

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**Институт Автоматики и информационных технологий**

**Кыргызско-Российский Славянский Университет  
им. Б.Н. Ельцина**

**Диссертационный совет Д.05.18.579**

*На правах рукописи*  
УДК 519.61(575.2)(043.3)

**КАРТАНОВА АСЕЛЬ ДЖУМАНОВНА**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ  
ГАЗА В КАНАЛАХ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ САЕ-ТЕХНОЛОГИЙ  
(САЕ /англ. Computer-aided engineering/ - системы автоматизации  
инженерных расчётов)**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Бишкек - 2018

**Работа выполнена в** Институте новых информационных технологий Кыргызского Государственного Университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова.

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, профессор **Сулайманова Света Мукашовна** (КНАУ им. К.И. Скрябина, профессор)

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук, доцент **Адигамов Николай Сабирович** (КРСУ им. Б.Н. Ельцина, профессор)

кандидат физико-математических наук, доцент **Кутунаев Жолчубек Насырымбекович** (ОшТУ им. М.М. Адышева, зав. кафедрой)

**Ведущая организация:** **КНУ им. Ж. Баласагына**, факультет МИиК, кафедра “Дифференциальные уравнения” г. Бишкек 720033, ул. Фрунзе 547.

Защита состоится 28 декабря 2018 г. в 10.00 часов на заседании Диссертационного совета Д.05.18.579 при Институте автоматизации и информационных технологий НАН КР и КРСУ им. Б.Н. Ельцина, 720071, г. Бишкек, пр. Чуй, 265, ауд.118, сайт: [www.iait.kg](http://www.iait.kg).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национальной академии наук Кыргызской Республики по адресу: 720071, г. Бишкек, пр. Чуй 265 «а» и на сайте ИАИТ НАН КР по адресу: [www.iait.kg](http://www.iait.kg). E-mail: [gulsaat@mail.ru](mailto:gulsaat@mail.ru).

Автореферат разослан 27 ноября 2018 г.

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

Керимкулова, Г.К.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Расчет параметров распространенных на практике течений, как течения в камерах сгорания и в соплах реактивных ракетных двигателей, в соплах распыливающих устройств, установок для резания высокоскоростной жидкостной или абразивно-жидкостной струей и тому подобных, является важной инженерной задачей.

Продукты сгорания металлизированных топлив в камере и в сопле состоят из смеси газов и конденсированных частиц малых размеров. В гидравлических усилителях мощности струйного типа в поток добавляют твердые частицы, кварцевого песка или песка граната для увеличения энергетических характеристик струи в сопле.

Подобные течения в общем случае имеют сложную структуру, являясь турбулентными нестационарными многофазными осесимметричными течениями вязкого теплопроводящего газа с ударными волнами, и во многих случаях при моделировании этих течений можно довольствоваться упрощенной одномерной стационарной схемой двухфазного течения смеси идеального газа и твердых частиц.

В связи с этим обуславливается растущий интерес к средствам математического моделирования течений жидкостей и газов с применением современных прикладных пакетов вычислительной гидродинамики, позволяющих прогнозировать характеристики течений и параметры работы устройств на стадии их проектирования, до изготовления в металле, что объясняет **актуальность исследования.**

**Связь темы диссертации с научными программами и основными научно-исследовательскими работами.** Диссертационная работа является инициативным научным исследованием.

**Цель и задачи исследования:** Цель исследования состоит в разработке математических моделей двухфазного течения смеси газа и твердых частиц с поверхностями разрыва типа пелены в сопле, течения газа в канале переменного сечения с перфорированной перегородкой и в исследовании возможностей численного моделирования сложных газодинамических явлений в соплах гидротехнических аппаратов, обеспечивающих эффективность применения струй высокого давления.

