предмета исследования выбраны круглая сверхзвуковая струя и блок струй, истекающие в осесимметричный канал с внезапным расширением. Такие течения содержат в себе практически все элементы более сложных течений и могут служить их моделью. При заданной геометрии сопла, соплового блока и канала течение может быть полностью определено множествами газодинамических переменных  $F_0$  – параметров торможения рабочего газа, истекающего из сопла или блока сопел, и  $F_n$  – параметров газа, заполняющего канал до начала истечения струи или блока струй. Множества  $F$  состоят из термодинамических и теплофизических переменных, определяющих состояние рабочего и окружающего газа:  $P$  – давление,  $T$  – температура,  $\gamma = C_p/C_v$  – показатель адиабаты и другие, которые влияют на донное давление  $P_0$  в окрестности выходного сечения сопла Лавалья.

Объектом исследования являются ударно-волновые структуры (УВС), образующиеся в канале при истечении в него из сопла Лавалья или блока сопел сверхзвуковой недорасширенной струи или блока струй.

В задачи исследования входит: выявление основных и переходных режимов сверхзвукового истечения струи или блока струй в канал с внезапным расширением поперечного сечения при заданных условиях окружающей среды, изучение стационарных и нестационарных (переходных и колебательных) режимов сверхзвукового течения, разработка численного метода решения задачи как на стационарных, так и на нестационарных режимах, доказательство расходного механизма поддержания колебаний, проведение сравнительного анализа режимов течения для односопловых и многосопловых систем, параметрическое исследование зависимости характерных полных давлений перед соплом, отвечающих точкам переключения между режимами, от геометрических параметров установки и параметров окружающей среды.

**Методы исследования.** Методология проведения исследований сочетает углубленное аналитическое изучение свойств ударно-волновых процессов в канале с внезапным расширением, разработку новых численных методов повышенной точности и исследования с их помощью ударно-волновых процессов, а также натурный эксперимент. Изучались основные типы ударно-волновых структур, возникающих при взаимодействии одиночной и блочной сверхзвуковой струи со стенками цилиндрического насадка - канала с внезапным расширением. Исследовались области их существования, динамика колебаний ударно-волновой структуры,

предельные режимы. В результате обработки экспериментальных данных получены параметрические зависимости ключевых параметров течения от геометрии установки. Для углубления понимания физической картины явлений автором проводилось систематическое численное моделирование отрывных течений в канале с внезапным расширением поперечного сечения. Задача решалась в осесимметричной постановке с использованием уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (*RANS*). В исследовании использовались сопла с  $M_a = 1, 2, 3$ , углами полураствора сопел  $\theta_a = 8^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ . При отработке методики численного моделирования исследовалась применимость различных моделей турбулентности для расчета стационарных и нестационарных отрывных течений, а также возможность проведения расчетов методом установления или в полностью нестационарной постановке.

#### **Новые результаты, выносимые на защиту:**

1. Методика численного расчета течения в канале с внезапным расширением поперечного сечения на стационарных и нестационарных режимах.
2. Результаты численного моделирования физической картины течения на стационарных и нестационарных режимах.
3. Результаты экспериментального и численного параметрического исследования течения в канале с внезапным расширением как в односопловой компоновке, так и для случая блочных струй.
4. Описание физической картины течения на стационарных и нестационарных режимах, механизмов переходных процессов.
5. Подтверждение расходного характера колебаний давления в донной области.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается одновременным использованием методов вычислительного и физического эксперимента, результатами сравнения с работами других авторов.

**Практическая ценность.** Проведенные исследования позволили выполнить корректное обоснование основных механизмов нестационарных процессов в канале с внезапным расширением. Интерес к этим явлениям возрос в последнее время в связи с активно ведущимися работами по разработке реактивных двигателей со сверхзвуковым горением, импульсных

детонационных двигателей и т.п. Результаты работы применимы в металлургии – они могут быть использованы при разработке устройств перемешивания и дегазации расплавов, при разработке технологических процессов упрочнения материалов, акустического воздействия на объекты с целью изменения их свойств, и в других областях.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, были представлены на следующих семинарах, научных конференциях и конгрессах:

1. Пятые Уткинские чтения. Международная научно-техническая конференция. Санкт-Петербург, 2011 г.
2. XL Международная научно-практическая конференция «Технические науки – от теории к практике». Новосибирск, 19 ноября 2014 г.
3. VII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (Санкт-Петербург, 17-20 ноября 2015 г).
4. XLVII Международная научно-практическая конференция «Инновации в науке. Новосибирск, 2015 г.
5. Международная научная конференция «Наука – XXI век». Москва, 27-28 февраля 2015 г.

