

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

БУЛАТ Павел Викторович

СВЕРХЗВУКОВОЕ ТЕЧЕНИЕ В КАНАЛЕ С ВНЕЗАПНЫМ РАСШИРЕНИЕМ

Специальность 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2012

Работа выполнена на кафедре плазмогазодинамики и теплотехники аэрокосмического факультета Балтийского государственного технического университета «Военмех», им. Д.Ф.Устинова.

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор Усков Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Матвеев Сергей Константинович;  
доктор технических наук,  
профессор Савин Андрей Валерьевич  
(ЗАО «Концерн «Струйные технологии»)

Ведущая организация: Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича СО РАН

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г. в \_\_\_\_\_ на заседании совета Д 212.232.30 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский пр., 28, математико-механический факультет, ауд. \_\_\_\_\_.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке имени М.-Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Кустова Е.В.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Актуальность исследования истечения сверхзвуковой струи в коаксиальный цилиндрический канал с внезапным расширением (ТВР) определяется тем, что выявленные в данном простом случае режимы повторяются в более сложных технических устройствах, в которых также имеются отрывные течения, например, камера Эйфеля аэродинамической трубы, сопловые блоки, эжекторы, камеры сгорания со сверхзвуковым горением, форсажные камеры воздушно-реактивных двигателей и т.п. Всех их объединяет одна общая техническая проблема - донное давление.

Процесс истечения сверхзвуковой струи в канал с внезапным расширением сопровождается широким спектром газодинамических явлений. Среди них наиболее интересными представляются нестационарные процессы. Изучение особенностей таких течений позволяет использовать полученные результаты при создании глушителей или наоборот – акустических генераторов и устройств пульсирующего дутья в металлургии. Таким образом, сочетание широкого класса различных газодинамических процессов и больших возможностей практического использования этих явлений делает рассматриваемую задачу актуальной как в фундаментальном, так и прикладных аспектах. Несмотря на многолетние исследования, так и не появилось: диагностической методики, позволяющей рассчитывать среднее донное давление в типичных технических устройствах, четкой классификации режимов, описания физической картины течения, строгих математических моделей переходных процессов. Остался открытым и традиционный вопрос о природе колебаний донного давления.

**Цель работы.** В настоящей работе из всего этого многообразия выбрана круглая сверхзвуковая струя, истекающая в осесимметричный канал. Она содержит в себе практически все элементы более сложных течений и может служить их моделью. При заданной геометрии сопла и канала (рис.1) течение полно-

стью определяется множествами газодинамических переменных  $F_0$  параметров торможения рабочего газа, истекающего из сопла, и  $F_n$  – параметров газа, заполняющего канал до начала истечения струи. Множества  $F$  составляют термодинамические и теплофизические переменные, определяющие состояние рабочего и окружающего газа:  $p$  – давление,  $T$  – температура,  $\gamma=C_p/C_v$  – показатель адиабаты и другие, которые влияют на донное давление ( $P_d$ ) в окрестности выходного сечения сопла Лавалья.

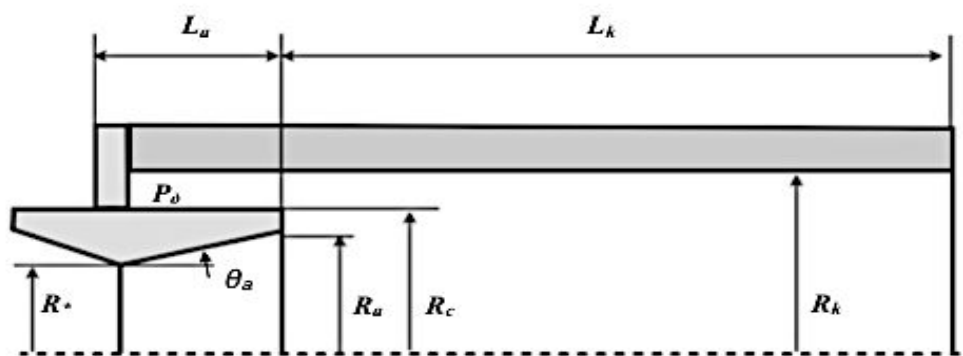


Рис. 1. Геометрия канала с внезапным расширением.

$R_*$  - радиус критического сечения сопла,  $R_a$  - радиус выходного внутреннего сечения сопла,  $R_c$  - радиус выходного наружного сечения сопла,  $\theta_a$  - угол полураствора сопла на его срезе,  $R_k$  - радиус канала,  $L_k$  - длина канала,  $L_a$  - длина выноса сопла в канал.

