

Зарипов Динар Ильясович

КОЛЕБАНИЯ ПОТОКА В РАЗВЕТВЛЕННЫХ КАНАЛАХ

Специальность: 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань – 2014

Работа выполнена в Исследовательском центре проблем энергетики Казанского научного центра РАН.

Научный руководитель: Михеев Николай Иванович, д.т.н., профессор // Исследовательский центр проблем энергетики КазНЦ РАН, зав. лаб. ГИТ

Научный консультант: Мазо Александр Бенцианович, д.ф.-м.н. // Казанский Федеральный Университет, доцент каф. Аэрогидромеханики

Официальные оппоненты: Тукмаков Алексей Львович, д.ф.-м.н., профессор // г.н.с. каф. ТиЭМ КНИТУ им. А.Н.Туполева

Зарипов Ринат Герфанович, д.ф.-м.н., профессор // ФГБУН ИММ КазНЦ РАН, зам. дир. по научной работе

Ведущая организация: Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова.

Защита состоится “ 27 ” ноября 2014 г. в 14.30 часов на заседании диссертационного совета 212.081.11 при Казанском (Приволжском) федеральном университете, расположенном по адресу: 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского (Приволжского) федерального университета. Электронный вариант автореферата размещен на сайте <http://www.kpfu.ru>.

Автореферат разослан 15 сентября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к. ф.-м. н., доцент

А.А Саченков.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Нестационарное течение газа или жидкости в разветвленных каналах можно встретить во многих технических системах. Существующие методики расчета АЧХ в разветвленных каналах не позволяют диагностировать весь спектр колебательных движений. Это связано со сложными процессами, протекающими в области разветвления каналов. Ситуацию осложняет изменение АЧХ колебаний при наличии потока. Поэтому разработка расчетных методик моделирования нестационарных течений в трубопроводных системах, позволяющих получить достоверные результаты за короткое время, актуальна для многих инженерных приложений.

Несмотря на привлекательность применения математического моделирования, такой подход ограничен вычислительными ресурсами ЭВМ. Поэтому при моделировании часто прибегают к допущениям, результатом которых является упрощение математической модели, позволяющее решить исходную физическую задачу, но с меньшими вычислительными затратами. Наиболее разумным упрощением является переход к одномерной математической модели. Однако при ее использовании при моделировании течений в разветвленных каналах требуется дополнительное исследование процессов, протекающих в области разветвления.

Целью работы является разработка экономичной методики моделирования нестационарных гидродинамических процессов в трехмерной системе разветвленных каналов и определение влияния гидродинамических и геометрических факторов на АЧХ колебаний потока в такой системе. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка расчетной методики моделирования пространственно-временных параметров дозвукового течения в разветвленных Т-образных круглых каналах при нестационарных граничных условиях, основанной на решении уравнений в одномерной постановке с интегральным учетом особенностей процессов, протекающих в области разветвления.
2. Получение условий сопряжения течений в области разветвления (тройнике), справедливых для дозвуковых течений в широком диапазоне соотношений расходов рабочего тела и поперечных сечений каналов.
3. Постановка и численная реализация граничного условия на входе (выходе) в канал при колебаниях давления в окружающей среде.
4. Изучение влияния численных схем интегрирования и степени дискретизации расчетной области на амплитуду установившихся резонансных колебаний, выбор оптимальных параметров дискретизации расчетной области.
5. Исследование влияния гидродинамических и геометрических факторов, влияющих на АЧХ и волновую структуру колебаний потока в системе разветвленных каналов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных методов и аттестованных средств измерения параметров потока, оценкой погрешности измерений, согласованием результатов моделирования с данными других авторов и с результатами экспериментов. Перед выполнением основных вычислений с применением предложенного метода проводились стандартные численные тесты.

Научная новизна. В работе получены следующие новые результаты:

1. Разработана расчетная методика, позволяющая моделировать нестационарные течения в разветвленных каналах и обеспечивающая приемлемую для инженерных приложений достоверность прогнозирования волновой структуры, статических и динамических характеристик потока при использовании экономичных одномерных математических моделей и предложенных интегральных соотношений, учитывающих особенности процессов, протекающих в T-образных тройниках.
2. Установлено, что при моделировании установившихся резонансных колебаний с использованием конечно-разностной схемы Лакса-Вендроффа достоверные значения АЧХ получаются при относительном шаге расчетной сетки по пространству, нормированном по длине волны $\Delta x/l_0 > 0.005$, а для схемы Годунова – $\Delta x/l_0 > 0.0005$ при числе Куранта $\nu=0.67$.
3. Установлено, что АЧХ колебаний в системе разветвленных каналов имеет набор резонансных частот, целое количество четвертей длин волн которых не соответствует ни одной линейной комбинации целых длин отдельно взятых прямых участков каналов. Однако значение коэффициента усиления на таких частотах заметно ниже, чем в прямом канале, при кратности длины канала $1/4$ длины волны. Показано, что наличие потока в разветвленных каналах при определенном сочетании длин каналов может приводить к эффекту антирезонанса.

Практическая значимость. Полученные результаты позволяют моделировать нестационарные процессы в сложных многоканальных системах и углубляют современные представления о механизмах взаимодействия источников пульсаций с акустическими характеристиками каналов, повышая надежность и достоверность прогнозирования нестационарных процессов в газотранспортных системах и энергоустановках. Расчет течений по предлагаемой методике позволяет многократно сократить время моделирования без заметного снижения достоверности прогнозирования характеристик потока по сравнению с результатами трехмерного моделирования. Поэтому полученные результаты могут быть использованы при проектировании трубопроводного транспорта и диагностике нестационарных процессов в системе разветвленных каналов.

Основные результаты работы являются составной частью исследований по грантам РФФИ (09-08-00597, 13-08-00359, 13-08-00504, 13-08-97050, 14-01-31067, по контрактам с ФАО (П227) и Минобрнауки (16.518.11.7015, 02.740.11.0071, 8078, 8714, 14.132.21.1752, 14.132.21.1753).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Расчетная методика моделирования нестационарных дозвуковых течений однофазной сплошной среды в круглых каналах с T-образными разветвлениями, основанная на решении одномерных уравнений динамики сплошной среды.
2. Постановка и численная реализация граничного условия на входе (выходе) в канал при нестационарных процессах в окружающей среде.
3. Результаты исследований по влиянию численных схем интегрирования и степени дискретизации расчетной области на АЧХ колебаний.
4. Результаты вычислительных и экспериментальных исследований резонансных колебаний в прямых и разветвленных каналах.