Результаты были использованы в ходе выполнения ПНИ «Разработка технологии непрерывно-детонационного гиперзвукового воздушно-реактивного двигателя воздушно-космической транспортной системы с управляемым сжиганием топлива в оптимальных структурно-устойчивых тройных конфигурациях ударных волн с долей детонационного горения не менее 85% объема камеры сгорания» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение № 14.575.21.0057, уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57514X0057). Результаты работы также были использованы в ходе выполнения НИР «Разработка технологии энергетических машин с высоким КПД» по теме №715861, выполняемой в рамках реализации Программы повышения конкурентоспособности Университета ИТМО среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013-2020 гг.

**Публикации результатов.** Содержание диссертационной работы достаточно полно отражено в 15 научных публикациях [1]-[15]. Результаты работы нашли применение в четырех патентах [16]-[21].

В работах [2], [4], [8], [12], [13], [15] автору принадлежит постановка задачи, разработка численного эксперимента, проведение численных расчетов, анализ результатов расчетов. В работах [1], [3], [5], [14] автору принадлежат результаты экспериментов. В работах [10]-[11], [6]-[7], [9], автор участвовал в составлении аналитических научных обзоров. П.В. Булату в работах [1], [3], [4], [5], [8] принадлежит описание теории и разработка математических методов и алгоритмов, в работах [6], [7], [12], [9], [13]-[15] – обзор предметной области. О.Н.Засухин в работах [7]-[9], [12]-[15] участвовал в проведении экспериментов и обсуждении результатов. В.Н. Ускову в работах [5], [6] принадлежит постановка задачи. П.В.Денисенко в работах [1], [3] разрабатывал схему эксперимента. Е.Е. Ильина, Т.Е.Ильина, В.В. Упырев в работах [1], [2], [15] выполняли численные расчеты по методике, разработанной автором.

**Структура работы.** Диссертационная работа состоит из содержания, введения, четырех глав, списка литературы, содержащего 56 наименований. Текст изложен на 141 странице. Диссертация содержит 101 рисунок.

### **Краткое содержание работы**

**В первой главе** введены основные понятия, необходимые для изучения сверхзвуковых течений с внезапным расширением, связанных с проблемой донного давления, сформулированы и обоснованы цели, задачи, предмет и метод исследования, приведен обзор ранее выполненных ключевых работ.

Выполненный обзор показал, что в области течений с внезапным расширением остались до конца нерешенными следующие задачи: моделирование нестационарных (колебательных и переходных) процессов, построение обобщающих параметрических зависимостей характерных донных давлений от геометрических параметров одно- и многосопловой компоновок, установление физических механизмов колебательных и релаксационных процессов.

Для целей интерпретации экспериментальных исследований разработана методика численного расчета, позволяющая корректно моделировать нестационарные явления в отрывных сверхзвуковых течениях. Прямой численный расчет колебаний УВС с помощью осредненных по времени уравнений Навье-Стокса, замкнутых с помощью различных моделей

турбулентности, сталкивается с методическими трудностями. Тем не менее, в целом ряде практически важных случаев, когда частота колебательного режима существенно меньше характерной частоты схода вихрей в турбулентном течении, численный расчет с помощью моделей турбулентности и осредненных по времени уравнений Навье-Стокса вполне возможен. Колебания донного давления относятся к классу квазистационарных, т.е. таких, период которых существенно больше характерного времени протекающих газодинамических процессов. Ни амплитуда, ни частота, ни форма колебательного цикла не зависят от параметров турбулентности. Этот экспериментально установленный факт позволяет применять для расчета низкочастотных колебаний донного давления квазистационарную постановку задачи. До начала расчетов было выполнено тестирование широко представленных в современных коммерческих вычислительных пакетах моделей турбулентности. Проведенное тестирование показало, что наилучшие результаты при расчетах сверхзвуковых отрывных течений, характерных для многосопловых компоновок и донных частей ракет, дают *Realizable k-ε* и *Transition SST*-модели турбулентности.

