

На правах рукописи



ДУШИН НИКОЛАЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ВОЗБУЖДЕНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПОТОКА
В РАЗВЕТВЛЕННОМ КАНАЛЕ**

Специальность: 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань, 2010

Работа выполнена в Исследовательском центре проблем энергетики Казанского научного центра РАН и Казанском государственном техническом университете им. А.Н.Туполева

- Научный руководитель – доктор технических наук
Н.И. Михеев
- Официальные оппоненты – доктор технических наук
Г.А. Глебов;
- кандидат физико-математических наук, доцент Л.А. Ткаченко
- Ведущая организация – ОАО «Казанское опытное конструкторское бюро «Союз».

Защита состоится “24” ноября 2010 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.079.02 при Казанском государственном техническом университете им. А.Н.Туполева по адресу: 420111, г.Казань, ул. К.Маркса, 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КГТУ им.А.Н. Туполева.
Электронный вариант автореферата размещен на сайте Казанского государственного технического университета им. А.Н.Туполева (www.kai.ru).

Автореферат разослан 21 октября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



А.Г. Каримова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Возбуждение автоколебаний потока часто встречается в технических устройствах, работа которых связана с движением жидкости или газа (трубопроводный транспорт, теплообменное оборудование, камеры сгорания, паро-водорегулирующая аппаратура и т.д.). В некоторых инженерных приложениях возбуждение автоколебаний потока рассматривается как благоприятное явление, способствующее интенсификации процессов теплообмена, добычи нефти или горения, но в большинстве случаев оно является нежелательным процессом, который приводит к возникновению вибраций, усталостному разрушению конструкций, излучению шума и возрастанию силы сопротивления.

На сегодняшний день выполнено много работ по изучению механизмов возбуждения акустических колебаний потока и возможностям управления ими, но подавляющее большинство исследований посвящено истечению турбулентных струй и обтеканию препятствий разнообразной конфигурации свободными струями. Между тем, задача самовозбуждения автоколебаний потока в каналах с различной геометрией проточной части является не менее важной. Перенос известных механизмов возбуждения автоколебаний для свободных потоков на течение в каналах нужно осуществлять с большой осторожностью, а в случае значительного влияния стенок канала на структуру потока и распространение звуковых волн подобный перенос вообще недопустим. Последнее обстоятельство в совокупности с недостаточным для решения многих практических задач объемом информации указывает на необходимость исследования механизмов генерации автоколебаний потока в каналах. Результаты таких исследований могут быть востребованы, например, при решении задач, связанных с учетом энергоносителей. Известно, что пульсации потока рассматриваются в качестве одной из основных причин дисбаланса при измерении расхода. Дополнительная погрешность измерения расхода от влияния потока может достигать 25%, а для некоторых типов узлов учета даже 80%.

Применение численных методов исследования при решении подобных задач имеет определенные сложности, связанные с недостатком данных о механизмах взаимодействия турбулентности с акустическими колебаниями потока. Понимание этих механизмов особенно важно в случае разветвленных каналов, где взаимодействие вышеперечисленных факторов является основной причиной возникновения автоколебаний потока.

Таким образом, выявление закономерностей возникновения резонансных явлений в каналах с разветвлениями и механизмов, обуславливающих эти закономерности, является в настоящее время весьма актуальной задачей.

Цель и задачи исследования.

Целью работы является выявление условий и механизмов возбуждения автоколебаний потока в разветвленном канале.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка экспериментальных установок для исследования закономерностей генерации автоколебаний потока и структуры потока в каналах с различной геометрией разветвления.

2. Получение, систематизация, анализ и обобщение экспериментальных данных по возбуждению автоколебаний потока в разветвленном канале в широком диапазоне сочетаний геометрических параметров области разветвления и гидродинамических параметров потока.

3. Выявление влияния геометрии разветвления канала и параметров потока на формирование вихревых структур в области горла отвода.

4. Анализ механизмов взаимодействия турбулентности с акустическими характеристиками бокового отвода и основного канала.

Научная новизна:

1. Созданы оригинальные экспериментальные установки, позволяющие:

– проводить измерения акустических характеристик потока в разветвленном канале различной конфигурации в широком диапазоне чисел Рейнольдса;

– исследовать структуру и динамику потока в области разветвления канала.

2. Установлено, что в разветвленном канале реализуется немонотонная резонансная кривая, характерная для системы связанных резонаторов, с несколькими локальными максимумами при близких числах Струхала. При этом частота автоколебаний всегда соответствует одной из собственных частот акустических колебаний в отводе, а амплитуда пульсаций давления на торце отвода чувствительна к степени заглубления и углу установки отвода.

3. Получены данные о безразмерных резонансных частотах для разветвленного канала. Автоколебания потока возбуждаются в диапазоне чисел Струхала от 0,45 до 0,75, вычисленного по диаметру горла отвода и средней скорости его обтекания.

4. Выявлен механизм возбуждения автоколебаний потока в разветвленном канале.

Практическая и научная значимость. Полученные результаты углубляют современные представления о механизмах взаимодействия турбулентности с акустическими характеристиками каналов, повышают надежность и достоверность прогнозирования нестационарных процессов в энергетике и энергомашиностроении.

Результаты работы использованы в отчетах по грантам Президента РФ (НШ-4334.2008.8), РФФИ (09-08-00597, 10-08-00426), по контрактам с ФАНИ (02.740.11.0071, 02.518.11.7101). С использованием результатов работы решена практическая задача по моделированию нестационарных процессов и выявлению механизмов возбуждения автоколебаний потока в газотранспортной системе на объекте «Мыс Каменный» МП «Ямалгаз».