Задачи диссертационной работы:

- провести обзор существующих подходов к математическому моделированию двухфазного гетерогенного течения смеси газа и твердых частиц в пристеночных областях сопла и течения идеального газа в областях с перфорированными перегородками;
- разработать математические модели двухфазного течения смеси газа и твердых частиц с поверхностями разрыва типа пелены в сопле и течения идеального газа в канале переменного сечения с перфорированной перегородкой;

- провести численный расчет задачи о двухфазном течении смеси газа и твердых частиц с поверхностями разрыва типа пелены в сопле и задачи о течении идеального газа в канале переменного сечения с перфорированной перегородкой в квазиодномерной двухслойной постановке.

- провести расчетные исследования процессов течения газа в каналах переменного сечения в среде программно-расчетного комплекса ANSYS Fluent.

**Научная новизна полученных результатов.** Разработаны математические модели двухжидкостного течения смеси газа и твердых частиц с поверхностью разрыва типа пелены в сопле и стационарного течения идеального газа в канале переменного сечения с перфорированной перегородкой. В обеих задачах процесс течения моделируется квазиодномерной, двуслойной моделью.

1. Выведены уравнения и условия, управляющие формированием, движением и сходом пелены со стенки сопла, и выявлены различные типы схода пелен и дальнейшей их эволюции. Выполнены расчеты течения смеси газа и твердых частиц с пеленой в осесимметричном сопле Лавала.

2. Сформулированы граничные соотношения на поверхности разрыва (перегородке) и подробно изучена локальная структура течения газа в окрестности перегородки. Определены параметры газа в перфорированной перегородке. Доказано, что определяющим фактором воздействия перфорированной перегородки на поток, является степень проницаемости перегородки.

3. Рассмотренные примеры в ANSYS Fluent 15.0. подтверждают эффективность разработанных моделей. Установлено, что увеличение объемной доли твердых частиц в смеси и рабочего давления на входе приводит к увеличению касательного напряжения на стенки канала, быстрому разрушению стенок и к износу сопла. Почти весь импульс осажденных конденсированных частиц уничтожается трением, и вклад в импульс смеси от движения пристеночного слоя твердых частиц пренебрежимо мал.

**Достоверность метода.** Компьютерное моделирование и вычислительные эксперименты проводилось в программном пакете ANSYS Fluent, а результаты моделирования вполне удовлетворительного совпали с теоретическими и экспериментальными данными, приведенными в литературе.

**Практическая значимость полученных результатов.** Разработанные модели позволяют успешно изучить двухфазные течения в соплах, решение задачи о течении газа в канале с перфорированной перегородкой имеет самостоятельный практический интерес, так как одним из важных свойств перфорированных перегородок является свойство выравнивания неравновесностей сверхзвукового потока, гашения шумовых вибраций, ударных волн. Предложенные приемы и методы могут применяться при численном моделировании широкого круга задач газовой динамики либо как инструмент решения, либо для улучшения качества решения и повышения быстродействия реализующих его алгоритмов. Но и собственно полученные результаты решения на основе предложенных моделей и алгоритмов,

представленных в диссертации задач, имеют самостоятельную научную ценность.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту.**

1. Разработанные математические модели двухжидкостного течения смеси газа и твердых частиц с поверхностью разрыва типа пелены в сопле и стационарного течения идеального газа в канале переменного сечения с перфорированной перегородкой в квазиодномерной двуслойной постановке:
  - полученные уравнения и условия, определяющие формирование, движение и сход пелены с тела, также образования и отрыва шнуров с поверхностей;
  - полученные соотношения, для газа на пелене как о типе разрыва, возникающем в двухжидкостной модели в результате пересечения траекторий частиц;
  - полученные уравнения, для течения двух слоев и влияния перфорированной перегородки на параметры течения газа в ней и в целом;
  - полученные соотношения для различных режимов перетекания газа через перфорацию в окрестности перегородки.
2. Полученные результаты компьютерного моделирования, и расчетного исследования в ANSYS Fluent 15.0 процесса истечения осесимметричной турбулентной струи из сопла Лавала.
3. Полученные результаты расчетного исследования для компьютерного моделирования двухфазного течения смеси газа и твердых частиц в канале переменного сечения в ANSYS Fluent 15.0.