**Во второй главе** излагаются результаты экспериментального исследования компоновки с одним соплом.

График изменения донного давления  $P_\delta = f(P_0)$  можно условно разделить на нисходящую и восходящую части. Граница разделения частей графика на нисходящую и восходящую соответствует минимальному донному давлению  $P_\delta$ , определяемому сочетанием конструктивных параметров установки (геометрическому числу Маха сопла -  $M_a$ , углу полураствора сопла -  $\theta_a$ , длине канала -  $l_{mp}$ ). Величина минимального донного давления не остается постоянной при использовании канала переменной длины и существует оптимальная, с точки зрения получения максимального разрежения в донной области, длина канала  $l_{mp} = l_{mp\_opt}$ . Этой же длине канала соответствует и самое низкое из всех  $P_\delta$ , т.е. такое полное давление, при котором достигается максимальное разрежение в донной области  $P_\delta$ . Анализ экспериментальных данных показал, что чем больше  $M_a$  тем больше оптимальная длина канала. Эта закономерность вполне естественна, т.к. с увеличением  $M_a$  увеличивается длина первой бочки струи, а вот предельная нерасчетность с ростом  $M_a$  падает, т.е. интенсивность центрального скачка уменьшается. Наибольшая интенсивность центрального скачка уплотнения в канале с внезапным расширением достигается на режиме предельной нерасчетности.



Для каждого типа сопла и диаметра канала существует своя оптимальная длина канала, которая обеспечивает абсолютный максимум нерасчетности.

На нисходящей ветви графика  $P_\delta(P_0)$  при истечении струи в длинные каналы и каналы средней длины, имеются области колебательных режимов. Все типы колебаний и переходных процессов являются неавтономными. Их протекание сопровождается гистерезисом параметров при увеличении и сбросе  $P_0$ . Автоколебательный режим является существенной особенностью течения в канале с внезапным расширением. Амплитудно-частотная характеристика определяется многочисленными конструктивными и технологическими параметрами установки. Колебания носят квазистационарный характер, т.е. газодинамические функции  $F_\delta$  не зависят явным образом от времени, а определяются только донным давлением, которое, в свою очередь, зависит от расхода газа, эжектируемого из донной области и втекающего в неё. Выяснилось, что колебания при увеличении  $P_0$  всегда возникают с отличной от нуля амплитудой, причем первый цикл начинается с уменьшения  $P_\delta$ . При этом низкочастотным колебаниям предшествует переходный режим, когда стохастические колебания модулируются и амплитуда их растет. По результатам экспериментальных исследований были сделаны основные выводы по природе колебательного режима. Частота колебаний сильно зависит от длины трубы и в меньшей степени от числа  $M_a$  сопла. При увеличении  $P_0$  колебания начинаются переходным процессом. В разных частях колебательного режима существуют различные виды колебаний, возможно, формируемые за счет наложения двух разных механизмов поддержания колебаний. В коротких трубах колебания не возникают. Не возникают они и в случае истечения струй из сопел, обеспечивающих их наибольшее раскрытие.

**В третьей главе** изложены и проанализированы экспериментальные исследования компоновки с блоком сопел. Взаимодействие между собой сверхзвуковых струй, истекающих из многосоплового блока, приводит к сложным трехмерным течениям. При определенных значениях полного давления блочные струи начинают взаимодействовать своими внешними границами со стенками канала, что приводит к интенсивным потокам, затекающим в межсопловую донную область. В то же время струи взаимодействуют и между собой, что приводит к образованию серповидных скачков уплотнения между струями. Серповидные скачки выталкивают поток к периферии, поэтому поперечное сечение результирующей струи приобретает в случае двух сопел крестообразную форму, а в более сложных случаях – звездообразную. Проведенное исследование показало, что характер

поведения ударно-волновой структуры при истечении в канал одиночной струи или блока струй во многом подобны. Но имеются и существенные отличия.

Отличия касаются, в основном колебательных режимов, которых в двухсопловых компоновках может быть два (рисунок 3), что объясняется существованием двух отдельных мод колебаний, которые могут накладываться друг на друга, либо существовать изолированно.