Рекомендации по использованию результатов. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании трубопроводного транспорта, теплообменного оборудования и энергетических установок, а также при анализе причин автоколебаний потока в подобных системах и дисбаланса при учете энергоносителей.

Автор защищает:

1. Специализированные экспериментальные установки, предназначенные для исследования закономерностей генерации автоколебаний потока и структуры потока в каналах с различной геометрией разветвления.

2. Результаты экспериментальных исследований резонансных явлений в разветвленном канале с заглушенным отводом при различных геометрических и гидродинамических условиях в области разветвления.

3. Механизм взаимодействия турбулентности с акустическими характеристиками разветвленного канала.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных методов и аттестованных средств измерения параметров потока, оценкой погрешности измерений, удовлетворительным согласованием результатов тестовых экспериментов с данными других авторов, согласованием данных, полученных при различных параметрах потока, при их обобщении в безразмерном виде и числах подобия.

Личный вклад автора.

Автором разработаны оригинальные экспериментальные установки, предназначенные для исследования закономерностей генерации автоколебаний потока и структуры потока в каналах с различной геометрией разветвления, освоены и апробированы методы визуализации и акустических измерений, проведены все эксперименты, обработаны и обобщены результаты исследований. Анализ полученных результатов исследований выполнен под руководством д.т.н. Н.И.Михеева.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на Ежегодных аспирантских научных семинарах Исследовательского центра проблем энергетики КазНЦ РАН, 2007-2010 г.г.; VI Школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова, 2008 г.; X Всероссийской школеконференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Новосибирск, 18-21 ноября 2008 г.; Итоговой научной конференции КазНЦ РАН за 2008 год; XXI Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», Казань 12-14 мая 2009г.; XVII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в аэрокосмических технологиях». 25-29 мая, 2009 г., г. Жуковский; Итоговой научной конференции КазНЦ РАН за 2009 год; VII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова, 2010 г.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 20 работ. Три работы опубликованы в рекомендуемых ВАК журналах.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, выводов и списка

использованной литературы. Работа изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 57 рисунков, 5 таблиц. Список использованной литературы включает 106 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, перечислены основные положения, которые выносятся на защиту, показан личный вклад соискателя в приведенные в диссертации результаты.

В первой главе анализируются имеющиеся в литературе результаты исследований. Констатируется, что для моделирования вынужденных колебаний потока в каналах существуют достаточно надежные методы. Однако развитие методов прогнозирования автоколебаний потока, инициируемых самим потоком, сдерживается малой изученностью механизмов взаимодействия генерации турбулентности в каналах с их акустическими свойствами. На основе литературных данных отмечается актуальность этой проблемы для энергоустановок (Митрофанова О.В., Глебов Г.А., Павлов Г.И.), газотранспортных систем (Фарфурин А.В.), теплообменных аппаратов (Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В.) и некоторых других областей техники. Особое внимание уделено системам с наличием разветвленных каналов как весьма распространенным в технике. В связи с малой изученностью механизмов возбуждения автоколебаний потока в каналах диссертантом выделяются ближайшие области исследований, результаты которых можно использовать для достижения поставленной в работе цели. На основе результатов изучения генерации автоколебаний потока в различных полостях, обтекаемых свободными струями и безграничным потоком (Блохинцев Д.И., Rockwell D., Naudascher E.), делаются выводы о существовании большого количества факторов, определяющих возбуждение автоколебаний потока (влияние формы и расположения полости в пространстве, наличие обратной связи и т.п.), а также реализации различных механизмов возбуждения в зависимости от соотношения геометрических размеров полости. Показывается возможность сочетания механизмов генерации автоколебаний и влияние этого сочетания на общий характер колебаний. Отмечается, что в случае обтекания полостей потоком, ограниченным жесткими стенками (разветвленные каналы), появляются дополнительные факторы, которые могут влиять на генерацию автоколебаний потока (диффузность акустического поля, зависимость размера вихрей от величины заглубления кромок горла отвода в канал и т.д.). На основе проведенного анализа литературы и актуальности темы исследования делаются выводы о необходимости проведения экспериментальных исследований механизмов возбуждения акустических колебаний в разветвленных каналах.

Во второй главе приведено описание разработанных автором экспериментальных установок для исследования закономерностей генерации автоколебаний потока и структуры потока в каналах с различной геометрией разветвления, представлены данные об объекте исследования, рабочих участках, экспериментальном оборудовании и средствах измерения, методике проведения исследо-

ваний, выполнена оценка погрешности измерений физических величин, представлены результаты тестовых экспериментов.

Экспериментальная установка, предназначенная для исследования закономерностей генерации автоколебаний потока (рис.1) позволяла проводить измерения акустических параметров потока в широком диапазоне изменения чисел Рейнольдса. Ее конструктивной особенностью являлась возможность варьирования угла установки отвода и величины заглубления кромок горла отвода в проточную часть канала. При разработке также удалось выполнить требования по уровню фонового шума, который не должен был превышать значений, типичных для безотрывного турбулентного пограничного слоя.