Личный вклад автора заключается в совместной с научным руководителем постановке задач, обсуждении, интерпретации и обобщении результатов экспериментальных и теоретических результатов. Автором получена общая система уравнений, описывающих нестационарные течения однофазной сплошной среды в разветвленных круглых каналах. Обобщены результаты исследований течения в области разветвления круглых каналов. Выполнена оригинальная численная реализация поставленных граничных условий. Выполнен анализ влияния численных схем, и сформулированы рекомендации по выбору оптимальных параметров расчета. Освоены и апробированы методы акустических измерений, проведены все расчеты и эксперименты.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на Итоговой научной конференции КазНЦ РАН за 2010 и 2012 гг.; XII международной школе-семинаре “Модели и методы аэродинамики” г. Евпатория 4-13 июня 2012 г.; XIII международной школе-семинаре “Модели и методы аэродинамики” г. Евпатория 4-13 июня 2013 г.; VII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова, 2010 г.; VIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова, 2012 г.; XVIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в аэрокосмических технологиях, 2011г.; XIX Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках, 2013г.; Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения», г.Казань, 25-27 апреля 2012 г.; XXIX Сибирском теплофизическом семинаре, Новосибирск, 15-17 ноября 2010 г.; XXX Сибирском теплофизическом семинаре «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазоди-

намики», Новосибирск, 13-16 июня 2012 г.; International Conference on the Methods of Aerophysical Research, August 19 – 25, 2012, Kazan, Russia;

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 работ. Три работы опубликованы в рекомендуемых ВАК журналах.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и списка использованной литературы. Работа изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков, 3 таблицы. Список использованной литературы включает 116 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе анализируются имеющиеся в литературе результаты исследований по тематике работы. Обсуждается сложность предсказания волновой структуры в разветвленных каналах. Отмечается, что сравнительно просто моделируется течение в прямом канале без разветвлений (Тукмаков А.Л., Ткаченко Л.А., Михеев Н.И., Молочников В.М., Давлетшин И.А., Воеводин А.Ф., Гликман Б.Ф., Чарный И.А., Галицкий Б.М., Рыжов Ю.А., Якуш Е.В. Валуева Е.П.). При моделировании же течений в системе разветвленных каналов с использованием экономичных одномерных моделей возникают трудности в описании процессов, протекающих в области сопряжения каналов (Мазо А.Б., Еникеев Р.Д., Черноусов А.А., Терехов В.И., Мишвидбадзе Ю.М.).

Приводится обзор полученных ранее результатов по постановке и реализации граничных условий, удовлетворяющих физической постановке задачи (Тукмаков А.Л., Ткаченко Л.А., Зарипов Р.Г., Попов В.Н., Борисенко В.И., Галиуллин Р.Г., Кузнецов М.Г., Козулина О.В., Николаев А.Н., Коротков Ю.Ф.), а также обсуждаются их преимущества и недостатки. Приведен обзор по численным схемам интегрирования уравнений гидро- и газодинамики, и обсуждается влияние порядка аппроксимации исходных уравнений и степени дискретизации расчетной области на результат решения (Кутищев М.А., Мукоид В.П., Бедарев И.А., Федорова Н.Н.). Отмечается, что в нестационарных задачах, где время установления колебаний многократно превышает период колебаний, требуются дополнительные исследования влияния численных схем на амплитуду установившихся стоячих волн.

Во второй главе приведено описание экспериментальной установки, представлены данные об объекте исследования, рабочих участках, экспериментальном оборудовании и средствах измерения, методике проведения исследований, выполнена

оценка погрешности измерений физических величин. Также рассмотрены используемые допущения и модели в пакете вычислительной гидродинамики ANSYS-fluent, который использовался для получения обобщающих зависимостей для условия сопряжения каналов в области разветвления.

Рабочий участок 1 (рис. 1) представлял собой Т-образный канал, состоящий из трех прямых круглых труб. Конструкция предусматривала возможность изменения длин каналов. Относительный расход в канале изменялся с помощью установки на его конец сменных крышек 13 с различными диаметрами сквозного отверстия. Движение воздуха в рабочем участке осуществлялось при помощи компрессора 9. Среднее значение расхода за компрессором измерялось ультразвуковым расходомером ИРВИС РС4 – Ультра 11. Среднерасходная скорость на различных участках каналов определялась с помощью пневмометрических измерений по перепаду статического давления с применением приборов ПРОМА-ИДМ 6.

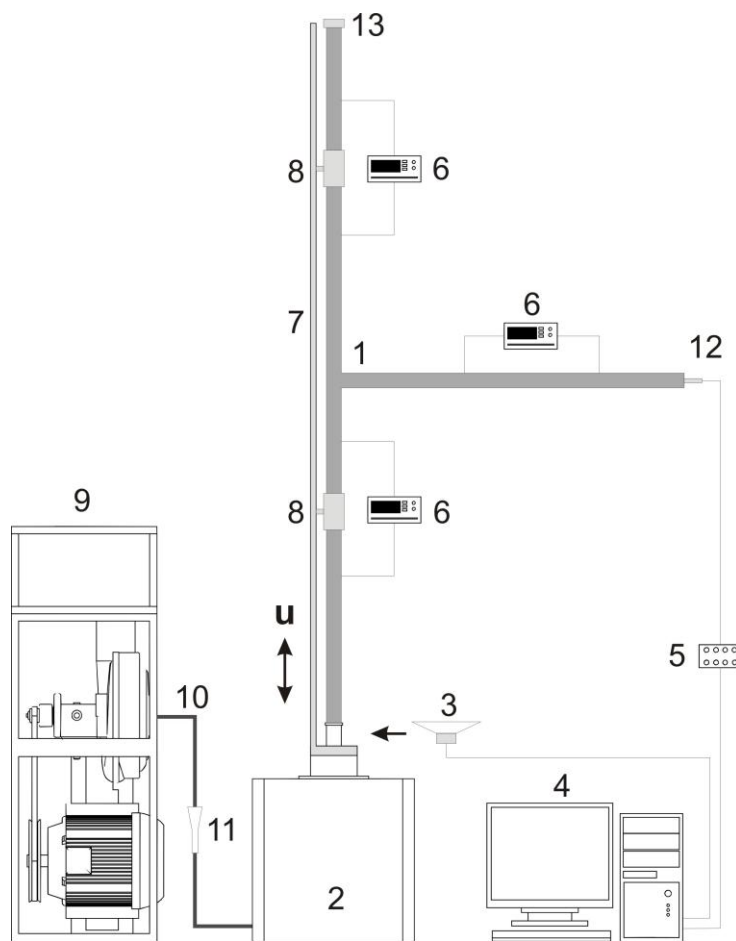


Рис.1. Экспериментальная установка

Нежелательные пульсации, создаваемые компрессором, подавлялись в ресивере 2. Для исключения вибрации вся конструкция жестко крепилась на металлическую опору 7 с помощью прорезиненных хомутов 8.

В качестве источника шума использовался акустический динамик 3. Измерение амплитуды и частоты колебания давления проводилось с использованием акустической аппаратуры Bruel&Kjaer 12 с микрофонами 4961. Сбор и обработка опытных данных осуществлялись при помощи автоматизированной системы, включающей компьютер 4 и аналого-цифровой преобразователь L-CARD L-761 5. Перед измерениями выполнялась градуировка акустической аппаратуры с помощью пистонфона. Для максимального снижения фонового шума компрессор 9 был установлен в отгороженном помещении и снабжен ресивером 2, установленным в линии соединительной магистрали 10.