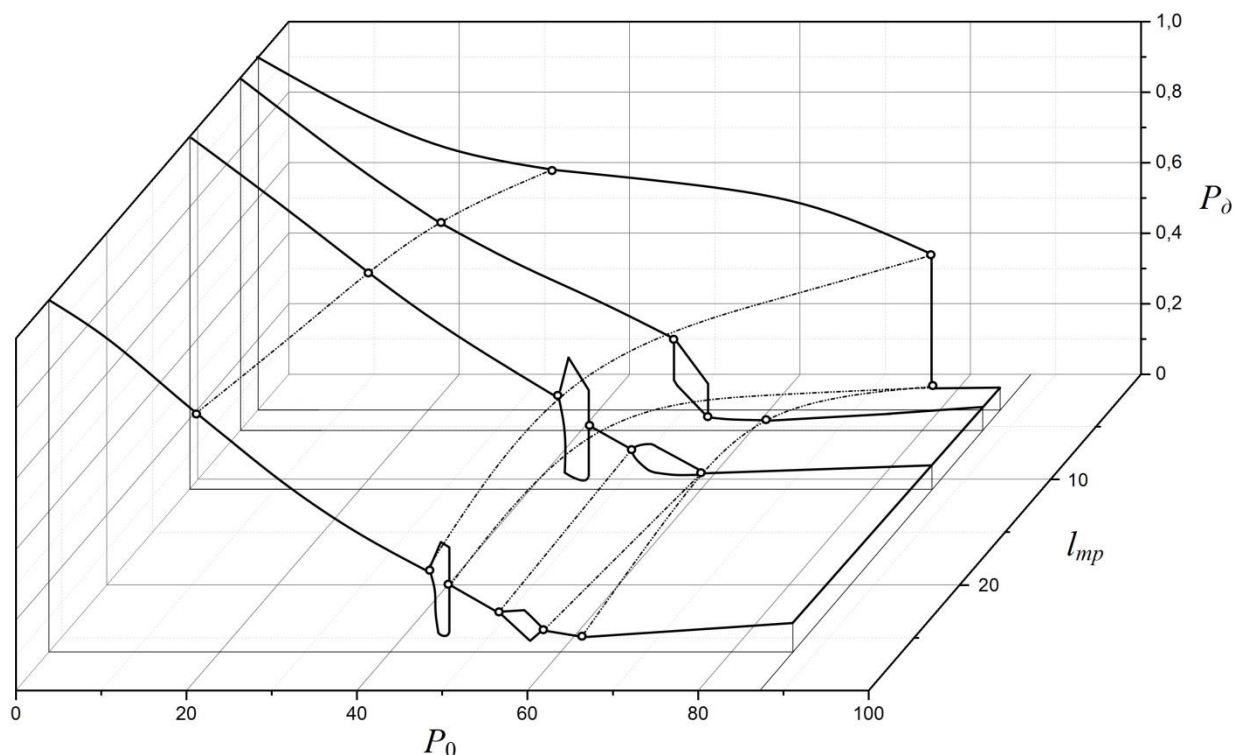


Рисунок 3 – Зависимость  $P_0(P_d)$  для  $d_u=0,708$ ,  $M_a=3$ ,  $\theta_a=15^\circ$ .

Первые же эксперименты с  $M_a=1$  выявили новые явления. Как известно, в осесимметричном случае с одним соплом, колебания не возникают при  $M_a=1$ . Здесь же мы имеем развитые колебания, подобные таковым при числе Маха больше единицы, в случае одной струи. Анализ геометрии блочной струи показал, что причина заключается в том, что плотно расположенные две струи на некотором удалении от соплового блока трансформируются в почти круглую турбулентную, которая подобна круглой одиночной струе, истекающей из сопла с  $M_a=2$  и  $\theta_a=8^\circ$ , отсюда и похожее поведение графика  $P_d(P_0)$ .

**В четвертой главе** выполнена обработка и интерпретация результатов экспериментальных и численных исследований нестационарных процессов, возникающих в сверхзвуковом течении в канале с внезапным расширением, в том числе: выполнены численные расчеты круглой и кольцевой струи на колебательных режимах; проанализированы формы колебательных циклов

составных, псевдогармонических и релаксационных колебаний, исследованы переходные режимы; исследованы закономерности изменения частоты колебаний по мере изменения полного давления; подтвержден расходный механизм поддержания колебаний.

Путем сопоставления данных натурального и численного эксперимента установлен физический механизм колебаний, а также соответствие физической картины течения отдельным фазам колебаний (рисунок 4).