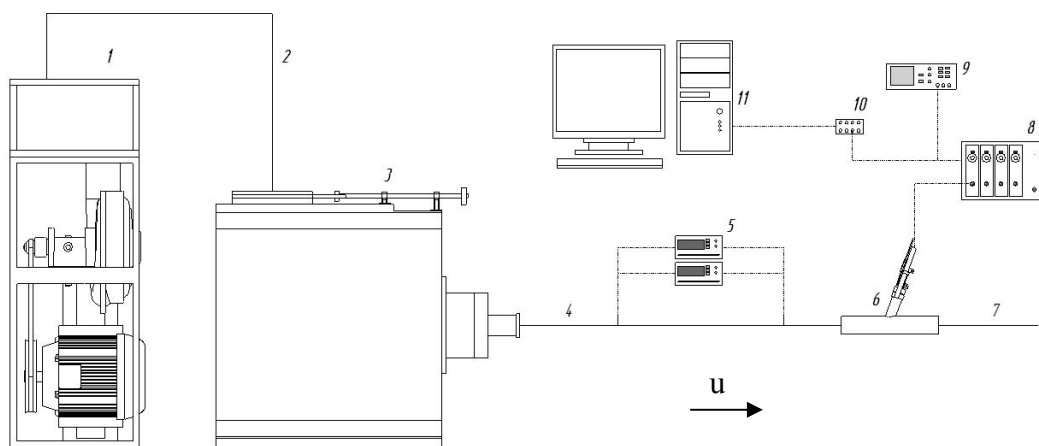


Рис.1. Схема экспериментальной установки для исследования закономерностей генерации автоколебаний потока

Основным элементом установки являлся рабочий участок 6 (рис.1) в виде тройника с диаметром основного канала 47 мм и боковым отводом 6 (рис.2), выполненным в виде отрезка трубы диаметром 18×1 мм и длиной 600 мм. На отводе закреплялись два координатных устройства 7 и 9. Одно из них служило для перемещения горла отвода относительно стенки основного канала, другое – поршня 12 с микрофоном 8.

Движение воздуха в рабочем участке осуществлялось за счет нагнетания, создаваемого двухступенчатым осевым компрессором 1 (рис.1), на выходе которого устанавливался диссипативный глушитель. Пульсации потока, возникающие от вибрации соединительной магистрали 2, сглаживались в ресивере 3.

Скорость потока в рабочем участке варьировалась в диапазоне от 0 до 40 м/с при помощи шиберной заслонки, установленной во входном сечении ресивера. Измерение скорости потока выполнялось по пе-

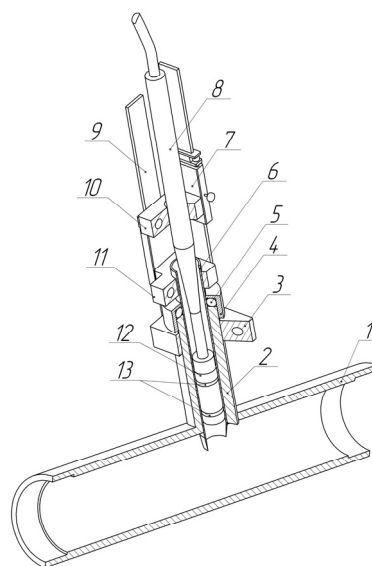


Рис.2. Схема рабочего участка

репаду статического давления, измеряемому набором параллельно подключенных приборов ПРОМА-ИДМ 5.

Измерение частоты и амплитуды пульсаций давления выполнялось с использованием акустической аппаратуры RFT 8, включающей в себя набор конденсаторных микрофонов и необходимые усилители. Сбор опытных данных осуществлялся при помощи автоматизированной системы, состоящей из компьютера 11 с необходимым программным обеспечением и аналого-цифрового преобразователя 10 модели L-CARD L-761.

Для визуального исследования структуры и динамики потока создана экспериментальная установка, схема которой показана на рис.3. Ввиду ограничений на динамику наблюдаемых процессов при визуализации течения процессы были переведены в сравнительно низкочастотную область. Для этого отвод был заменен резонатором Гельмгольца 1 (рис.3) с предвключенным участком длиной 100 мм. Такая замена позволила значительно сократить габаритные размеры резонатора, необходимого для воспроизведения широкого диапазона чисел Струхала при низких скоростях потока. Регулирование объема резонатора