В третьей главе изложена расчетная методика моделирования течений в разветвленных каналах при нестационарных граничных условиях. Методика основана

на решении одномерных уравнений, описывающих нестационарное течение однофазной сплошной среды с постоянными теплофизическими свойствами с учетом процессов, протекающих в области разветвления. Систему разветвленных каналов предлагается рассматривать как совокупность разъединенных участков, т.е. все каналы рассматриваются как совокупность прямых и отходящих от них боковых каналов. При этом в прямом канале учитывается приток или отток массы и энергии, а также потери полного импульса. На границе бокового канала в области разветвления предлагается рассматривать граничное условие по аналогии с условием на границе с окружающей средой, однако вместо давления во «внешней» среде предлагается рассматривать некое давление в области разветвления, различное при слиянии или разделении потоков.

Выполнена адаптация трехмерных уравнений Навье-Стокса, неразрывности, энергии и состояния к одномерным безразмерным осредненным по сечению уравнениям, описывающим течение сжимаемой вязкой сплошной среды в круглых каналах в длинноволновом приближении ($R/l_0 \ll 1$):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}}{\partial \bar{x}} &= -\Psi_\rho, \\
\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial (\bar{p} + \alpha_1 \bar{\rho} \tilde{u}^2)}{\partial \bar{x}} &= -\frac{2}{\text{Re}} \bar{\tau}_w - \Psi_p, \\
\frac{\partial \left[\bar{\rho} \left(\bar{e} + \alpha_1 \frac{\tilde{u}^2}{2} \right) \right]}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial \left[\bar{\rho} \tilde{u} \left(\bar{e} + \frac{\bar{p}}{\bar{\rho}} + \alpha_2 \frac{\tilde{u}^2}{2} \right) \right]}{\partial \bar{x}} &= -\Psi_e, \\
\bar{e} &= \frac{\bar{p}}{(k-1)\bar{\rho}}, \\
0 < \bar{x} < \bar{L}, \quad \bar{t} > 0, \\
\Psi_\rho &= \begin{cases} \bar{\rho}_1 \tilde{u}_2 f \delta(x - x_*), & \tilde{u}_2 > 0, \\ \bar{\rho}_2 \tilde{u}_2 f \delta(x - x_*), & \tilde{u}_2 < 0, \end{cases} \\
\Psi_p &= I \delta(x - x_*), \\
\Psi_e &= \begin{cases} \bar{\rho}_1 \tilde{u}_2 \left(\bar{e}_1 + \frac{\bar{p}_1}{\bar{\rho}_1} + \alpha_2 \frac{\tilde{u}_1^2}{2} \right) \delta(x - x_*), & \tilde{u}_2 \geq 0, \\ \bar{\rho}_2 \tilde{u}_2 \left(\bar{e}_2 + \frac{\bar{p}_2}{\bar{\rho}_2} + \alpha_2 \frac{\tilde{u}_2^2}{2} \right) \delta(x - x_*), & \tilde{u}_2 < 0, \end{cases} \quad (1)
\end{aligned}$$

где $\bar{\rho} = \rho/\rho_0$, $\bar{e} = e/e_0$, $\bar{p} = (p - p_*)/\Delta p$, $\bar{u} = u/u_0$, $\bar{x} = x/L$, $\bar{r} = r/R$, $\bar{t} = t/t_0$ – безразмерные плотность, удельная внутренняя энергия, давление, скорость, осевая, радиальная координаты и время, соответственно; $\tilde{u} = \int_0^1 2\bar{u}\bar{r}d\bar{r}$ – безразмерная средне-

расходная скорость; $\alpha_1 = \frac{1}{\bar{u}^2} \int_0^1 2\bar{r}\bar{u}^2 d\bar{r}$ – коэффициент импульса; $\alpha_2 = \frac{1}{\bar{u}^3} \int_0^1 2\bar{r}\bar{u}^3 d\bar{r}$ – коэффициент энергии; $\delta(x-x_*)$ – δ -функция Дирака, x_* – координата места разветвления; $\bar{\rho}_1, \bar{u}_1, \bar{p}_1, \bar{e}_1$ – плотность, скорость, давление и внутренняя энергия в прямом канале, соответственно; $\bar{\rho}_2, \bar{u}_2, \bar{p}_2, \bar{e}_2$ – в боковом канале; $Re = u_0 R^2 \rho_0 / \mu l_0$ – приведенное число Рейнольдса. В качестве масштабов в уравнениях (1) приняты величины $e_0 = u_0^2$, $t_0 = l_0 / u_0$, $u_0 = \sqrt{\Delta p / \rho_0}$ и радиус канала R , где l_0 – наименьшая длина волны, ρ_0 – плотность невозмущенной среды. В качестве масштаба давления принята величина $\Delta p = |p_0 - p_*| + p_g$, в которой p_0 – давление в канале в начальный момент времени, p_* и p_g – постоянная составляющая давления и максимальная амплитуда возмущающего воздействия в невозмущенной внешней среде, соответственно.

Члены Ψ_ρ , Ψ_p и Ψ_e , входящие в уравнения (1), описывают изменение массы, энергии и импульса в прямом канале в области разветвления.

В области разветвления может реализоваться слияние (рис. 2, а) и разделение (рис. 2, б) потоков. Индексом «str» обозначены параметры течения, относящиеся к сечению прямого канала, расположенному выше по потоку при слиянии и ниже по потоку при разделении относительно параметров течения с индексом « Σ ». Параметры потока в боковом канале обозначены индексом «br».

Предлагается зависимость потерь полного импульса I в области разветвления представить в виде:

$$I = \zeta_1 \frac{\bar{\rho} \bar{u}_\Sigma^2}{2}, \quad (2)$$

где ζ_1 – коэффициент пропорциональности.