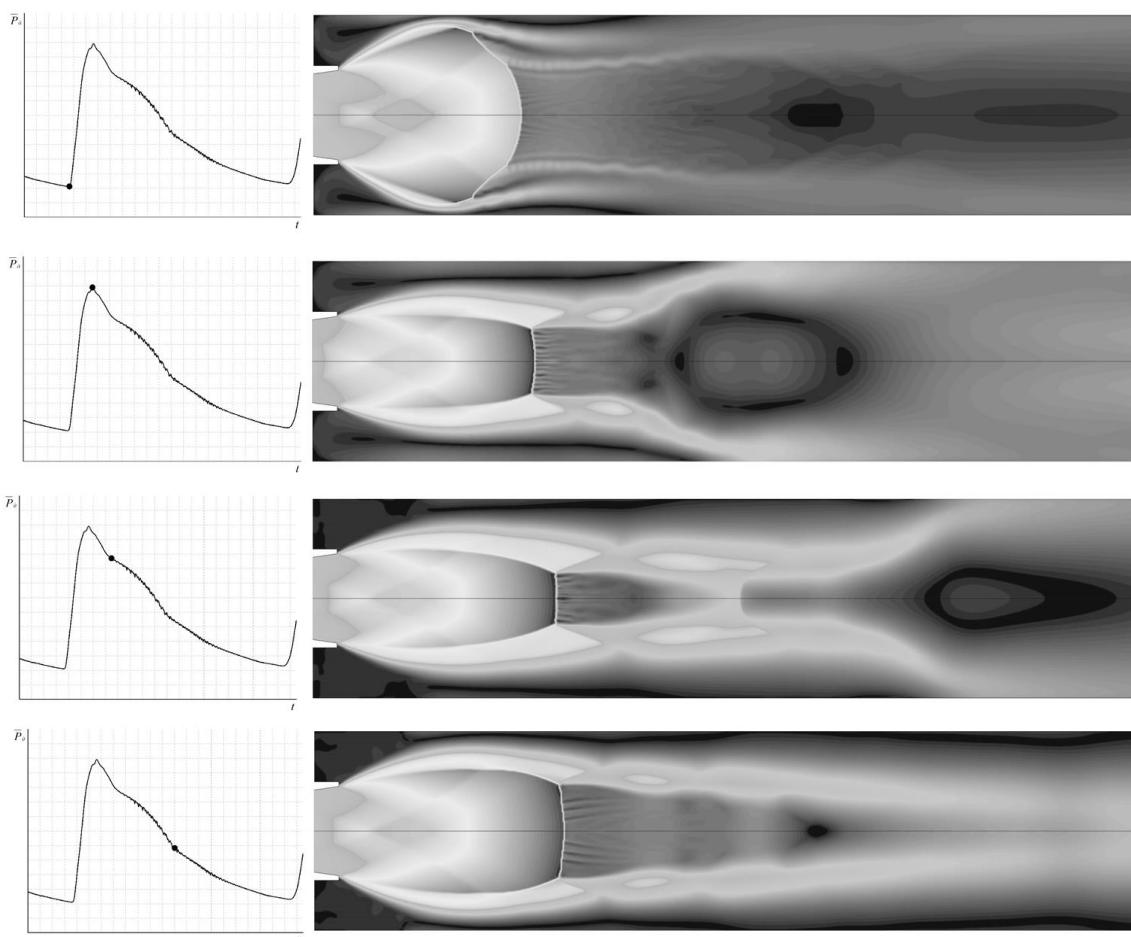


Рисунок 4 – Колебательный цикл  $P_0(t)$  (слева) и соответствующие ударно-волновые структуры в виде распределения чисел Маха (справа), соответствующие составным колебаниям.

Причиной начала колебаний является возникновение при некотором значении полного давления перед соплом дисбаланса количества газа, эжектируемого из донной области и втекающего в неё из окружающей среды или области натекания струи на стенку канала. Дисбаланс существует при любом значении донного давления, что и является механизмом поддержания автоколебаний. Такой механизм называется расходным.

Расчет истечения газа из кольцевого сопла был предложен автором, как аналог моделирования сверхзвукового течения для компоновок, состоящих из нескольких сопел. Истечение из кольцевого сопла, как и истечения из многосопловой компоновки в канал с внезапным расширением, в целом, подобно истечению в канал одиночной струи. Однако наличие двух донных областей центральной и периферийной видоизменяет характерную зависимость донного давления от полного давления и форму колебательного цикла. Исследование показало, что закономерности изменения периферийной донной области практически не отличаются от известных картин течения одиночной струи в канале. А вот внутренняя ударно-волновая структура существенно отличается, что объясняется наличием центральной донной области и внутренней границы струи. Кроме того, на колебательных режимах объем внутренней области остается примерно постоянным, а объем периферийной области изменяется.