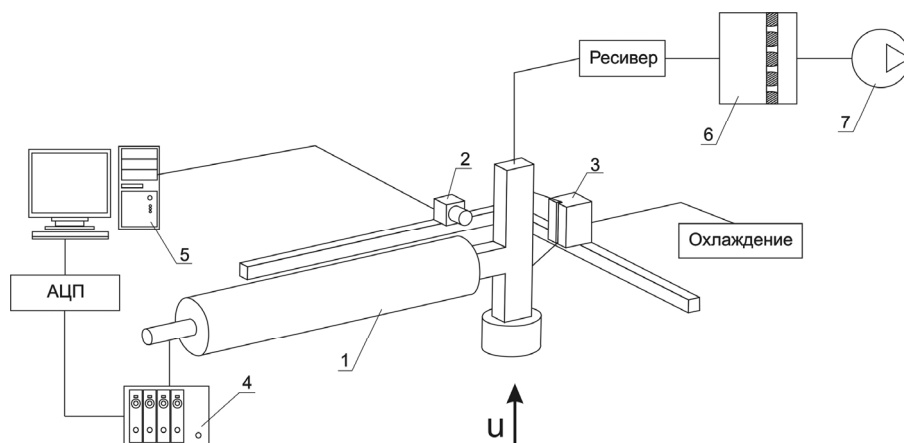


Рис.3. Схема экспериментальной установки для исследования структуры потока

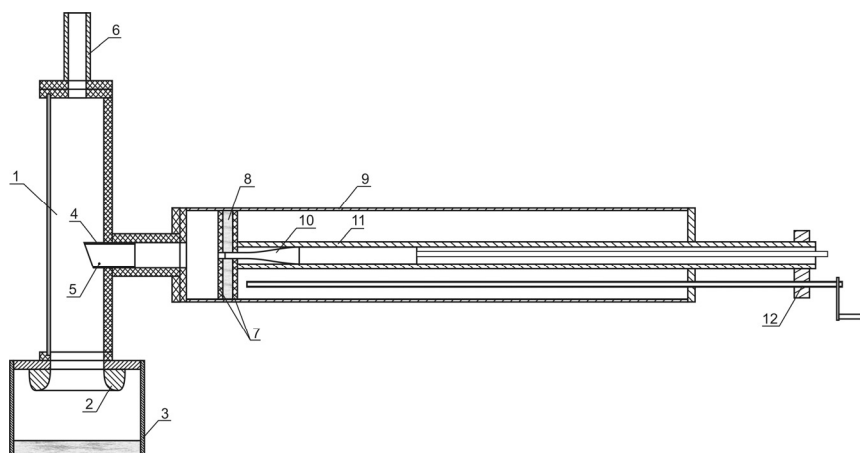


Рис.4. Схема экспериментального участка

осуществлялось поршнем 7 с войлочным уплотнением 8 (рис.4). Для фиксации резонансных режимов при проведении исследований в поршень был вмонтирован микрофон 10, подключенный к акустической аппаратуре 4 (рис.3). Измене-

ние угла обтекания отвода и значения заглубления кромок горла отвода достигалось применением специальных вставок 4 (рис.4), устанавливаемых в области разветвления.

Движение воздуха в тракте установки создавалось при помощи вакуумного насоса 7 (рис.3). Расход регулировался набором поверенных критических сопел, устанавливаемых в сопловой блок 6.

Визуализация течения выполнялась методом «дымящейся» проволоочки. Для получения картины течения на границе горла отвода проволоочка 5 (рис.4) устанавливалась внутри вставок в области передней кромки. Фиксация структуры и динамики потока проводилась через светопрозрачные стенки с использованием светового ножа 3 (рис.3) и скоростной цифровой видеокамеры Fastec HiSpec 2. Скорость съемки составляла 500 кадров/с. Анализ получаемых видеороликов проводился в покадровом режиме.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований резонансных явлений в разветвленном канале с заглушенным отводом. Исследования проводились при:

- скорости потока u , изменяющейся от 25 до 40 м/с;
- углах установки отвода α : 60° ; 70° ; 80° и 90° ;
- отсутствии заглубления кромок горла отвода в основной канал (нижняя по потоку кромка находится заподлицо со стенкой канала) и значениях относительной величины заглубления передней (верхней по потоку) кромки горла отвода H/R : 0; 0,085; 0,21; 0,43; 0,64; 0,85;
- длине отвода $L_{отв}$, изменяющейся от 20 до 550 мм с шагом 1 мм.

Схема канала с указанием варьируемых параметров представлена на рис.5.

Выполнены эксперименты при малой длине отвода ($L_{отв}/d = 1,3$). В этом случае собственная частота колебаний отвода была заведомо выше характерных частот формирования вихрей в области горла отвода. При этом амплитуда пульсаций давления, связанных с формированием вихрей, резонатором не усиливается, т.е. фиксируется практически без искажений. Полученные для такого случая результаты сопоставлены с известными данными Рокуэлла и Этембабаоглу для полостей, расположенных на пластине. Показано, что в отсутствие резонанса в области характерных частот пульсаций давления, установленных Рокуэллом и Этембабаоглу, в отводе наблюдается превышение амплитуды колебаний над общим фоном (рис.6). Число Струхалия $Sh=fd/u$ оценивалось по средней скорости потока в сечении передней кромки горла отвода с учетом загромождения сечения основного канала отводом. При этом профиль скорости по поперечному сечению канала ввиду его неоднозначности, связанной с искажением в области обтекания отвода, не учитывался. Отмечается, что бóльшие значения числа Струхалия соответствуют бóльшим значениям величины заглубления передней кром-

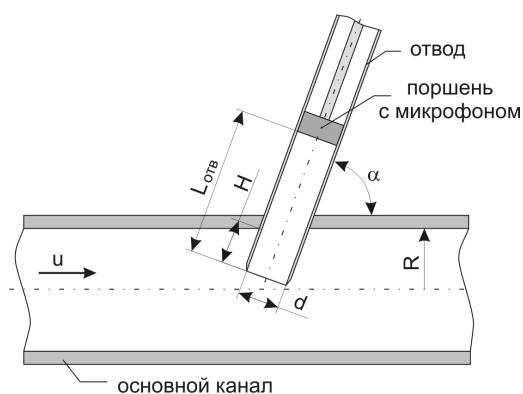


Рис.5. Схема разветвления канала

ки горла отвода, что, по-видимому, связано с увеличением местной скорости потока по отношению к среднерасходной скорости в этом сечении.

Далее длина отвода с шагом 1 мм увеличивалась до 550 мм. Показано, что увеличение длины полости отвода $L_{отв}$ при некоторых положениях поршня сопровождается возникновением резонансных явлений. Установлено, что во всех случаях на дне полости возбуждаются колебания на одной из резонансных мод отвода (рис.7).