При определении коэффициента ζ_1 была проведена специальная серия вычислительных экспериментов с использованием пакета ANSYS-fluent. Обработка результатов расчетов позволила принять зависимость ζ_1 в виде параболы

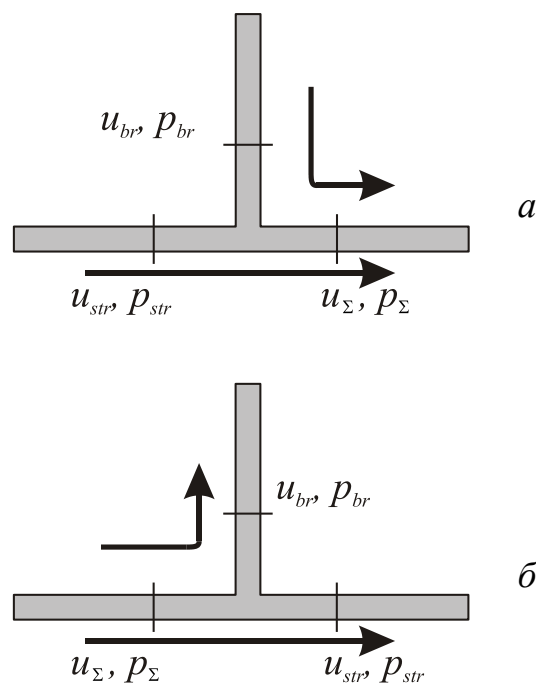


Рис. 2. Схемы течения при слиянии (а) и разделении (б) потоков.

$$\zeta_1 = B_1 \left(\frac{\tilde{u}_{br}}{\tilde{u}_\Sigma} \right)^2 + B_2 \frac{\tilde{u}_{br}}{\tilde{u}_\Sigma} + B_3, \quad (3)$$

у которой коэффициенты B_1 , B_2 и B_3 зависят от относительной площади бокового канала $f = F_{br}/F_\Sigma$. Краевые условия принимают вид:

$$\begin{aligned} \bar{x} = 0: \quad \bar{p} &= \Psi_g - \bar{\zeta}_+ \frac{\bar{\rho} \tilde{u} |\tilde{u}|}{2}, \\ \bar{x} = \bar{L}: \quad \bar{u} &= 0, \quad \frac{\partial \bar{e}}{\partial \bar{x}} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\bar{t} = 0: \quad \tilde{u} = 0, \quad \bar{\rho} = 1, \quad \bar{e} = 1,$$

$$\Psi_g = \begin{cases} G \tilde{g}(t) & \text{при взаимодействии с окружающей средой} \\ G_* & \text{при взаимодействии с другим каналом} \end{cases}$$

где $\bar{\zeta}_+ = \alpha_1 \zeta_+$ – приведенный коэффициент сопротивления.

В условиях (4) член Ψ_g характеризует взаимодействие с окружающей средой или с прямым каналом. При взаимодействии с окружающим пространством $\Psi_g = p_g \tilde{g}(t)/\Delta p$, где $\tilde{g}(t)$ – периодическая функция порядка $O(1)$, которая, в общем случае, является суммой гармонических функций с наименьшей длиной волны l_0 , p_g – максимальная амплитуда возмущающего воздействия. Член G_* в граничном условии (4) учитывает взаимодействие с «окружающей средой», в качестве которой выступает прямой канал. Безразмерный параметр G_* выражается через размерные характеристики течения в области разветвления:

$$G_* = (p' - p_*)/\Delta p \quad (5)$$

где p' – некоторое давление в прямом канале. Детальное изучение результатов расчета стационарных течений с применением ANSYS-fluent, позволило выявить зависимости p' от параметров потока в прямом канале:

при разделении потока в тройнике (рис. 2, б)

$$p' = B_4 p_{str} + (1 - B_4) p_\Sigma. \quad (6)$$

при слиянии потоков в тройнике (рис. 2, а)

$$p' = p_\Sigma + \zeta_2 \frac{\rho \tilde{u}_\Sigma^2}{2}, \quad (7)$$

Обработка результатов расчетов позволила получить зависимость для коэффициента ζ_2 , входящего в выражение (7), в следующем виде:

$$\zeta_2 = B_5 \left(\frac{\tilde{u}_{br}}{\tilde{u}_\Sigma} \right)^2 + B_6 \left(\frac{\tilde{u}_{str}}{\tilde{u}_\Sigma} \right)^2 + B_7 \left| \frac{\tilde{u}_{br}}{\tilde{u}_\Sigma} \right| \left| \frac{\tilde{u}_{str}}{\tilde{u}_\Sigma} \right| + B_8. \quad (8)$$

С применением ANSYS-fluent получены исходные значения гидродинамических параметров течения в области разветвления. Полученные данные сверены с результатами физических экспериментов и обобщены зависимостями для коэффициентов B_i , $i = \overline{1,8}$ и ζ_+ , входящих в выражения (3), (6) и (8).

На рис. 3 темными символами представлены результаты вычислительных экспериментов при различных значениях f и $\bar{u}_{br}/\bar{u}_\Sigma$. На тех же рисунках пунктирными линиями показаны аппроксимационные зависимости относительных потерь полного импульса, полученные с использованием следующих выражений для коэффициентов B_1, B_2, B_3 :

при разделении

$$B_1 = -0.684f^2, \quad B_2 = 1.726f, \quad B_3 = 0.06f^{0.5}, \quad (9)$$

при слиянии

$$B_1 = -0.336f^2, \quad B_2 = 0.82f^{1.5}, \quad B_3 = -0.196f^{0.5}. \quad (10)$$

Относительная среднеквадратичная погрешность предсказания потерь импульса по зависимости (2) с использованием коэффициентов B_i , $i = \overline{1,3}$ (9) и (10), нормированная по скоростному напору $\rho\bar{u}_\Sigma^2/2$, не превышает 3,6%.

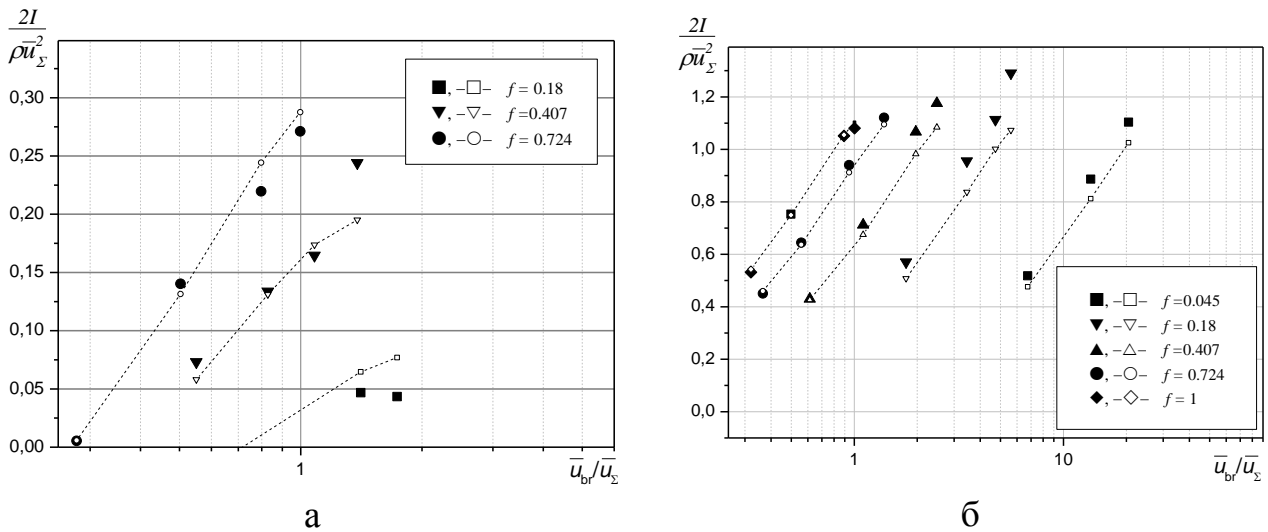


Рис. 3. Экспериментальные (темные символы) значения относительной потери импульса и их аппроксимация (пунктирные линии со светлыми символами) при слиянии (а) и разделении (б) потоков.