Целью работы является исследование основных режимов течения струи в канале с внезапным расширением при заданных условиях  $F_n$  в окружающей среде, построение полной классификации стационарных режимов, переходных процессов и предельных циклов, а также нахождение последовательности их смены в зависимости от параметров торможения газа перед соплом  $F_0$ , однозначное, качественно полное описание механизмов перестроек течения, возникновения и окончания колебательных режимов, анализ гистерезисных явлений. Физические явления, сопровождающие отрывные течения в окрестности обратного уступа, донного среза, различные модели донных областей подробно

рассмотрены в монографии Л.В. Гогиша и Г.Ю. Степанова. Само понятие донного давления и подходы к его определению сформулированы в постановочных трудах Г. Корста, Чау и Эдди. В работах Б.А. Баланина исследовано влияние длины канала на  $P_d$  и условия запуска канала, в трудах Андерсона и Вильямса, Мартина и Бейкера, Юнговски изучались фазы формирования потока в канале и был установлен типичный график зависимости  $P_d$  от  $P_0$ . В результате представления о характерном графике  $P_d(P_0)$  приобрели современный вид (рис.2).

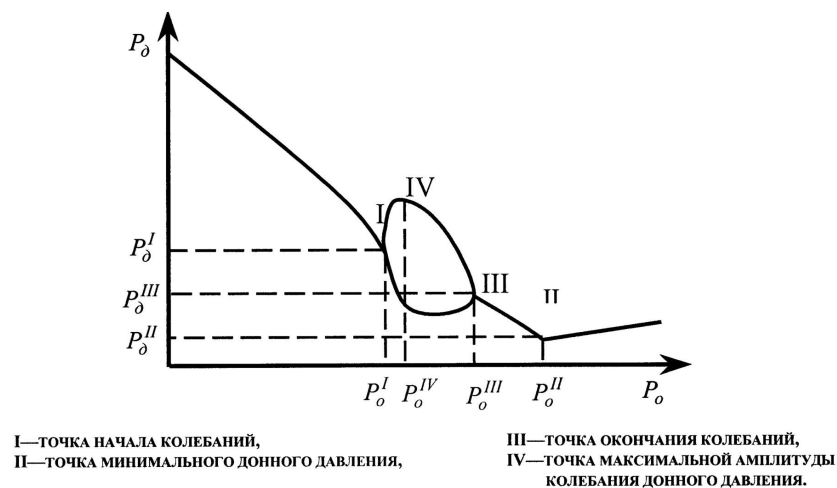


Рис. 2. Характерные давления на типичном графике зависимости  $P_d(P_0)$ .

**Методы исследования.** Автором проводилось систематическое экспериментальное изучение отрывного течения в канале с внезапным расширением. Относительная площадь канала в экспериментах оставалась неизменной и составляла  $F_k/F_*=(R_k/R_*)^2=64,3$ . В исследованиях использовались сопла с  $M_a = 1 - 6$ , углами полураствора на срезе сопел  $\theta_a = 0^\circ, 8^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  и  $40^\circ$ . Результаты регистрировались либо с помощью осциллографа на бумагу, либо с помощью магнитографа на магнитную ленту. Методика проведения эксперимента позволила определить параметры колебательных процессов. Разработанная полуэмпирическая модель течения в канале сочетала численный метод расчета течения по соплу с точными решениями для элементов ударно-волновой структуры (УВС) струи. Для верификации полуэмпирической модели и уточнения качественной картины течения проводились численные расчеты в осесимметричной поста-

новке с использованием уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS).

**Новые результаты**, выносимые на защиту, заключаются в следующем:

1. Классификация режимов течения в канале с внезапным расширением. На основе выполненных автором систематических экспериментальных, теоретических и расчетных исследований выявлены и классифицированы основные режимы отрывного течения в канале с внезапным расширением, включая переходные и колебательные, объяснены определяющие их физические факторы.
2. Полуэмпирическая методика расчета донного давления в канале с внезапным расширением. Она состоит из нескольких компонентов: модели первой бочки струи идеального газа, модели ударно-волновой структуры струи, интегральной модели слоя смешения на границе струи, моделей взаимодействия слоя смешения со стенкой канала и скачками уплотнения.
3. Полуэмпирическая методика расчета геометрии элементов ударно-волновой структуры струи.
4. Результаты численного исследования физической картины течения на нестационарных и переходных режимах.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается использованием одновременно методов физического и вычислительного эксперимента, разработанной полуэмпирической методикой расчета течения в канале, определением границ применимости методов, а также сравнением с результатами работ других авторов.