Приведены результаты анализа полученных опытных данных по влиянию геометрических параметров области разветвления на возбуждение автоколебаний потока в отводе. Установлено, что заглабление передней кромки горла отвода сопровождается появлением на резонансной кривой нескольких пиков с неодинаковыми, но довольно близкими значениями безразмерных частот колебаний (рис.8). При построении резонансных кривых применялся узкополосный

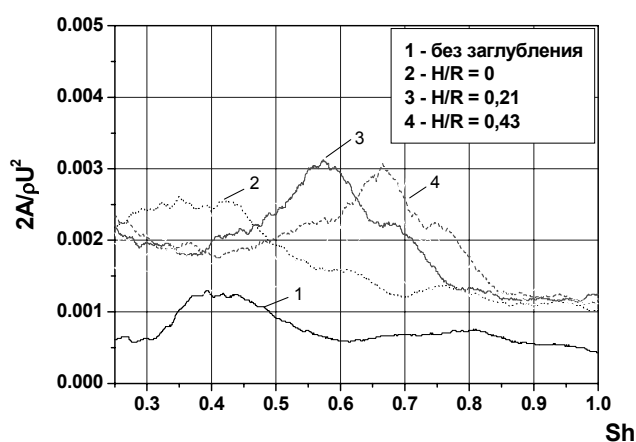


Рис.6. Спектры на безрезонансных режимах:
 $\alpha = 60^\circ$, $u = 30$ м/с

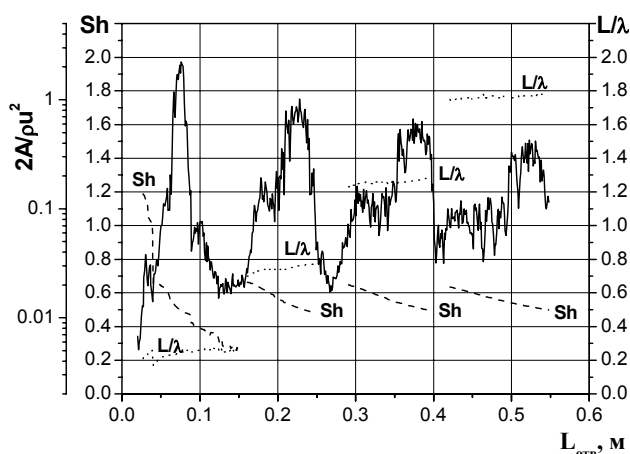


Рис.7. Зависимость параметров пульсаций потока от длины полости отвода при $\alpha = 60^\circ$, $u = 30$ м/с, $H/R = 0,43$

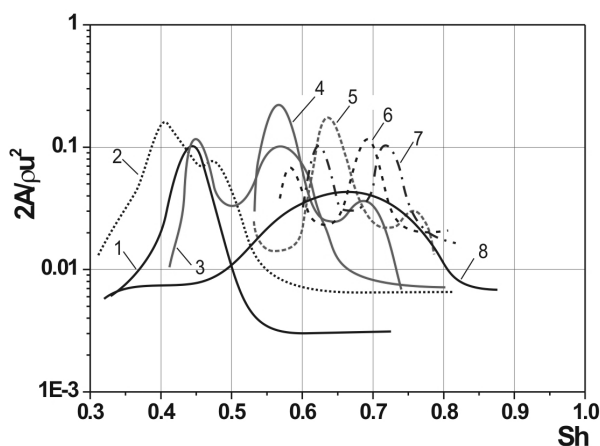


Рис.8. Резонансные кривые при различных значениях заглабления кромок горла отвода.

1 – в отсутствие заглабления кромок;
2 – $H/R = 0$; 3 – 0,085; 4 – 0,21; 5 – 0,43;
6 – 0,64; 7 – 0,85; 8 – отвод, обтекаемый неограниченным потоком. $\alpha = 80^\circ$, $u = 30$ м/с

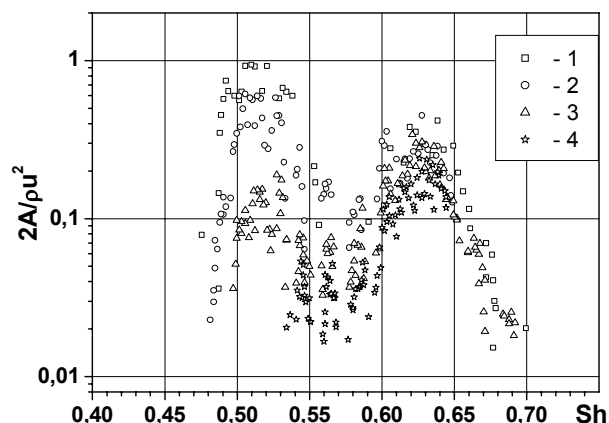


Рис.9. Зависимость формы резонансной кривой от номера гармоники: 1, 2, 3, 4 – номера гармоник; $\alpha = 70^\circ$, $u = 30$ м/с, $H/R = 0,43$

фильтр. Отмечается, что пики на резонансной кривой точно соответствуют значениям собственных частот отвода независимо от номера гармоники (рис.9).

Приводятся результаты измерений пульсаций давления в отводе, обтекаемом неограниченной струей (линия δ на рис.8). Констатируется, что форма резонансных кривых для разветвленного канала существенно отличается от формы, имеющей место при обтекании полостей неограниченным потоком, где резонанс (по данным Д.И. Блохинцева) наблюдается в окрестности только одной частоты, а выявленный характер поведения этой кривой является типичным

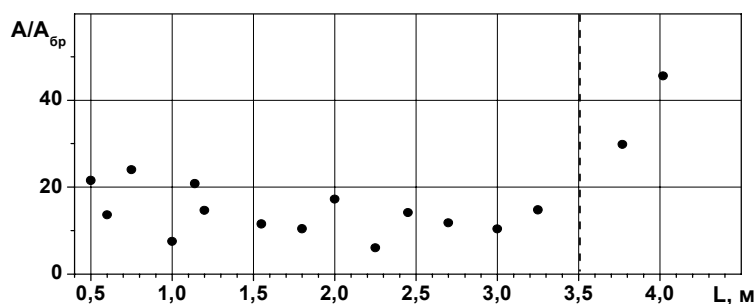


Рис.10. Коэффициент усиления амплитуды пульсаций давления по длине основного канала при $\alpha = 70^\circ$, $H/R = 0$, $u = 30$ м/с, $L_{\text{отв}} = 100$ мм. Штриховая линия - сечение установки отвода

для связанных резонаторов. В этом случае механизмами возбуждения резонанса могут служить либо обратное воздействие пульсаций на кинематическую структуру потока в горле отвода, либо влияние основного канала, который тоже является резонатором.