Аналогично обобщены зависимости коэффициентов B_i , $i = \overline{4,8}$ и ζ_+ :

при разделении

$$B_4 = 0.245 - 0.586f + 0.516f^2, \\ \zeta_+ = 2.367 - 1.777f + 0.791f^2, \quad (11)$$

при слиянии

$$B_5 = -0.242, \quad B_6 = -1.382, \quad B_7 = 0.2, \quad B_8 = 1.538. \quad (12)$$

Среднеквадратичная погрешность определения давления p_{br} по зависимости (7) с коэффициентами B_i , $i = \overline{5,8}$ (12) относительно результатов расчета с использованием ANSYS-fluent не превышает 10% от величины скоростного напора $\rho \tilde{u}_\Sigma^2 / 2$. Для (6) с коэффициентами B_4 и ζ_+ (11) аналогичная погрешность не превышает 8% от абсолютной разности давлений в прямом канале ниже и выше отвода $|p_\Sigma - p_{str}|$.

Пример результатов моделирования в программном комплексе ANSYS-fluent процессов показан на рис.4. Там же стрелками показаны сечения, в которых оценивались интегральные значения давления p , скорости \bar{u} и динамической составляющей полного импульса $\rho \bar{u}^2$ в сечениях с индексами «str», « Σ » и «br». Расположение сечений выбиралось таким образом, чтобы профиль скорости был как можно более равномерным, например, при образовании отрывного пузыря контрольное сечение располагалось за ним.

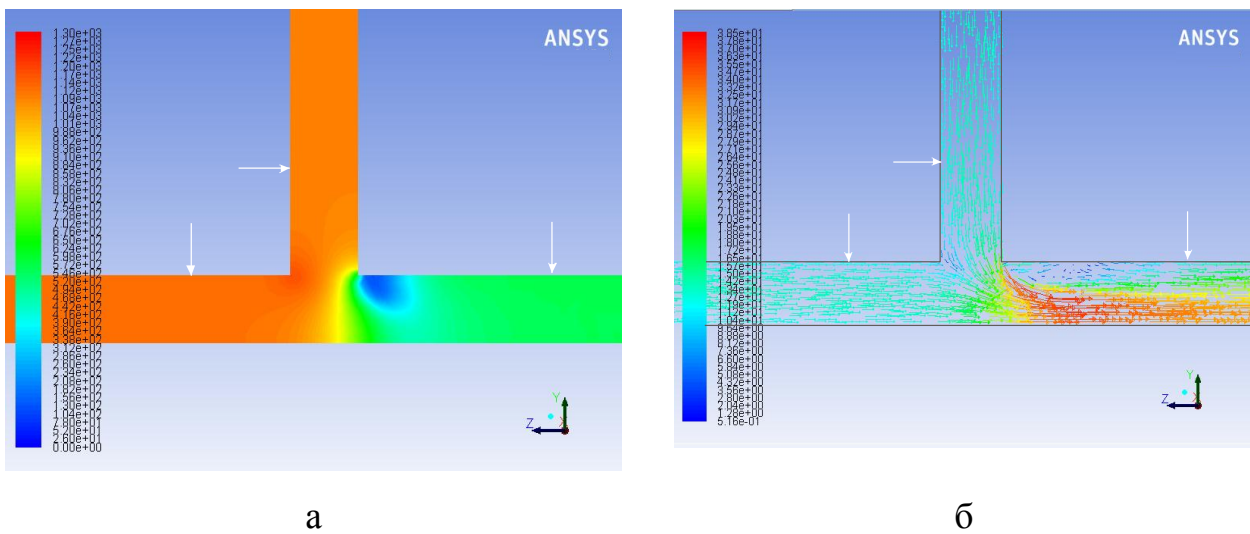


Рис. 4. Поле давления (а) и векторное поле скорости (б) при течении в разветвленном Т-образном канале при слиянии потоков: $f = 1$, $q = 0,5$.

В разделе 3.3 диссертации реализовано граничное условие (4) на открытой границе $\bar{x} = 0$. Линеаризовав уравнения (1), записав их конечно-разностные схемы для левой границы, получено трансцендентное уравнение для определения скорости

$$A \tilde{u}_0^{n+1} \left| \tilde{u}_0^{n+1} \right| + B \tilde{u}_0^{n+1} - C = 0, \quad (13)$$

где $C = \tilde{u}_0^n + \nu (\Psi_g^{n+1} - p_1^n) / \rho_0 c_0 + \nu^2 (\tilde{u}_1^n - \tilde{u}_0^n)$; $A = (\bar{\zeta}_+ \Delta t) / (2 \Delta x)$; $B = 1 + 8 \Delta t \varepsilon / \text{Re}^2$; $\nu = \Delta t c_0 / \Delta x$ – число Куранта; ρ_0 – плотность газа в невозмущенной среде; c_0 – скорость звука в невозмущенной среде; Δt , Δx – шаг по времени и продольной коор-

динате, соответственно; $\varepsilon = R/l_0$; индекс n указывает на значения скорости \tilde{u} , соответствующие временному слою n , а индексы 0 и 1 указывают на те же значения скорости в граничном и соседнем внутреннем узлах расчетной сетки.

Уравнение (13) имеет два физически допустимых решения:

$$\tilde{u}_0^{n+1} = \frac{\mp B \pm \sqrt{B^2 \pm 4AC}}{2A}, \tag{14}$$

где верхние знаки соответствуют втеканию, нижние – истечению. Аналогичные выражения получены и для правой границы. Отмечается, что из (14) вытекают некоторые известные из литературы частные случаи (Борисенко В.И.).

В разделе 3.4 диссертации дано описание явных конечно-разностных схем интегрирования уравнений (1) upwind, Лакса-Вендроффа, Годунова и TVD с ограничителями minmod, Van Leer, MC и SuperBee. Представлены условия их устойчивости.

В заключительной части главы 3 проведена апробация разработанной методики. Решены задачи распада разрыва (тест Сода), опорожнения трубы (Борисенко В.И.) и стационарного течения в Т-образном канале, а также проведена верификация полученных результатов с известными литературными данными и с результатами 3D моделирования в программном комплексе ANSYS-fluent.

В четвертой главе рассмотрена задача установившихся осциллирующих колебаний воздуха в полужакрытом прямом канале (рис. 5) и исследовано влияние численной схемы и разностной сетки на амплитуду стоячих волн.

При определении АЧХ акустических колебаний в каналах при численном моделировании использовался "белый" шум. При этом функция $g(t)$ в (4) принимала вид

$$\tilde{g}(t) = \sum_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \tag{15}$$

где суммирование ведется по всем гармоникам i с круговой частотой ω_i , φ_i – случайный фазовый угол, равномерно распределенный в интервале $[0, 2\pi]$.