**Практическая ценность.** Проведенные исследования для канала с одиночным соплом позволили расширить по сравнению с ранними чисто экспериментальными работами представления о режимах течения. Эти данные могут быть использованы в качестве основы для объяснения свойств течений в

более сложных устройствах, таких как сопловые блоки, газодинамические лазеры, проточные камеры сгорания со сверхзвуковым горением и др.

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

1. IX научно-техническая конференция по авиационной акустике. ЦАГИ. Суздаль. 1989 г.;
2. XV всесоюзный семинар по газовым струям. Ленинград. 1990 г.;
3. Международный симпозиум по отрывным течениям и струям (IUTAM), Новосибирск. Июль 1990 г.;
4. Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах. XVI всероссийский семинар. Санкт-Петербург. 18-20 Июня 1997 г.;
5. Прикладные проблемы механики жидкости и газа. IX международная конференция ученых Украины, России, Белоруссии. Севастополь. 25-29 сентября 2000 г.;
6. Течение газа и плазмы в соплах, струях и следах. XVIII международный семинар. С-Пб. 21-23 июня 2000 г.;
7. Современные проблемы неравновесной газо- и термодинамики. С-Пб. 2002 г.;
8. IV международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ-2002)/ XIX международного семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям. С-Пб. 2002 г.;
9. XX юбилейный международный семинар по струйным, отрывным и нестационарным течениям. С-Пб. 1-3 июля 2004 г.;
10. XXII юбилейный семинар с международным участием. струйные, отрывные и нестационарные течения. С-Пб. 2010 г.

Результаты были использованы в ходе выполнения прикладных НИР:

1. Исследование распространения сверхзвуковой струи в ограниченном пространстве. ЛМИ: Ленинград. 1991 г.;
2. Физические и математические модели нестандартных и гистерезисных явлений в струйных течениях газа. БГТУ: С-Пб. 1993 г. P5-13-2591;
3. НИР НК-85Р. Оптимальное управление внутренним течением маневренной ракеты, оснащенной гиперзвуковым врд и изоэнтропическим воздухозаборником. 2009-2011 гг.

**Публикации результатов.** Содержание диссертационной работы достаточно полно отражено в 36 научных публикациях [1-36]. В работе [6] О.Н.Засу-

хину принадлежат экспериментальные данные, В.Н.Ускову описание теории ударно-волновых процессов. В в работах [1-30] автору принадлежит теория, результаты расчета, результаты экспериментов. О.Н.Засухин участвовал в постановке расчетов и экспериментов, В.Н.Усков - в качестве научного консультанта. В остальных работах [31-36] автору принадлежит постановка задачи, описание предметной области и анализ результатов расчетов и экспериментов.

**Структура работы.** Диссертационная работа состоит из содержания, введения, трех глав, списка литературы, содержащего 97 наименований, двух приложений. Текст изложен на 140 страницах. Диссертация содержит 81 рисунок.

### **Краткое содержание работы**

**В первой главе** даны определения донного давления, внутренних и внешних течений с внезапным расширением, течений, в которых донная область образуется свободными границами потока, течения типа «закрытый след» и «открытый след», открытой донной области, закрытой донной области, разделительной линии тока, приведен обзор ранее выполненных экспериментальных исследований.

Для характеристики струи в канале как динамической системы введено понятие дисбаланса расходов масс  $\zeta = (q_p - q_v) / Q_a$ , поступающих в донную область ( $q_v$ ) из окружающей среды или из области присоединения струи к стенке канала и эжектируемых из донной области струей ( $q_p$ ), отнесенный к расходу рабочего газа через сопло  $Q_a$ . Изучение поведения газодинамической системы в пространстве  $\zeta - P_d$  аналогично исследованию ее динамических свойств на фазовой плоскости с единственным параметром  $P_0$ . Если при заданном  $P_0$  дисбаланс  $\zeta$  равен нулю, то система находится в стационарном положении, в противном случае донное давление изменяется (рис.3).