Для основного канала рассмотрен процесс распространения колебаний потока между горлом отвода и открытым концом основного канала. Известно, что в такой системе возникают стоячие волны с узлом давления, находящимся на открытом конце канала. Применимость этого утверждения к исследуемому случаю подтверждается результатами измерений распределения амплитуды пульсаций давления по длине основного канала (рис.10). Характер изменения коэффициента усиления (отношения измеряемой амплитуды к амплитуде, измеренной при отсутствии резонанса) по длине канала близок к периодическому, что свидетельствует о волновой структуре потока в основном канале.

Установлено, что все пики на резонансных кривых соответствуют частотам колебаний волн в основном канале, при которых исследуемый отвод попадает в пучность давления.

Для выявления кинематической структуры проведена визуализация течения. Исследования проводились при скорости потока 3 м/с в прямоугольном канале поперечным сечением 60×30 мм с боковым отводом сечением 30×30 мм, что по числам Рейнольдса соответствовало условиям проведения описанных выше экспериментов. Установлено, что при натекании потока на переднюю кромку горла отвода в сдвиговом слое формируются вихри, частота следования которых при резонансе совпадает с собственной частотой колебаний отвода и отличается строгой упорядоченностью. При изменении чисел Струхала кинематическая структура потока в горле отвода не претерпевает какой-либо существенной перестройки.

Из этого можно предположить, что в основе установленного поведения резонансной кривой, характерной для разветвленного канала, лежит совместное

влияние двух резонаторов, одним из которых является заглушенный отвод, другим – основной канал.

Делается вывод, что течение в разветвленном канале необходимо рассматривать как систему связанных резонаторов. При этом механизм возбуждения автоколебаний потока представляется следующим образом: при обтекании горла отвода формируются регулярные вихри, частота формирования которых определяется скоростью потока и поперечным размером горла отвода.

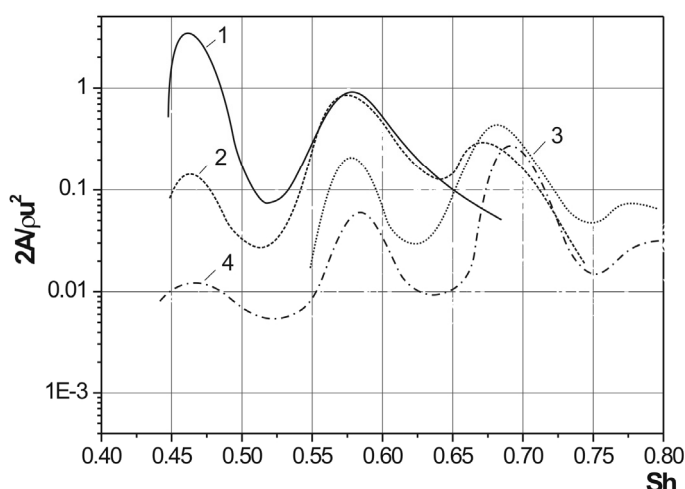


Рис.11. Резонансные кривые для различных углов установки отвода α при $H/R = 0,64$: 1 – 60° ; 2 – 70° ; 3 – 80° ; 4 – 90° . $u = 30$ м/с

Наиболее восприимчивыми к этим возмущениям являются колебания в отводе. При совпадении частоты формирования вихревой структуры в горле отвода с собственной частотой колебаний отвода происходит заметное усиление амплитуды пульсаций давления, и уже сам отвод является

источником колебаний для основного канала. Далее, в основном канале возбуждается волна, частота колебаний которой определяется частотой пульсаций в отводе, и от того, куда попадает источник колебаний (горло отвода) – в узел, пучность или промежуточное положение, – зависит дальнейшее усиление амплитуды колебаний во всей системе. Попадание источника колебаний в пучность благоприятно с точки зрения «раскачки» потока.

Приводятся результаты оценки влияния геометрических параметров области разветвления на амплитуду колебаний потока. Выявлена чувствительность амплитуды пульсаций давления к углу установки отвода и величине заглубления передней кромки горла отвода в поток. Уменьшение угла установки отвода сопровождается увеличением амплитуды пульсаций давления (рис.11). Такое поведение, следуя Д.Рокуэллу, можно объяснить усилением возмущений, генерируемых на передней кромке, за счет колебаний, возникающих при натекании вихревой структуры на заднюю кромку и передающихся вверх по потоку.

Влияние величины заглубления передней кромки горла отвода связывается с натеканием на кромку потока с различным градиентом скорости по нормали к стенке основного канала.

Отмечается, что в нескольких случаях резонанса в разветвленном канале амплитуда пульсаций давления превышает значение скоростного напора.

Прослежена динамика процесса обмена массой между отводом и натекающим потоком. Обнаружены «маховые» движения линии тока вблизи передней кромки, которые происходят вследствие выброса массы газа из полости отвода. При повышении резонансной частоты амплитуда «маховых» движений уменьшается, что связано с уменьшением размера вихрей.

Приводится иллюстрация процесса взаимодействия вихрей с задней кром-

кой горла отвода в зависимости от угла атаки, который, как было отмечено выше, определяет возникновение обратной связи (рис.12).

Отмечается, что степень усиления амплитуды колебаний с увеличением номеров мод собственных колебаний в боковом отводе и основном канале снижается медленно. Для технических приложений это означает повышение вероятности возбуждения автоколебаний потока в широком диапазоне их длин, если при обтекании горла отвода создаются условия для формирования регулярных вихрей (число Струхалия находится в диапазоне 0,45-0,75).