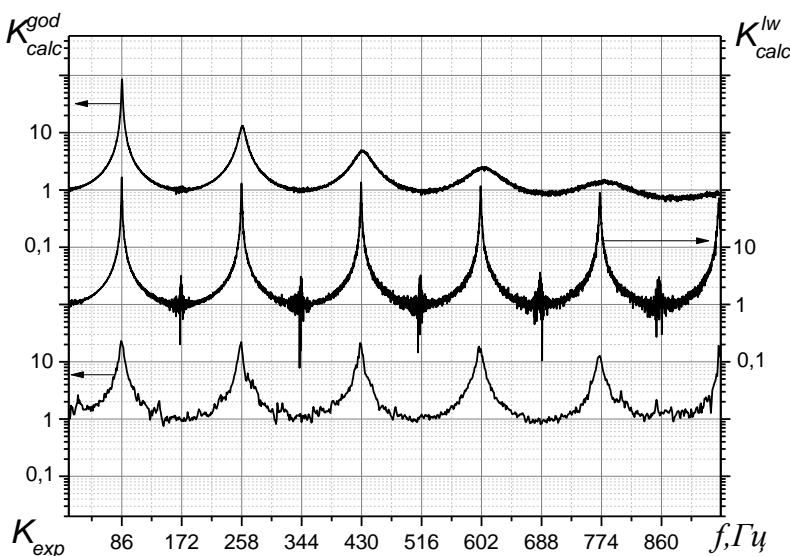


Рис. 5. Передаточная функция $K(f)$ на непроницаемой стенке канала длиной 1 м и диаметром 0.016 м: K_p - эксперимент; K_p^{LB} - расчет по схеме Лакса-Вендроффа; K_p^{God} - расчет по схеме Годунова.

Сравнение выполнялось с результатами экспериментов автора и с известными литературными данными. Показано, что применение схемы Лакса-Вендроффа (второй порядок точности) позволяет достоверно прогнозировать амплитуду установившихся стоячих волн. Экспериментальные и расчетные значения на графике практически сливались, и для удобства восприятия на рис.5 (и ниже на рис. 6, 7) были смещены шкалы по оси ординат. Использование схемы Годунова (первый порядок точности) приводит к повышению погрешности прогнозирования амплитуды стоячих волн по отношению к экспериментальным данным. Показано, что для схемы Лакса-Вендроффа достоверные результаты расчета получаются при шаге по пространству $\Delta x < l_0/200$, а для схемы Годунова – $\Delta x < l_0/2000$ при числе Куранта $\nu=0.67$. Такие значения сеточного шага можно рекомендовать в качестве оптимальных для расчетов установившихся нестационарных течений в каналах.

В пятой главе анализируется механизм усиления или подавления колебаний в разветвленных каналах и отмечается, что, в отличие от прямого канала, аналитическая оценка резонансных частот и амплитуд пульсаций давления затруднена даже для простейшего разветвленного Т-образного канала из-за сложной системы отражения волн от границ в совокупности с прохождением ими области разветвления.

Выполнено сравнение результатов моделирования нестационарных процессов в Т-образных каналах (рис. 6) с результатами физических экспериментов.

При проведении экспериментов в окружающей среде генерировался "белый" шум, а измерение пульсаций давления в окружающей среде проводилось снаружи канала перед входной границей и в контрольных сечениях (рис. 6). Анализ спектров пульсаций давления показал, что шум отличался от "белого", в основном, из-за неравномерных АЧХ усилительной аппаратуры и динамиков. Поэтому в экспериментах и в расчетах оценивалась относительная передаточная функция $K(f)$, равная отношению амплитуды пульсаций давления в контрольном сечении канала к амплитуде пульсаций перед входным сечением на той же частоте.

Передаточная функция $K_s(f)$ определялась в результате осреднения по пяти дублирующим опытам. При этом среднеквадратическое отклонение K_s в области резонансных частот составляло 25% от среднего значения этого параметра. Расчетные значения амплитуд, в том числе и на резонансных режимах, укладываются в доверительный интервал экспериментальных данных.

Анализ АЧХ колебаний в системе разветвленных каналов в широком частотном диапазоне показал, что имеется набор резонансных частот, целое количество четвертей длин волн которых не соответствует ни одной линейной комбинации целых длин отдельно взятых прямых участков каналов. Однако значение коэффициента усиления на таких частотах заметно ниже, чем в прямом канале, при кратности длины канала $1/4$ длины волны. Показано, что наличие потока в разветвленных каналах

при определенном сочетании длин каналов может приводить к эффекту антирезонанса.