**Личный вклад соискателя.** Постановка целей и задач исследований осуществлялась научным руководителем, д.ф.-м.н., профессором Сулаймановой С.М. и автором совместно. Разработка эффективных вычислительных алгоритмов, пригодных для компьютерного моделирования и расчетов параметров течения газа в среде программно-расчетного комплекса ANSYS Fluent, а также сам вычислительный эксперимент и его обработка проведены автором лично.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты данной работы доложены: на VI Международной научной конференции «Прочность и разрушение материалов и конструкций» (Россия, г. Оренбург, 2010г.); на Международной научно-практической конференции «Информационные технологии в образовании: состояние, проблемы и перспективы» (Бишкек, 2011г.); на Международной научно-практической конференции «Информационные технологии в Азии: состояние, проблемы и перспективы ITRA-2014» (Бишкек, 2014г.); на Международной научно-технической конференции «Наука, образование, инновации: приоритетные направления развития», посвящённой 60-летию Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова (Бишкек, 2014г.); на Третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств

железнодорожного подвижного состава» (Россия, г. Омск, 2015г.), на Международной научной конференции «Механика твердых, жидких и газообразных сред», посвященной 80-летию профессора Якова Исааковича Рудаева (Бишкек, 2016г.).

**Полнота отражения результатов диссертации в публикациях.** По содержанию настоящей диссертации опубликовано 10 научных статей.

Основные результаты диссертации опубликованы в журналах: "Вестник КГУСТА" (2 статьи), "Известия КГТУ" (1 статья), "Вестник КРСУ" (1 статья), "Современные проблемы механики сплошных сред" Института геомеханики и освоения недр НАН КР (1 статья), Казахских научных журналах Национальной Академии наук Республики Казахстан "Доклады", "Вестник" (2 статьи), Российских научных журналах Омского государственного университета путей сообщения, Оренбургского государственного университета и Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва (3 статьи).

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, практических рекомендаций, списка использованной литературы и приложения. Работа содержит 187 машинописных страниц основного текста, 37 рисунков, 1 таблицу. Список цитируемой литературы 84 наименования, из них собственных публикаций 10.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю доктору физико-математических наук, профессору Свете Мукашовне Сулаймановой за внимание и ценные указания, полученные при выполнении диссертационной работы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** дается обоснование актуальности проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна полученных результатов, практическая ценность полученных результатов, определены основные положения, выносимые на защиту, личный вклад соискателя, а также структура и объем диссертационной работы. Приведен список опубликованных работ по теме диссертации и апробации основных результатов.

**В первой главе** сделан литературный обзор и анализ проблемы двухфазных течений жидкости и газа. Описаны существующие подходы к решению этих задач.

**Во второй главе** в разделе 2.1. дано обоснование дальнейшей разработке проблемы двухфазных течений смеси газа и твердых частиц. Определены объект и предмет исследования, дано обоснование выбору подходов и методов исследования в этом направлении.

В настоящее время для расчета течений смеси газа (жидкости) с твердыми инородными частицами в соплах в рамках двухжидкостной (двухскоростной и двухтемпературной) модели сплошной среды широко используется одномерное приближение. Для двухфазных неравновесных течений из-за отставания инородных (жидких или твердых) частиц от газа вблизи стенки (около горловины) транс- и сверхзвуковой частей сопла

образуется слой, свободных от частиц. Параметры газа в ядре потока и в слое свободном от частиц, сильно различаются, что для таких течений увеличивает погрешности одномерного приближения. Возможный путь исправления подобного ухудшения одномерного приближения – применение двухслойной квазиодномерной модели двухфазного течения в сверхзвуковой части сопла.