Доказательство расходного механизма поддержания колебаний состоит в создании системы, позволяющей отбирать газ из области натекания струи на стенку канала и подавать его в донную область. Таким образом, изменяется дисбаланс расходов эжектируемого из донной области газа и поступающего в неё. Предполагается, что изменение дисбаланса повлияет на характеристики колебаний, что докажет их расходный характер. При проведении натуральных и численных экспериментов удалось возбудить колебания при истечении струи из сопла с  $M_a=1$ , когда колебания не возникают. Это позволяет сделать вывод о том, что колебания носят именно расходный характер и механизм их возбуждения и поддержания действительно основан на мгновенном неравенстве расходов газа, втекающего в донную область и истекающего из неё.

**Заключение.** В рамках работы:

1. Проведено исследование донного давления в односопловой и многосопловой компоновках, проведен их сравнительный анализ, получены новые качественные результаты. Получено полное описание поведения струи в канале с внезапным расширением как динамической системы. Дано исчерпывающее толкование физической сущности процессов, сопровождающих истечение струи в канал с внезапным расширением на стационарных и нестационарных режимах.

2. Разработана методика численного расчета. Отработка методики проводилась на модельных задачах, результаты которых сравнивались с экспериментальными данными. Известно, что моделирование расчетных

струй, то есть, когда нерасчетность близка к единице, не вызывает особых сложностей. Трудности возникают на нерасчетностях значительно отличающихся от единицы, в данном случае необходимо проводить анализ расчетных моделей и выбирать наиболее подходящие. Для одиночной затопленной недорасширенной сверхзвуковой струи наилучшие результаты были получены с использованием двухпараметрических моделей турбулентности  $k-\omega$  и усовершенствованной модели Ментера *Transition SST*. Для сверхзвуковой струи, истекающей в канал с внезапным расширением поперечного сечения, взята двухпараметрическая модель *Realizable k-ε* и модель *Transition SST*. На нестационарных режимах стабильнее результаты показывает *Realizable k-ε* модель, хотя и с существенным завышением турбулентной вязкости, что приводит к существенному завышению амплитуды колебаний донного давления. Совместное использование двух рассмотренных расчетных моделей позволило получить достаточно точные результаты для физического анализа сверхзвукового течения в канале с внезапным расширением.

3. Проведены экспериментальные исследования одиночной и блочной струи. Они показали, что характер поведения УВС при истечении в канал одиночной и блочной сверхзвуковой струи во многом подобны. Выявлены характерные полные давления, отвечающие переходу от одного режима течения к другому. Исследование низкочастотных колебаний позволило сделать заключение, что они бывают трех типов. Характерные давления, отвечающие моментам переключения с режима на режим, существенным образом зависят от числа Маха сопла, разнесения сопел в сопловом блоке, длины и площади канала. Существует такая оптимальная длина канала, которая обеспечивает минимальное донное давление среди всех возможных каналов.

4. Проведено численное моделирование блочных струй. Автором была предложена модель кольцевой струи, как аналог блочной струи. Такая модель позволила решать задачу в двухмерной осесимметричной постановке, что снизило затраты на вычислительные мощности. Модель кольцевой струи оказалась удачной и позволила получить новые качественные результаты, а именно, были исследованы зависимости периферийного донного давления и донного давления в центральной части. Оказалось, что значение донного давления в центральной части остается постоянным, в то время как значение донного давления в периферийной области переменным на нестационарных режимах течения. График зависимости периферийного донного давления для кольцевого сопла имеет форму аналогичную графику зависимости донного

давления для одиночной струи с той же площадью критического сечения сопла.

5. Проведено экспериментальное и численное обоснование расходного механизма поддержания колебаний. Для эксперимента создана установка с каналом обратной связи, который позволяет регулировать расход рабочей среды от струи в донную область. Удалось создать и поддерживать колебательный процесс для установки с соплом, геометрическое число Маха которого равно единице, где без канала обратной связи колебания донного давления не возникают. Тем самым экспериментально удалось доказать расходный механизм возбуждения и поддержания низкочастотных колебаний. Этого же удалось добиться и в численном моделировании. Были получены качественные картины течения для колебательного процесса, что доказывает целесообразность использования разработанных автором методик исследования.