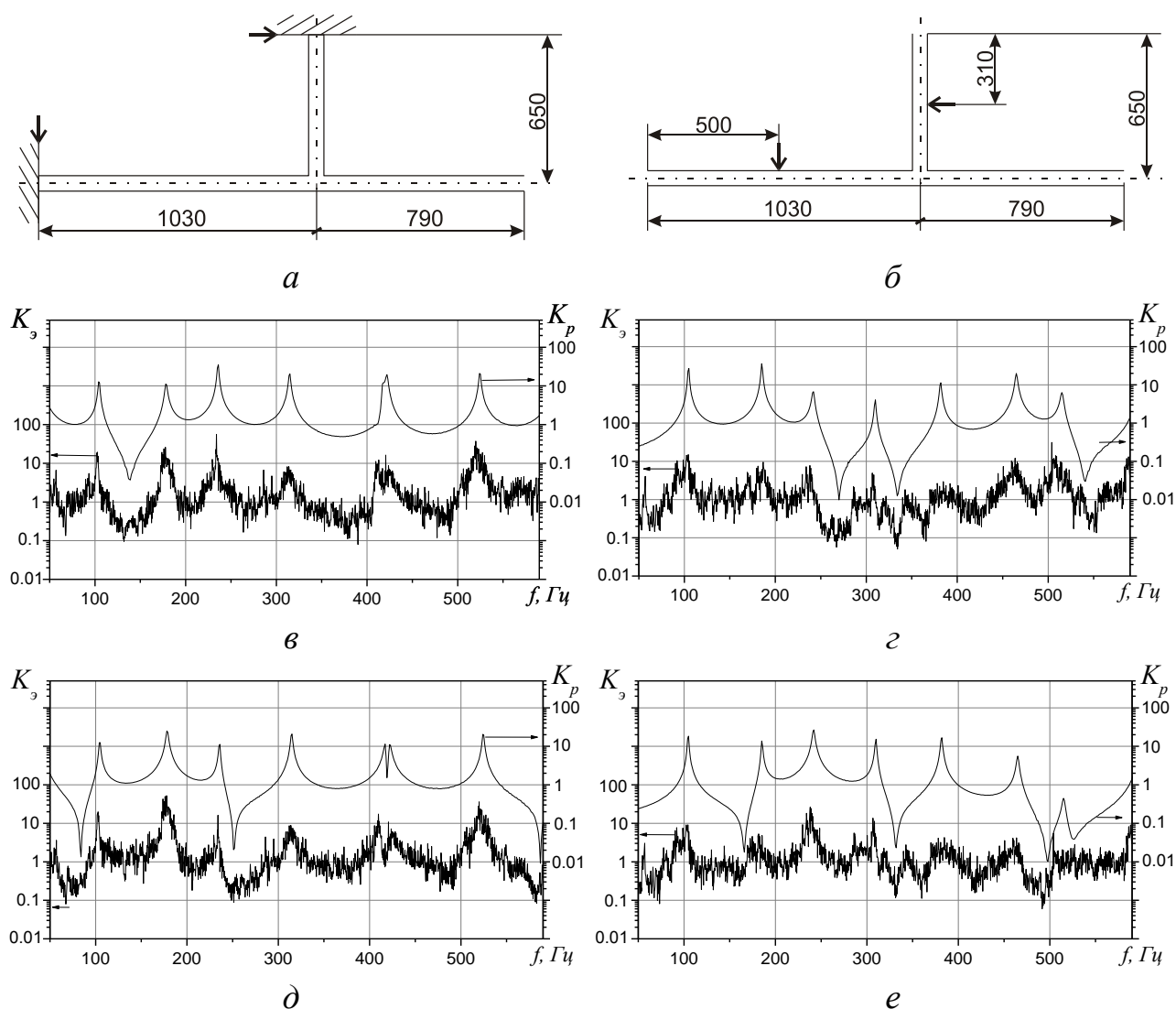


Рис. 6 Передаточная функция в контрольных сечениях прямого канала (*в*, *з*) и бокового отвода (*д*, *е*): (*в*, *д*) относятся к геометрии каналов (*а*); (*з*, *е*) относятся к (*б*); K_9 – эксперимент; K_p – расчет; ↓ – контрольное сечение.

На рис.7 продемонстрировано влияние потока на передаточные функции в прямом (рис. 7, *б*) и боковом (рис. 7, *в*) каналах. При моделировании граничные условия задавались таким образом, чтобы рабочая среда втекала через открытый конец бокового канала, а вытекала из открытого конца одного из участков прямого канала. При этом среднерасходная скорость в другом участке прямого канала равнялась нулю.

Из рис. 7 видно, что наличие потока приводит к смещению резонансных частот из-за различных скоростей распространения возмущений по потоку и против потока. Кроме того, при определенном сочетании длин каналов возможно подавление некоторых резонансных мод ($f=165$ Гц на рис. 7, *в*) из-за взаимного влияния колебательного движения в различных частях разветвленных каналов. Взаимное влияние колебательного движения в смежных участках разветвленных каналов при наличии

потока может приводить к эффекту антирезонанса, подавляя тем самым главные моды колебаний. Например, для конфигурации каналов, изображенной на рис. 7, а, наличие потока в боковом канале и отсутствие потока в одном из участков прямого канала приводит к снижению амплитуды колебания давления на частоте 165 Гц в 40 раз.

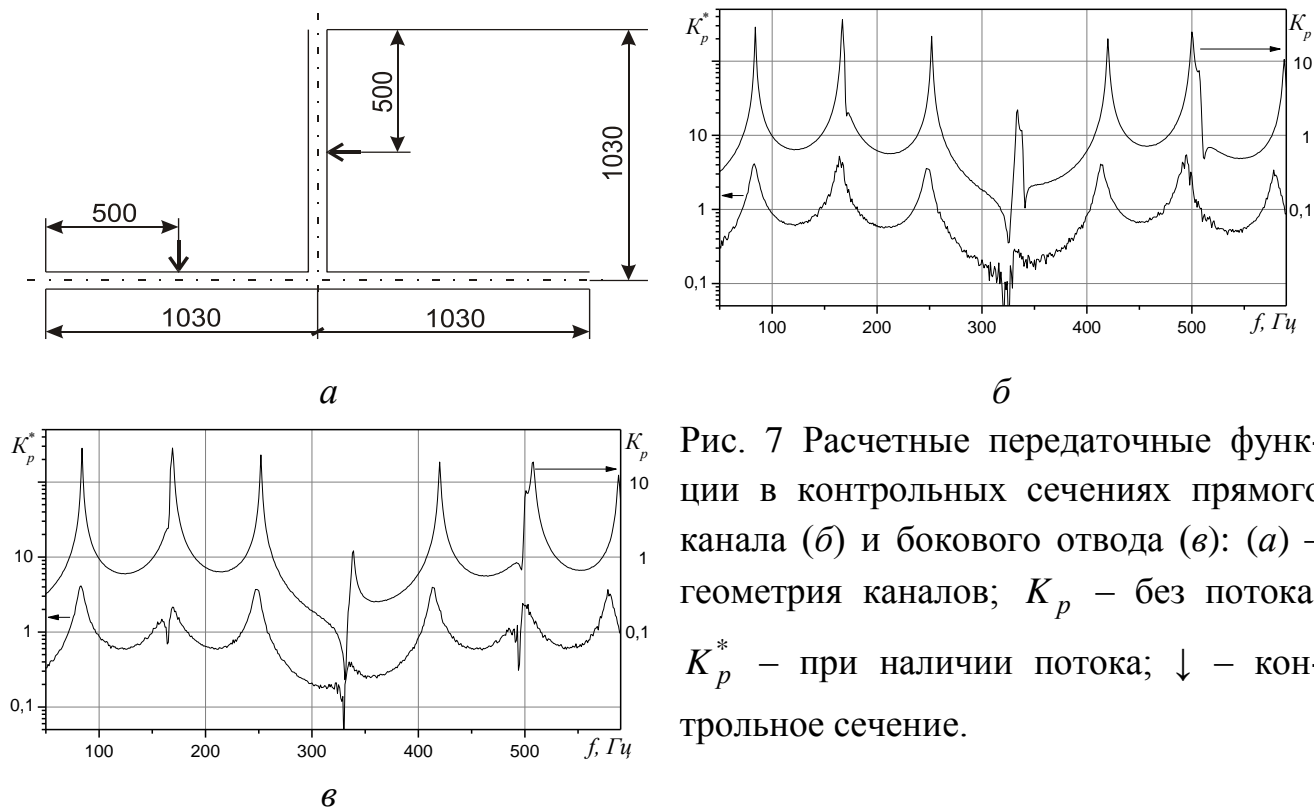


Рис. 7 Расчетные передаточные функции в контрольных сечениях прямого канала (б) и бокового отвода (в): (а) – геометрия каналов; K_p – без потока; K_p^* – при наличии потока; ↓ – контрольное сечение.