В разделе 2.2. проанализированы возможности ANSYS Fluent для компьютерного моделирования процессов течения газа в каналах переменного сечения. Описаны технологии численного моделирования гидродинамических процессов, рассмотрены основные математические модели, основные подходы к дискретизации уравнений математической модели и алгоритмы численного решения уравнений математической модели, которые будут представлены в последующих главах.

**Третья глава** посвящена математическому моделированию одно-двухфазных течений идеального газа и смеси газа и твердых частиц в канале переменного сечения. В разделе 3.1. в рамках двухжидкостной модели с диспергированной фазой – сплошной средой без собственного давления – разработана математическая модель течения смеси газа и твердых частиц с разрывами типа пелены и шнуров. Пеленами предложено описывать тонкие приграничные слои твердых частиц, образующиеся у стенок и движущиеся вдоль них. Отмечена возможность отрыва пелены со стенки и образование шнуров на пересечениях линий тока пелен. Выведены уравнения, определяющие движение пелен и шнуров в стационарном случае. Исследованы различные возможности схода пелен со стенки, а также образования и отрыва шнуров.

Разработанная модель позволяет успешно изучить двухфазные течения в соплах. Пелена в таких течениях возникает из-за инерционного выпадения твердых частиц в суживающейся части сопла. Оторвавшаяся в области горловины пелена разделяет двухфазную область от области чистого газа. При течении в канале переменного сечения максимум плотности частиц следует ожидать у его стенки.

В разделе 3.2 в квазиодномерной двухслойной постановке решена задача о течении идеального газа в канале переменного сечения с перфорированной перегородкой, которая необходима для полноты построения и изложения модели течения газа и твердых частиц в канале переменного сечения.

Рассмотрено течение идеального газа в сопле, площадь поперечного сечения которого  $F$  – известная функция продольной координаты  $x$ , отсчитываемой вдоль оси канала, с перфорированной перегородкой квазиодномерной двухслойной постановке. Перегородку моделируем поверхностью разрыва для параметров газа. Граничные условия на такой поверхности получим с привлечением дополнительных предположений в рамках моделей, в которых главное внимание уделено разрывом пористости.

Поместим перфорированную перегородку в сопле, как показано на рисунке 1. Заметим, что в осесимметричном случае,  $p$  – давление,  $\rho$  – плотность,  $e$  – удельная внутренняя энергия,  $i$  – энтальпия газа. Перегородка имеет форму

обратного конуса, причем вершина конуса лежит на оси в расширяющейся части сопла. Ось  $x$  совпадает с направлением набегающего потока и с осями симметрии конуса и сопла, ось  $y$  ей перпендикулярна. Начало координат расположим в плоскости, где прикасаются два тела. Пусть  $u$  -  $x$ - компонента скорости потока удельная энтальпия,  $a$  – скорость звука, причем

$$e = e(p, \rho), \quad i = i(p, \rho) = e + p/\rho, \quad a = a(p, \rho), \quad (1)$$

где функции, стоящие справа, известны. Для совершенного газа с показателем адиабаты  $\kappa$ :  $e = p/[(\kappa - 1)\rho]$ ,  $i = \kappa p/[(\kappa - 1)\rho]$ ,  $a = (\kappa p/\rho)^{1/2}$ .