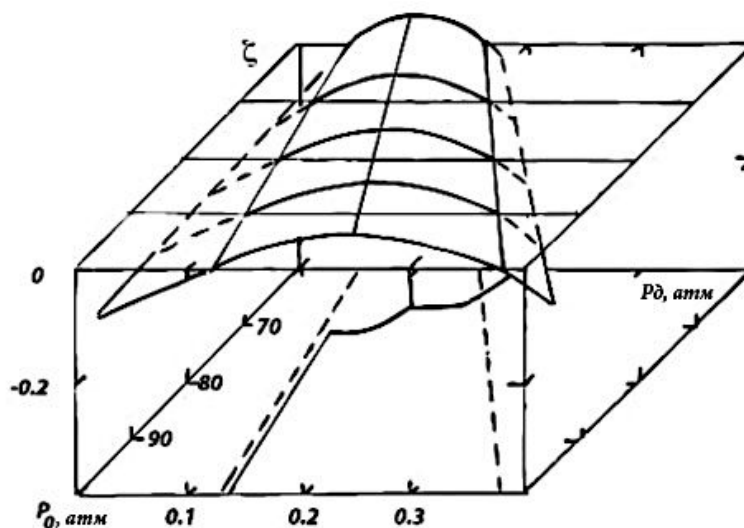


Рис.3. Зависимость дисбаланса  $\zeta$  от  $P_d$  и  $P_0$ .

**Во второй главе** последовательно излагаются методы исследования, с помощью которых получены результаты: экспериментальные исследования, численный эксперимент, полуэмпирическая методика расчета донного давления и элементов ударно-волновой структуры струи в канале. Проведено обоснование методов исследований путем сравнения полученных с их помощью результатов между собой, а также с результатами других исследователей.

Поскольку теневые фотографии (рис.4) выполнялись на установках с плоскими прозрачными стенками, это вносило искажение в картину течения. Для ее уточнения на стационарных режимах использовались и другие методы визуализации течения, например, с помощью масляной обмазки внутренних стенок канала, а также численные расчеты в осесимметричной постановке с использованием уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS).

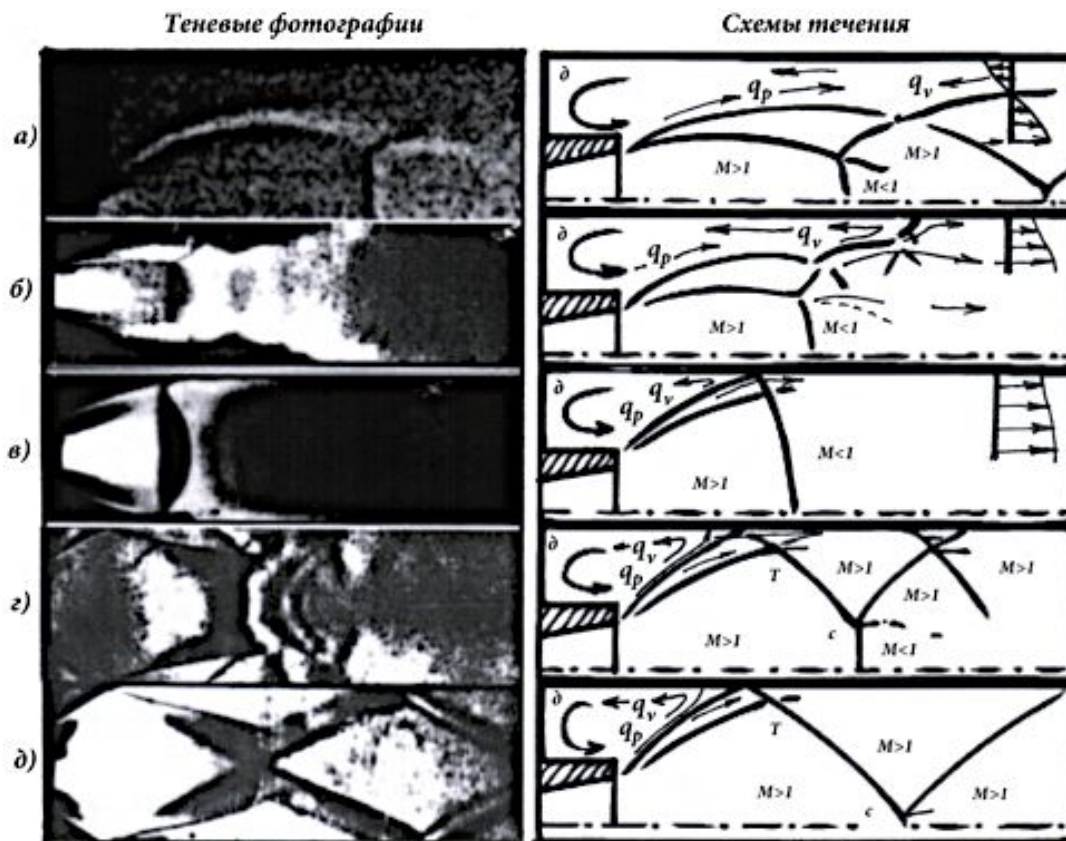


Рис.4. Типичные ударно-волновые структуры в канале с ТВР.