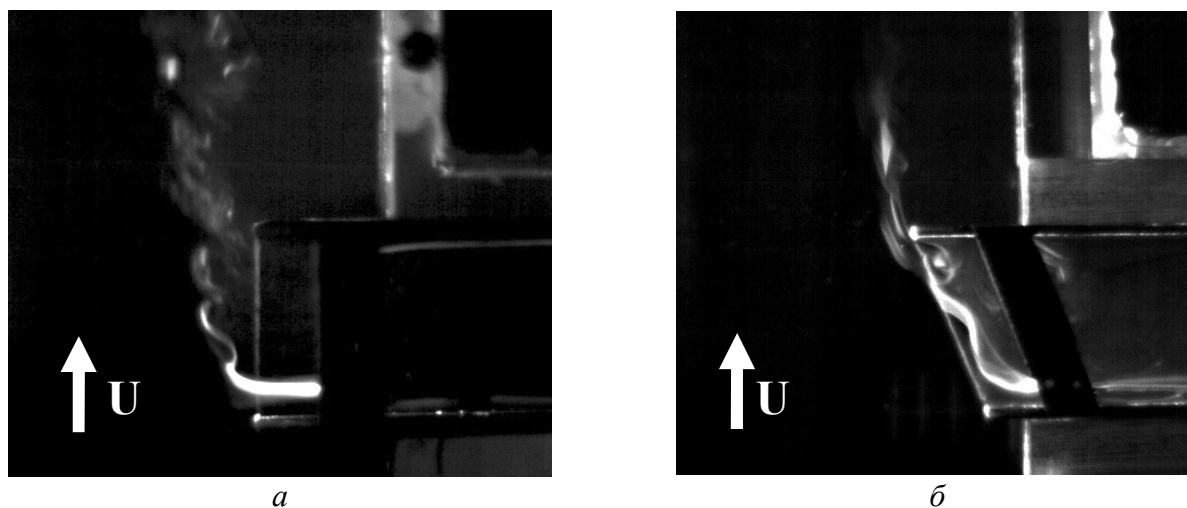


Рис.12. Взаимодействие вихревых структур с задней кромкой горла отвода

Выводы:

1. Созданы оригинальные экспериментальные установки, на которых изучены условия и механизмы возбуждения автоколебаний потока в разветвленном канале с заглушенным отводом.

2. Экспериментами, выполненными в широком диапазоне изменения скорости потока, угла установки и степени заглубления бокового отвода в основной канал, установлено, что резонансные автоколебания возбуждаются в диапазоне значений чисел Струхалия от 0,45 до 0,75, вычисленного по диаметру горла отвода и средней скорости его обтекания.

3. Экспериментально установлено, что в разветвленном канале реализуется немонотонная резонансная кривая, характерная для системы связанных резонаторов, с несколькими локальными максимумами при близких числах Струхалия. При этом частота автоколебаний всегда соответствует одной из собственных частот акустических колебаний в отводе.

4. Выявлено влияние геометрических параметров области разветвления на амплитуду пульсаций давления. Зафиксированный в экспериментах абсолютный максимум амплитуды превысил величину скоростного напора в основном канале, что свидетельствует об усилении колебаний в системе связанных резонаторов на 3 порядка по отношению к безрезонансным режимам.

5. Экспериментами в безрезонансном канале и визуализацией потока в окрестности горла отвода установлено, что механизм возбуждения автоколебаний потока связан с вихрями, формирующимися при обтекании горла отвода с безразмерной частотой вблизи $Sh=0,65$. При близости этой частоты к значению для какой-либо моды колебаний в отводе возмущения от вихрей усиливаются с возможным обратным воздействием на процесс формирования вихрей. Сам отвод становится источником колебаний потока в основном канале, усиление которых зависит от степени близости частоты колебаний к одной из резонансных частот канала и положения горла отвода относительно фазы волны.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

A – амплитуда пульсаций давления; $A_{бр}$ – амплитуда пульсаций давления на безрезонансном режиме; c – скорость звука; d – внутренний диаметр отвода; f – частота; H – величина заглубления передней кромки горла отвода; L – длина канала; $L_{отв}$ – длина отвода; R – внутренний радиус основного канала; Sh – число Струхалия; u – среднерасходная скорость потока; α – угол установки отвода (угол атаки); ρ – плотность.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1. Душин Н.С. Экспериментальное исследование развитого турбулентного течения в круглой трубе с периодическими пульсациями расхода. Часть 1. Потери давления и резонансные явления / Молочников В.М., Давлетшин И.А., Душин Н.С. и др. // Известия РАН. Энергетика. 2005. №6. С.25-31.

2. Душин Н.С. Экспериментальное исследование развитого турбулентного течения в круглой трубе с периодическими пульсациями расхода. Часть 2. Пространственно-временная структура течения / Молочников В.М., Давлетшин И.А., Душин Н.С. и др. // Известия РАН. Энергетика. 2005. №6. С.115-121.

3. Душин Н.С. Моделирование нестационарных процессов в газотранспортных системах / Михеев Н.И., Кратиров Д.В., Душин Н.С. // Газовая промышленность. 2010. №3. С.50-52.

Работы, опубликованные в других изданиях:

4. Душин Н.С. Структура турбулентного течения в трубе в условиях гидродинамической нестационарности потока / Давлетшин И.А., Михеев Н.И., Душин Н.С. и др. // Труды XVII Всерос. межвуз. науч.-техн. конфер. «Электромех. и внутрикамер. процессы в энерг. установках, струйная акустика, диагностика техн. систем, приборы и методы контроля прир. среды, веществ, материалов и изделий». 17 – 19 мая 2005 г., г.Казань. – Казань: Изд-во «Отечество», 2005. С.295-296.