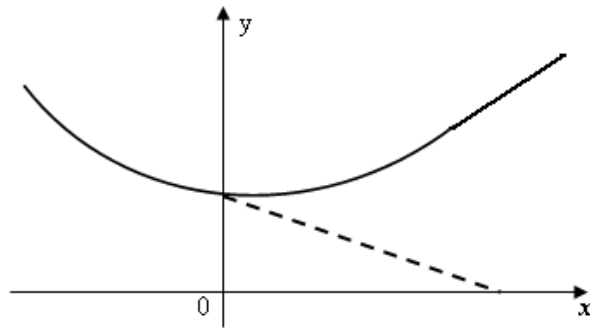


Рис. 1. Расположение перегородки в сопле

Предположим, что  $y'_s(x) < 1$ , где  $y_s(x)$  - уравнения образующей перегородки. Распределение параметров для нижнего слоя, т.е. для течения до перегородки удовлетворяют уравнениям:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dx} &= \frac{1}{F(M^2 - 1)} \left[ \frac{(1 + \nu)y_s^\nu g_m}{\rho} + u \frac{dF}{dx} \right]; \\ \frac{dP}{dx} &= - \frac{u}{F(M^2 - 1)} \left[ (1 + \nu)y_s^\nu g_m + \rho u \frac{dF}{dx} \right]; \\ \frac{d\rho}{dx} &= \frac{1}{a^2} \frac{dP}{dx}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $g_m$  - расход газа через перфорированную перегородку,  $M$ - число Маха.

Введем отмеченные чертой сверху переменные для обозначения соответствующих параметров для верхнего слоя. Величинами с индексом  $m$  обозначим соответствующие параметры газа в перфорированной перегородке. Тогда, система уравнений, описывающая течение за перегородкой имеет вид:

$$\frac{d\bar{u}}{dx} = \frac{\bar{u}}{\bar{\rho}\bar{F}(\bar{M}^2 - 1)} \left[ (1 + \nu)y_s^\nu g_m (1 + \bar{M}^2 + \rho_s(\bar{S} - S_m)) - \bar{\rho}\bar{u} \frac{d\bar{u}}{dx} \right];$$



$$\frac{d\bar{P}}{dx} = \frac{\bar{u}}{\bar{\rho}\bar{F}(\bar{M}^2 - 1)} \left[ (1 + \nu)y_s^\nu g_m (2\bar{\rho} + \bar{\rho}_s(\bar{S} - S_m)) - \bar{u}\bar{\rho}^2 \frac{dF}{dx} \right], \quad (3)$$

$$\bar{\rho} = Q_0 / \bar{u}\bar{F}; \quad \bar{\rho}_s = \partial\bar{\rho} / \partial S = -\frac{\kappa - 1}{\kappa} \bar{\rho}; \quad S = P / \rho^\kappa \quad - \text{энтропийная функция};$$

$Q_0$  - расход газа в начальном сечении. В выписанных уравнениях  $\nu=0$  и 1 для плоского и осесимметричного случаев, соответственно.

С целью определения параметров газа в перфорированной перегородке, сформулированы граничные соотношения на поверхности разрыва и подробно изучена локальная структура течения газа в окрестности перегородки. Основные граничные условия на разрыве имеют вид:

Основные граничные условия на разрыве имеют вид:

$$[\rho u] = 0; \quad [2I + V^2] = 0; \quad [P + \rho u^2] = -X; \quad [\rho uv] = -Y; \quad [\rho uw] = -Z. \quad (4)$$

Здесь, как и по прежнему  $P$  – давление,  $\rho$  – плотность,  $I$  – удельная энтальпия,  $u, v, w$  – нормальная и поперечные компоненты вектора скорости  $V$ ,  $V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$  и  $[\varphi] = \varphi_+ - \varphi_-$ . Параметрам потока слева от перегородки приписан индекс минус, справа – плюс, а величинами, средним по минимальным сечениям проходящих отверстий перегородки – индекс  $m$ .  $X, Y, Z$  – компоненты силы  $F$ , действующей со стороны потока на единицу площади перегородки. При рассмотрении течения в целом толщиной перегородки и характерным линейным размерам перфорации  $d$  можно пренебречь.

Наряду с основными соотношениями (4) необходимы дополнительные выражения для  $F$ , которые связаны со структурой локального течения через перфорацию.

В случае “густых” перегородок, длина каналов которых велика по сравнению с их поперечными размерами, можно принять равенства:

$$v_m = v_+ = 0, \quad w_m = w_+ = 0. \quad (5)$$

Эти условия можно использовать для определения  $Y$  и  $Z$ .