$L_k > L_{k0}$ .  $M_a = 2$ . а) Режим ОДО,  $P_0 = 30$  атм,  $P_0 < P_{01}$ , б) Режим НАР ЗДО,  $P_0 = 40$  атм,  $P_{011} > P_0 > P_{01}$ , в) Минимальное  $P_d$ ,  $P_0 = 60$  атм,  $P_0 = P_{011}$ , г) АР,  $P_0 = 70$  атм,  $P_0 > P_{011}$ , д) АР,  $P_0 = 90$  атм,  $P_0 \gg P_{011}$ .

Полуэмпирическая модель состоит из нескольких компонентов: модели первой бочки струи идеального газа, модели УВС струи за пределами первой бочки, интегральной модели слоя смешения на границе струи, моделей взаимодействия слоя смешения со стенкой канала и скачками уплотнения. Описанная в главе модель течения с параметрами, постоянными вдоль линий тока, применена для расчета сжатого слоя затопленной струи. Показано (ранее имелись только предположения), что висячий (падающий) скачок отражается от оси с образованием стационарной маховской конфигурации, в которой интенсивность падающего (висячего) скачка равна характерной интенсивности  $J_0$ . Это позволяет вычислять положение диска Маха в струе (рис.5).

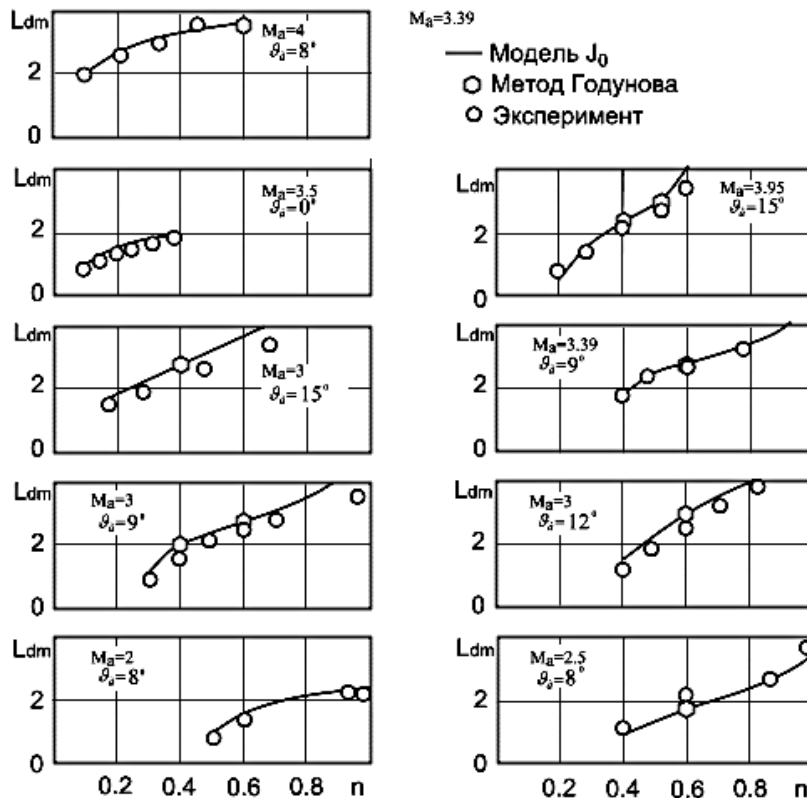


Рис. 5. Расчеты удаления Диска Маха.

**В третьей главе** выполнен анализ режимов течения на характерном графике зависимости  $P_d(P_0)$ . На рис.6. схематично представлены графики зависимости  $P_d(P_0)$  при различных длинах канала. На графиках выделены все экспериментально обнаруженные на данный момент режимы течения и переходные процессы (ПП<sub>i</sub>). Видно, что рис.6 заметно отличается от классического графика  $P_d(P_0)$ , приведенного на рис.2. В основу классификации положены несколько классификационных признаков: Тип донной области (открытая ОДО или закрытая ЗДО), Автомодельность течения (автомодельные АР, неавтомодельные НАР), Характер зависимости  $P_d(t)$  от времени при  $P_0 = \text{const}$  (стационарные, колебательные и переходные ПП<sub>1-4</sub>).