5. Душин Н.С. Пространственно-временная структура турбулентного течения в гладкой трубе в условиях гидродинамической нестационарности потока / Михеев Н.И., Молочников В.М., Душин Н.С. и др. // Тезисы докл. Межд. науч.-

- практ. конфер. «Рабочие процессы и технология двигателей». 23 – 27 мая 2005 г., г. Казань. - Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2005. С.286-288.
6. Душин Н.С. Турбулентное течение в трубе в условиях периодических пульсаций расхода / Давлетшин И.А., Молочников В.М., Душин Н.С. и др. // Материалы Пятой Межд. школы-семинара «Модели и методы аэродинамики». 5 – 14 июня 2005 г., г. Евпатория, Украина. - М.: МЦНМО, 2005. С.91-92
7. Душин Н.С. Влияние наложенных пульсаций потока на характеристики теплообмена в турбулентных течениях в канале / Давлетшин И.А., Михеев Н.И., Душин Н.С. // Материалы 7 Международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики». 5 – 14 июня 2007 г., г. Евпатория, Украина. - М.: МЦНМО, 2007. С. 153-155.
8. Душин Н.С. Структура ламинарного отрыва потока за обратным уступом. Визуализация течения / Михеев Н.И., Молочников В.М., Душин Н.С. // Труды XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под рук-вом академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках». 21 – 25 мая 2007 г., г. С.-Петербург. - М.: Изд. дом МЭИ, 2007. Т. 1. С. 255-258.
9. Душин Н.С. Структура отрыва потока в нестационарных условиях / Душин Н.С., Давлетшин И.А., Душина О.А. и др. // Материалы VI школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении». 16 – 18 сентября 2008 г., г. Казань. - Казань: Изд-во Казанск. гос. ун-та, 2008. С. 186-189.
10. Душин Н.С. Моделирование нестационарных процессов в газопроводе после редуцирования / Душин Н.С. // X Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидродинамики». 18-21 ноября 2008 г., г. Новосибирск. – Новосибирск: Изд-во института теплофизики СО РАН, 2008. С.66-67.
11. Душин Н.С. Изучение возбуждения автоколебаний потока в разветвленных трубопроводах с протоком газа / Душин Н.С., Кратиров Д.В., Михеев Н.И. // Сборник материалов XXI Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». 12-14 мая 2009 г., г. Казань. – Казань: Изд-во «Отечество», 2009. Ч. 2 С.28-29.
12. Душин Н.С. Интенсификация теплообмена в турбулентной отрывной области при наложенных пульсациях внешнего потока / Душин Н.С., Михеев Н.И., Давлетшин И.А. и др. // Тезисы докладов XVII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. «Проблемы газодинамики и теплообмена в аэрокосмических технологиях». 25 – 29 мая 2009 г., г. Жуковский. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. С. 247-248.
13. Душин Н.С. Интенсификация теплообмена в турбулентной отрывной области при наложенных пульсациях внешнего потока / Душин Н.С., Михеев Н.И., Давлетшин И.А. и др. // Труды XVII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. «Проблемы

газодинамики и теплообмена в аэрокосмических технологиях». 25 – 29 мая 2009 г., г. Жуковский. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. С. 45-47.

14. Душин Н.С. Интенсификация теплообмена в турбулентной отрывной области при наложенных пульсациях внешнего потока / Душин Н.С., Михеев Н.И., Давлетшин И.А. и др. // Тепловые процессы в технике. 2009. Т 12. С. 511 – 513.

15. Душин Н.С. Возбуждение автоколебаний потока в разветвленном канале / Душин Н.С., Михеев Н.И. // Материалы Девятой Международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики», 4-14 июня 2009 г., г. Евпатория, Украина. – М.: МЦНМО, 2010. С.71-72.

16. Душин Н.С. Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях (XVII Школа-семинар молодых ученых и специалистов) / Душин Н.С., Душина О.А. // Российско-американский научный журнал «Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент». Казань, Дайтона Бич. – №2 (29), т.14. – 2009.– С.131-143.

17. Душин Н.С. Автоколебания потока в боковом отводе канала / Душин Н.С., Михеев Н.И., Зарипов Д.И.// Материалы Десятой Международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики», 3-12 июня 2010 г., г. Евпатория, Украина. – М.: МЦНМО, 2010. С.66 – 67.

18. Душин Н.С. Влияние геометрии канала в области разветвления на возбуждение автоколебаний потока в отводе / Душин Н.С., Зарипов Д.И., Сорокина Д.Д. // Материалы VII школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении». 15 -17 сентября 2010 г., г. Казань. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2010. С.151 – 154.

19. Душин Н.С. Моделирование шума в каналах / Зарипов Д.И., Душин Н.С., Сорокина Д.Д. // Материалы VII школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении». 15 -17 сентября 2010 г., г. Казань. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2010. С.159 – 162.

20. Душин Н.С. Возбуждение автоколебаний потока в газотранспортных системах / Михеев Н.И., Душин Н.С., Кратиров Д.В. и др. // Труды Пятой Российской национальной конференции по теплообмену в 8 томах. Т. 2 Вынужденная конвекция однофазной жидкости. - М. Издательский дом МЭИ, 2010. – 193 - 196.

Подписано в печать 19.10.10 г. Форм.бум. 60×80 1/16.

Печ.л.1,0. Тираж 100. Заказ №349.

Отпечатано с готового оригинал-макета в ООО «Вестфалика»

г. Казань, ул. Б. Красная, 67. Тел.: 236-62-72