Считается, что вместо задания  $X$  проще и удобнее постулировать ту или иную схему перетекания газа через перегородку. При дозвуковом потоке слева от перегородки, поджатие газа, сопровождающее падением давления, происходит изоэнтропически т.е.

$$S_- = S_m. \quad (6)$$

Здесь  $S$  – удельная энтропия или любая ее функция. Равенства (4), (5) вместе с (6) и отношениями:

$$f\rho_m u_m = \rho_- u_-, \quad 2I_m + u_m^2 = 2I_- + V_-^2. \quad (7)$$

и уравнениями состояния  $I = I(P, \rho)$  и  $S = S(P, \rho)$  представляют систему условий, связывающих параметрами слева от перегородки и в ее минимальном сечении, где  $f = \sum_m / \sum$  – степень поджатия перфорации.

На режиме P1, в которой  $M_m < 1$ , используется известная схема отрывного истечения (удар Борда), когда на перегородку справа действует постоянное давление  $P = P_m$ . На заданном этапе предполагается, что каналы перфорации в направлении течения либо сужаются, либо имеют постоянные поперечные сечения.

Третье уравнения (4) на режиме P1 принимает вид

$$P_+ + \rho_+ u_+^2 = P_m + f\rho_m u_m^2 \quad (8)$$

На данном режиме параметры, входящие в (4)–(8), находятся одновременно с решением всей задачи о распаде разрыва.

В обеих задачах течения моделируются квазиодномерной, двухслойной моделью течения двухжидкостной смеси и течения идеального газа, где границей раздела слоев служит в первой задаче пелена, а в другой перфорированная перегородка. Перегородка, как и пелена, моделируется поверхностью гидродинамического разрыва для параметров газа при предположении стационарности, перетекания газа через нее. Приводятся основные соотношения на разрывах при различных режимах перетекания. При качественном исследовании системы уравнений двух потоков, разделенных разрывом, определены виды особых точек. Осуществлен переход через звуковые точки, которые являются седлами. Определены основные параметры, характеризующие течения в слоях.

При дозвуковом режиме перетекания, соотношения на разрывах: и в пелене, и в перегородке получены с использованием предположения о сохранении энтропии при втекании газа в пористую среду, и схемы "удар Борда" при вытекании из нее.

Выполненные численные расчеты показывают, что изменение степени проницаемости перфорированной перегородки приводит к заметной перестройке течения газа в области в целом.

В разделе 3.3. в качестве демонстрации разработанной модели в работе рассмотрена задача о двухфазном течении смеси газа и твердых частиц в канале переменного сечения с разрывами типа пелены, в квазиодномерной двухслойной постановке.

Пользуясь прямоугольной или цилиндрической системами координат, начало координат поместим в плоскости, где пристеночная пелена отрывается со стенки, ось  $x$  направим слева направо в сторону течения по оси или по плоскости симметрии, а ось  $y$  – перпендикулярно оси  $x$ .

В рамках двухжидкостной модели, применительно к данной задаче система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} e + \frac{u^2}{2} + W \left( e_s + \frac{u_s^2}{2} \right) &= \text{const}, \\ \rho u du + \rho u W du_s + dP &= 0, \\ \frac{du_s}{dx} &= \varphi^f \left( \frac{u}{u_s} - 1 \right), \quad \frac{dT_s}{dx} = \varphi^q \frac{T - T_s}{u_s}, \quad \rho u F = \text{const}, \end{aligned} \quad (9)$$

$u$  –  $x$ -компонента скорости потока,  $P$  – давление,  $T$  – температура,  $\rho$  – плотность,  $e$  – удельная внутренняя энергия газа,  $F(x)$  – площадь поперечного сечения сопла,  $W$  – отношение расходов частиц и газа. Параметры с индексом  $s$  приписаны соответствующим величинам для частиц.