Экспериментально обнаружены три вида низкочастотных колебаний, следующих по мере изменения  $P_0$  друг за другом (составные СК, псевдогармонические ПГК, релаксационные РК).

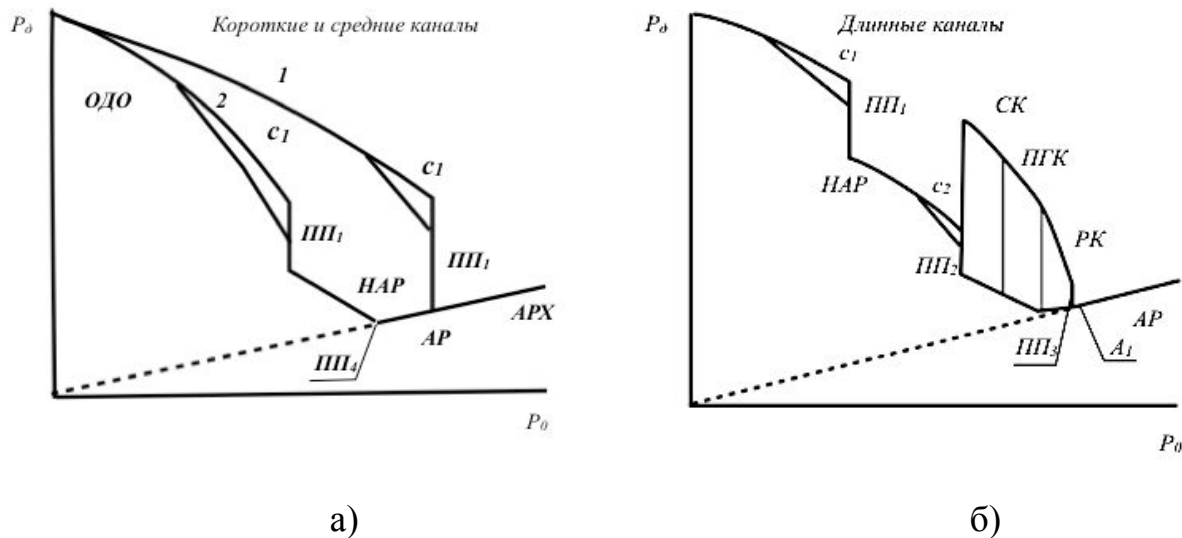


Рис. 6. Режимы течения в канале с внезапным расширением на типичном графике зависимости  $P_d(P_0)$ .

1- короткие каналы, 2-средние каналы.

Построение формальной классификации на основе перестроек функции  $\zeta - P_d$  позволило предсказать существование режимов высокочастотных колебаний  $c_{1,2}$  и отнести их к классу хаотических аттракторов.

**Заключение.** В рамках работы проведено комплексное изучение процесса истечения сверхзвуковой струи в канал с внезапным расширением. Разработана полуэмпирическая модель такого течения. Для проверки выводов разработанной теории проведена серия физических и вычислительных экспериментов. В результате, удалось построить исчерпывающую классификацию режимов, исследовать нестационарные и переходные режимы.

### Публикации автора по теме диссертации

1. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Широкополосный шум сверхзвуковой струи, связанный со скачками уплотнения. IX Научно-Техническая конференция по авиационной акустике. Издательский отдел ЦАГИ, 1989 г., с.48-52.
2. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. О причине возникновения и механизме поддержания расходных колебаний при истечении сверхзвуковой струи в канал с внезапным расширением. // Тезисы докладов Международного симпозиума по отрывным течениям и струям (IUTAM), Новосибирск, июль 1990 г.,