Основные результаты:

1. Расчетная методика моделирования нестационарных течений однофазной сплошной среды с постоянными теплофизическими свойствами в системе разветвленных круглых каналов с учетом особенностей течения в области разветвления.
2. Адаптированные уравнения нестационарного течения однофазной сплошной среды в системе разветвленных круглых каналов, полученные методами теории подобия. Модель управляется двумя безразмерными параметрами: приведенным числом Рейнольдса $Re = u_0 R^2 \rho_0 / \mu l_0$ и относительной амплитудой внешних воздействий $G = p_g / \Delta p$. Показано, что в задаче об опорожнении трубы влияние трения и внешнего акустического воздействия мало и не требует учета, напротив, в задаче о резонансном колебании газа в трубах требуется учитывать оба фактора.
3. Сформулировано граничное условие на входе (выходе) в круглый канал при нестационарных процессах в окружающей среде. Выполнена его численная ре-

лизация путем сведения конечно-разностных уравнений на границе к решению квадратного уравнения для скорости.

4. Установлено, что при численном моделировании установившихся резонансных колебаний с использованием конечно-разностной схемы Лакса-Вендроффа достоверные значения АЧХ получаются при отношении длины волны к шагу по пространству $l_0/\Delta x > 200$, а для схемы Годунова $-l_0/\Delta x > 2000$ при числе Куранта $\nu=0.67$.
5. АЧХ колебаний рабочего тела в системе разветвленных каналов имеет набор резонансных частот, при которых целое количество четвертей длин волн не соответствует ни одной линейной комбинации целых длин отдельно взятых прямых участков каналов. Однако значение коэффициента усиления на таких частотах заметно ниже, чем в прямом канале, при кратности длины канала $1/4$ длины волны. Наличие потока в разветвленных каналах при определенном сочетании длин каналов может приводить к эффекту антирезонанса и подавлению некоторых мод колебаний.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

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

1. Зарипов Д.И. Пульсации потока в области разветвления канала // Михеев Н.И., Душин Н.С. // Труды Академэнерго. 2011. №2. – С.24-32.
2. Зарипов Д.И. Метод моделирования течения жидкости в разветвленных каналах // Михеев Н.И., Душин Н.С. // Изв. вузов. Авиационная техника. 2013. №1. – С.23-27.
3. Зарипов Д.И. Возбуждение автоколебаний потока в разветвленном канале для управления интенсификацией теплообмена в турбулентной отрывной области // Михеев Н.И., Душин Н.С. // Тепловые процессы в технике. 2011. Т.3, №12. С.531-536.

Работы, опубликованные в других изданиях:

4. Зарипов Д.И. Автоколебания потока в боковом отводе канала // Михеев Н.И., Душин Н.С., Сорокина Д.Д. // Модели и методы аэродинамики. Материалы X Международной школы-семинара. Евпатория, 3-12 июня 2010. – М.: МЦНМО.– 2010. С. 66-67.
5. Зарипов Д.И. Автоколебательные процессы в разветвленных каналах // Михеев Н.И., Душин Н.С., Кратиров Д.В. // Модели и методы аэродинамики. Материалы XI Международной школы-семинара. Евпатория, 3-12 июня 2011. – М.: МЦНМО.– 2011. С. 127-128.

6. Зарипов Д.И. Моделирование нестационарных процессов в разветвленных каналах // Михеев Н.И., Душин Н.С. // Модели и методы аэродинамики. Материалы XII Международной школы-семинара. Евпатория, 3-12 июня 2012. – М.: МЦНМО.– 2012. С. 92-93.
7. Зарипов Д.И. Влияние геометрии канала в области разветвления на возбуждение автоколебаний потока в отводе // Душин Н.С., Сорокина Д.Д. // Материалы докладов VII Школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении». Казань, 15-17 сентября 2010, С. 151-154.
8. Зарипов Д.И. Моделирование шума в каналах // Душин Н.С., Сорокина Д.Д. // Материалы докладов VII Школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении». Казань, 15-17 сентября 2010, С. 159-162.
9. Зарипов Д.И. Метод моделирования нестационарных потоков в разветвленных каналах // Материалы докладов VIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении». Казань, 16-18 октября 2012, С. 178-181.
10. Зарипов Д.И. Возбуждение автоколебаний потока в разветвленном канале для управления интенсификацией теплообмена в турбулентной отрывной области // Михеев Н.И., Душин Н.С. // Тезисы докладов XVIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в новых энергетических технологиях», 23-27 мая 2011 г., г. Звенигород. Россия. М.: Изд. дом МЭИ. – С. 51-52.
11. Зарипов Д.И. Моделирование нестационарных течений в разветвленных каналах // Михеев Н.И., Душин Н.С., Давлетшин И.А. // Тезисы докладов XVIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в новых энергетических технологиях», 23-27 мая 2011 г., г. Звенигород. Россия. М.: Изд. дом МЭИ. – С.63-64.
12. Зарипов Д.И. Условия сопряжения потоков в Т-образном тройнике // Михеев Н.И., Душин Н.С. // Тезисы докладов XIX Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках», 20-24 мая 2013 г., г. Орехово-Зуево. Россия. М.: Изд. дом МЭИ. – С. 55-56.
13. Зарипов Д.И. Метод моделирования нестационарных течений в разветвленных каналах // Материалы докладов VII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения», г.Казань, 25-27 апреля 2012 г. В 4-х т.; Т.2. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2012.– С.190-191.
14. Зарипов. Д.И. Моделирование нестационарных течений в каналах // Михеев Н.И., Душин Н.С., Давлетшин И.А. // Сборник тезисов докладов Всероссийской конференции «XXIX Сибирский теплофизический семинар». 15-17 ноября 2010 г., Новосибирск: Изд-во Института СО РАН, 2010, стр. 67-68.
15. Зарипов Д.И. Математическая модель нестационарных течений в разветвленных трубопроводах // Михеев Н.И. // Материалы докладов XII Международной

школы-конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», г.Новосибирск, 13-16 июня 2012 г. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2012.– С.48.

16. Зарипов Д.И. Автоколебания потока в разветвленном канале // Михеев Н.И., Душин Н.С., Стинский Г.В. // Итоговая научная конференция за 2010 год Казанского научного центра Российской академии наук. Секция физико-технические проблемы энергетики.
17. Зарипов Д.И. Метод моделирования течения жидкости в разветвленных каналах // Михеев Н.И. // Итоговая научная конференция за 2011 год Казанского научного центра Российской академии наук. Секция физико-технические проблемы энергетики.
18. Зарипов Д.И. Моделирование течений в газотранспортных системах // Михеев Н.И., Душин Н.С. // Итоговая научная конференция за 2012 год Казанского научного центра Российской академии наук. Секция физико-технические проблемы энергетики.
19. Zaripov D.I., Simulation of fluid flow in branched channels // Mikheev N.I., Dushin N.S. // International Conference on the Methods of Aerophysical Research, August 19 – 25, 2012, Kazan, Russia: Abstracts. Pt. II / Ed. V.M. Fomin. – Kazan, 2012. – p. 268-269.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ.л. __. Усл.печ.л. _____. Уч.-изд.л. _____.

Тираж _____. Заказ

Типография Издательства Казанского государственного технического
университета, 420111, Казань, К.Маркса, 10