Уравнения состояния имеют вид:

$$e = e(P, T), \quad \rho = \rho(P, T), \quad e_s = e_s(T_s), \quad (10)$$

функции, стоящие справа известны,  $\varphi^f$  и  $\varphi^q$  являются известными функциями термодинамических параметров и модуля относительной скорости  $u - u_s$ , но не их производных.

Отметим, что система уравнений (9) выполняется в области непрерывности, т.е. вне пелены.

Для решения задачи в целом, принимаем двухслойную модель, предусматривающую разделение потока на двухфазную область течения и на область течения пристеночного слоя чистого газа. Здесь границей раздела двух слоев служит свободная пелена, сошедшая со стенки сопла, причем положение ее заранее неизвестно.

Введем отмеченные чертой вверху переменные для обозначения соответствующих параметров для слоя чистого газа. Величинами с индексом  $m$  соответствующие параметры газа в пелене. Система уравнений, описывающая раздельное течение двухжидкостной смеси и чистого газа можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho u F}{dx} &= -(1 + v)y_s^v(x)g_m, \\ \frac{d(\rho u^2 F + PF + \rho_s u_s^2 F)}{dx} &= PF' - (1 + v)y_s^v(x)g_m, \\ \frac{d\rho u FS}{dx} &= -(1 + v)y_s^v(x)g_m S, \\ \frac{d\bar{\rho} \bar{u} \bar{F}}{dx} &= (1 + v)y_s^v g_m, \quad \frac{du_s}{dx} = \varphi^f \left( \frac{u}{u_s} - 1 \right), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{d(\bar{\rho}\bar{u}^2\bar{F} + \bar{P}\bar{F})}{dx} = \bar{P}F', \quad \frac{dT_s}{dx} = \varphi^q \frac{T - T_s}{u_s},$$

$$\frac{d\bar{\rho}\bar{u}\bar{F}\bar{S}}{dx} = (1 + \nu)y_s^\nu(x)g_m S_m, \quad \rho_s = \frac{(y_s^{1+\nu}\rho_s u_s)}{y_s^{1+\nu}u_s},$$

причем  $y_s(x)$  – уравнение положения свободной пелены,  $\nu=0$  и  $1$  в плоском и осесимметричном случаях соответственно,  $g_m$  – расход газа через пелену,  $S$  – энтропийная функция.

Показано, как сошедшая пелена собирает частицы, отделяя области смеси и чистого газа и как бы фильтруя смесь. В моделях с поглощающими стенками, где частицы прекращают свое существование, те же области разделяются тангенциальными разрывами сплошной среды частиц, через которые перетекает чистый газ. Отмечена, когда при течении в сопле оторвавшаяся пелена либо вновь попадает на стенку, либо "шнурится" у оси.

В случае, когда свободная пелена шнуруется у оси, частицы не выпадают в шнур из-за его нулевой толщины и взаимодействие шнура с газом и частицами несущественно (рис.2). Следовательно, шнур движется по прямолинейной траектории, которая совпадает с осью и имеет постоянные параметры, определяемые следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \rho^1 U^1 &= 2\pi y \rho_s^\sigma U_s^\sigma = \text{const} + O(y^2), \quad \rho^\sigma \sim \frac{1}{y}, \\ \rho^1 U^1 U^1 &= 2\pi y \rho_s^\sigma (U_s^\sigma)^2 \cos \beta = \text{const} + O(y^2), \\ \rho^1 U^1 E^1 &= 2\pi y \rho_s^\sigma U_s^\sigma E_s^\sigma = \text{const} + O(y^2), \end{aligned} \quad (12)$$

$\beta$  – угол между свободной пеленой и осью  $x$ .