- с.64-66. Bulat P., Zasuhin O., Uskov V. The reason they arise and mechanism for maintaining expendable fluctuations in after supersonic jets on a channel with sudden expansion. IUTAM Symposium. 1990, p.64-66.
3. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Механизмы нестационарных процессов в канале с внезапным расширением. Тезисы докладов XV Всесоюзного семинара по газовым струям, 25-27 сент. 1990 г./ ЛМИ, 1990 г., с. 21.
  4. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. О Взаимосвязи донного давления и шума струи, истекающей из канала с внезапным расширением. Тезисы докладов XV Всесоюзного семинара по газовым струям, Л: ЛМИ, 1990 г., с.21.
  5. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Расчет сжатого слоя сверхзвуковой струи. Тезисы докладов XV Всесоюзного семинара по газовым струям, Л: ЛМИ, 1990 г., с.23.
  6. **Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Формирование струи при плавном запуске сопла Лавалья.// Ученые записки Санкт-Петербургского государственного университета. Серия математических наук. «Газодинамика и теплообмен». Выпуск 10. Течения газов в каналах и струях. СПб, Изд-во СПУ, 1993 г. – с. 1-22.**
  7. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Две формы перехода от колебательного режима к автомодельному в донных течениях каналов.// Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах: Тезисы докладов XVI Всероссийского семинара, СПб, БГТУ, 1997 г., с.17.
  8. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Комплексная методика расчета струи в канале с внезапным расширением при наличии переходных процессов на неавтомодельных режимах. Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах: Тезисы докладов XVIII Международного семинара, 21-23 июня 2000 г., БГТУ, 2000 г., с.48.
  9. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Полная классификация режимов течения с внезапным расширением с учетом нестационарных и переходных процессов. // Прикладные проблемы механики жидкости и газа: Материалы IX международной конференции ученых Украины, России, Белоруссии, 25-29 сент. 2000 г.- Севастополь: Изд-во СевГТУ, 2000 г., с.96.
  10. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Экспериментальное исследование возбуждения колебаний донного давления в канале с внезапным расширением при истечении струи из сопла с  $Ma=1$ . Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах: Тезисы докладов XVIII Международного семинара, 21-23 июня 2000 г., БГТУ, 2000 г., с.52.
  11. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Исследование влияния формы диффузорной части сверхзвукового сопла на режимы течения и акустическое излучение струи. Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах: Тезисы докладов XVIII Международного семинара, 21-23 июня 2000 г., БГТУ, 2000г., с.53.
  12. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Исследование причин оттеснения скачка уплотнения к оси в турбулентной струе. Течения газа и плазмы в соплах,

- струях и следах: Тезисы докладов XVIII Международного семинара, 21-23 июня 2000 г., БГТУ, 2000 г., с.87.
13. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Зональная методика расчета турбулентной струи, истекающей из сопла с числом Маха близким к 1. Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах: Тезисы докладов XVIII Международного семинара, 21-23 июня 2000 г., БГТУ, 2000 г., с.88.
  14. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Полная классификация режимов течения в канале с внезапным расширением с учетом нестационарных и переходных процессов // Прикладные проблемы механики жидкости и газа: Материалы IX международной конференции ученых Украины, России, Белоруссии, 25-29 сент. 2000 г.- Севастополь: Изд-во СевГТУ, 2000 г., с.96.
  15. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Обоснование методики расчета геометрии диска Маха в неизобарической сверхзвуковой струе при помощи теоремы Богаевского. Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах // Прикладные проблемы механики жидкости и газа: Материалы IX международной конференции ученых Украины, России, Белоруссии, 25-29 сент. 2000 г.- Севастополь: Изд-во СевГТУ, 2000 г., с.97.
  16. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Зональная методика расчета первой бочки сверхзвуковой турбулентной струи с выделением разрывов и интегральной моделью слоев смешения на границе и за диском Маха.// Прикладные проблемы механики жидкости и газа: Материалы IX международной конференции ученых Украины, России, Белоруссии, 25-29 сент. 2000 г.- Севастополь: Изд-во СевГТУ, 2000 г., с.98.
  17. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Газодинамика и акустика сверхзвуковых струй, истекающих в канал с внезапным расширением. // Современные проблемы неравновесной газодинамики. БГТУ. 2002 г., с.136-158.
  18. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Зональная методика расчета сверхзвуковой турбулентной струи с выделением разрывов и интегральной моделью слоев смешения на границе и за диском Маха. Расчет за пределами первой бочки. //Тезисы докладов IV Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ-2002)/ XIX Международного семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям, СПб, 2002 г. – М.: Изд-во МАИ., с. 110-111.
  19. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Расчет течения за отраженным скачком в нерасчетной сверхзвуковой турбулентной струе. //Тезисы докладов IV Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ-2002)/ XIX Международного семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям, СПб, 2002 г. – М.: Изд-во МАИ., с. 113-114.
  20. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Расчет донного давления в канале на автомодельном режиме с помощью обобщенной модели присоединения вязко – невязкого сверхзвукового потока к стенке. //Тезисы докладов IV Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях

- (NPNJ-2002)/ XIX Международного семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям, СПб, 2002 г. – М.: Изд-во МАИ., с 112 – 113.
21. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. О дополнении классификации режимов течения с внезапным расширением и природе случайных колебаний струи в канале. Тезисы докладов XX Международного семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям, СПб: ИПЦ СПбГУТД, 2004 г., с.37-38.
  22. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. О детерменистском подходе к изучению тонкой структуры колебательных режимов течения с внезапным расширением. Тезисы докладов XX Международного семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям, СПб: ИПЦ СПбГУТД, 2004 г., с.39-40.
  23. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. О переходном процессе, сопровождающем окончание релаксационных автоколебаний донного давления  $P_d$  в канале с внезапным расширением. Тезисы докладов XX Всероссийского семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям, СПб, БГТУ, 2004 г., с.41-42.
  24. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Влияние величины донной области на нестационарные режимы течения сверхзвуковой струи в канале. Тезисы докладов XX Всероссийского семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям, СПб, БГТУ, 2004 г., с.43-44.
  25. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Влияние величины донной области на нестационарные режимы течения сверхзвуковой струи в канале. Тезисы докладов XX Всероссийского семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям, СПб, БГТУ, 2004 г., с.43-44.
  26. Булат П.В., Засухин О.Н., Дувалов С.В. Фронтное устройство с газодинамической стабилизацией горения. Струйные, отрывные и нестационарные течения: XXII юбилейный семинар с международным участием. 22-25 июня 2010 г. Санкт-Петербург: тезисы докладов/Балт.гос.техн.ун-т; СПбГУ.-СПб, 2010 г., с.24.
  27. П.В.Булат, О.Н.Засухин. Теория саморегулируемого подшипника. Струйные, отрывные и нестационарные течения: XXII юбилейный семинар с международным участием. 22-25 июня 2010 г. Санкт-Петербург: тезисы докладов/Балт.гос.техн.ун-т; СПбГУ.-СПб, 2010 г., с.32.
  28. П.В.Булат, О.Н.Засухин, В.Н.Усков. О качественной природе гистерезисных явлений при истечении сверхзвуковых струй в канал с внезапным расширением. Струйные, отрывные и нестационарные течения: XXII юбилейный семинар с международным участием. 22-25 июня 2010 г. Санкт-Петербург: тезисы докладов/Балт.гос.техн.ун-т; СПбГУ.-СПб, 2010 г, с.34-36.
  29. П.В.Булат, О.Н.Засухин, В.Н.Усков. Анализ характера нестационарных процессов на режимах истечения в канал с открытой донной областью. Струйные, отрывные и нестационарные течения: XXII юбилейный семинар с международным участием. 22-25 июня 2010 г. Санкт-Петербург: тезисы докладов/Балт.гос.техн.ун-т; СПбГУ.-СПб, 2010 г., с.114-117.

30. П.В.Булат, О.Н.Засухин, В.Н.Усков. Газодинамический модуль для управления струйными течениями. Струйные, отрывные и нестационарные течения: XXII юбилейный семинар с международным участием. 22-25 июня 2010 г. Санкт-Петербург: тезисы докладов/Балт.гос.техн.ун-т; СПбГУ.-СПб, 2010 г., с.243.
31. П.В.Булат, С.А.Дубровин и др. Повышение экономической эффективности и уменьшение энергозатрат на нефтяных и газовых промыслах за счет внедрения системы рекуперации энергии на сетях технологических водопроводов. СПб, СПбТЭИ, 2010 г., с.62-66.
32. П.В.Булат, С.А.Дубровин и др. Экономический эффект внедрения саморегулируемого подшипника на газоперекачивающих агрегатах. Сборник трудов Всероссийской научной школы для молодежи «Реализация стратегических приоритетов России в трансграничном инновационном пространстве». СПб, СПбТЭИ, 2010 г., с. 67-69.
33. 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. БГТУ, 2011 г., с.33-44.
34. П.В.Булат, О.Н.Засухин, Н.В.Продан. Влияние эксцентricности расположения сопла в канале на газодинамические, акустические параметры струйных течений и возникающие УВС. (Библиотека журнала "Военмех. Вестник БГТУ", №12). Пятые Уткинские чтения: Труды Международной научн.-техн. конф. / Балт. гос. техн. ун-т. - СПб.; 2011 г., с 141-143 с.
35. Булат П.В., Засухин О.Н., Продан Н.В. История экспериментальных исследований донного давления. **Фундаментальные исследования, №12 (часть 3). 2011 г., с. 670-674.**
36. Булат П.В., Засухин О.Н., Продан Н.В. Колебания донного давления. **Фундаментальные исследования, №3 (часть 3). 2012 г., с. 204-207.**