В качестве рекомендаций предлагается использовать полученные в работе экспериментальные и расчетные зависимости, которые могут быть полезны в качестве исходных данных и могут быть применены для решения практических задач. С этой точки зрения результаты исследования можно использовать для развития систем генерации пульсирующих потоков для металлургии или акустических устройств. Режим предельной нерасчетности (донной давление минимально) представляет интерес при создании и развитии высокоскоростных систем с движителями детонационного горения или многоконтурных эжекторных систем.

Дальнейшее развитие исследования может представлять собой уточнение расчетных моделей для изучения переходных режимов и явления гистерезиса, обнаруженного в ходе экспериментальных исследований.

### **Публикации автора по теме диссертации**

#### **Публикации в журналах, рекомендованных ВАК**

1. Булат П.В., Денисенко П.В., Продан Н.В., Упырев В.В. Гистерезис интерференции встречных скачков уплотнения при изменении числа Маха // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 5. С. 930–941.

2. Ильина Т.Е., Продан Н.В. Проектирование элемента струйной системы управления газостатическим подшипником // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 5. С. 921–929.

3. Булат П.В., Денисенко П.В., Продан Н.В. Интерференция встречных скачков уплотнения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 2. С. 346-355

4. Булат П.В., Продан Н.В. О низкочастотных расходных колебаниях донного давления. Фундаментальные исследования, №4(3). 2013г., с. 545-549.

5. Усков В.Н., Булат П.В., Продан Н.В. Обоснование применения модели стационарной Маховской конфигурации к расчету диска Маха в сверхзвуковой струе. Фундаментальные исследования, №11(1). 2012г., с 168-175.

6. Усков В.Н., Булат П.В., Продан Н.В. История изучения нерегулярного отражения скачка уплотнения от оси симметрии сверхзвуковой струи с образованием диска Маха. Фундаментальные исследования, №9 (2). 2012 г., с. 414-420.

7. Засухин О.Н., Булат П.В., Продан Н.В. Развитие методов расчета донного давления. Фундаментальные исследования, №6 (1). 2012 г., с. 273-279.

8. Засухин О.Н., Булат П.В., Продан Н.В. Колебания донного давления. Фундаментальные исследования, №3. 2012 г., с. 204-207.

9. Засухин О.Н., Булат П.В., Продан Н.В. История экспериментальных исследований донного давления. Фундаментальные исследования, №12 (3). 2011 г., с. 670-674.

#### **Публикации в других изданиях**

10. Prodan N.V. History of base pressure experimental research. Life Sci J 2014;11(7s):238-241.

11. Prodan N.V. History of bottom pressure oscillations researches. Life Sci J 2014;11(7s):242-245.

12. Засухин О.Н., Булат П.В., Продан Н.В. Особенности применения моделей турбулентности при расчете сверхзвуковых течений в трактах перспективных воздушно-реактивных двигателей. Двигатель №1(79). 2012 г., с 20-23.

13. Булат П.В., Засухин О.Н., Продан Н.В. Исследование нестационарных и колебательных режимов течения в эжекторе методом вычислительного эксперимента. Международная конференция «Седьмые Окуневские чтения». 20-24 июня 2011 г., Санкт-Петербург: Материалы докладов.

14. Булат П.В., Засухин О.Н., Продан Н.В. Влияние эксцентricности расположения сопла в канале на газодинамические, акустические параметры струйных течений и возникающие УВС. «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ», №12. Пятые Уткинские чтения: Труды Международной научн.-техн. конф. Санкт-Петербург, 2011 г., с. 141-143.

15. Булат П.В., Засухин О.Н., Ильина Е.Е., Ильина Т.Е., Продан Н.В., Усков В.Н. Гистерезис при переходе от режимов течения с открытой донной областью к режимам с закрытой донной областью в каналах с внезапным расширением. Струйные, отрывные и нестационарные течения: XXII Юбилейный семинар с международным участием. 22-25 июня 2010 г. Санкт-Петербург: избранные труды, с. 33-45.

### **Патенты**

16. Засухин О.Н., Продан Н.В., Булат П.В. Акустический излучатель // Патент РФ № 146440. 2013.

17. Булат П.В., Продан Н.В. Генератор ударных волн // Патент РФ № 140420. 2013.

18. Булат П.В., Продан Н.В., Засухин О.Н., Иванов Д.А. Акустический излучатель // Патент РФ № 152649. 2014.

19. Булат П.В., Продан Н.В. Генератор ударных волн // Патент РФ № 154734. 2014.