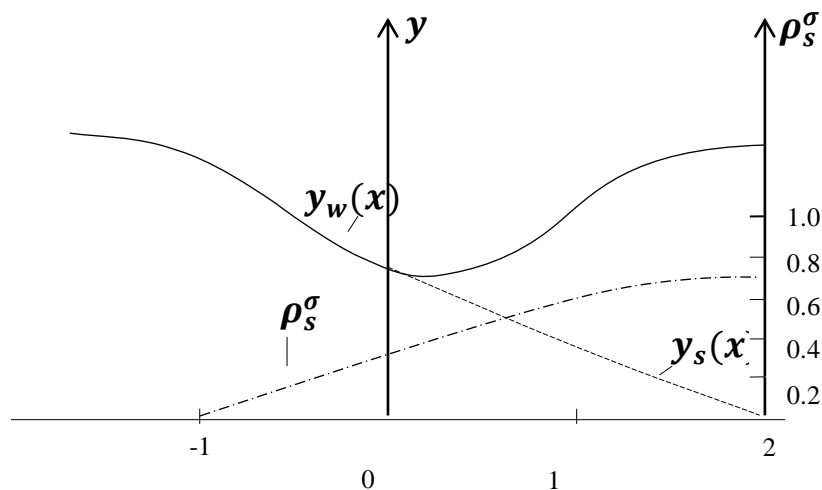


Рис.2. Положение свободной пелены

Распределения скоростей пелены, частиц и газа по оси показаны на рисунке 3. Здесь сплошная кривая соответствует распределению скорости газа,

штриховая - скорости частиц, а штрих-пунктирная - скорости пелены. Из-за взаимодействия с газом скорость пелены уменьшается в начале, поскольку газ тормозит ее, а затем увеличивается, т.е. газ увлекает ее за собой.

Заметим, что проницаемость пелены в данном случае постоянная и  $m_s = f = 0.81 \div 0.91$ . На рисунке 4 показано распределение скоростей газа на нижнем (сплошная) и на верхнем (штриховая) слоях газа.

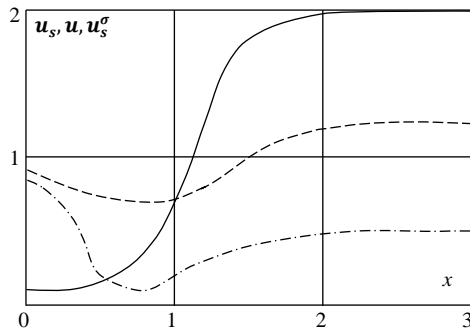


Рис.3. Распределение скоростей газа, частиц, пелены

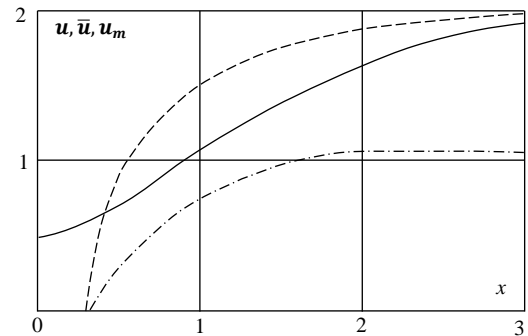


Рис.4. Распределение скоростей на нижнем и верхнем слоях

Отметим, что полученные решения реализуются в почти замороженном режиме течения двухфазного потока, когда взаимодействие газа с твердыми частицами незначительно.

В итоге численного моделирования разработана компьютерная программа, реализующая расчет задачи одномерного течения идеального газа в канале переменного сечения, с целью доказательства корректности метода вычисления. Программа разработана в среде программирования Microsoft Visual Studio 2010 с применением языка объектно-ориентированного программирования C# (рис.5).

Систему дифференциальных уравнений (11), описывающих одномерное течение идеального газа в сопле Лавалия решаем с применением приближенного метода Рунге-Кутты 4-го порядка точности.

Компьютерная программы обладает интуитивным интерфейсом и понятна в использовании, функционал программы реализует алгоритм метода Рунге-Кутты и позволяет получить результаты вычислительных экспериментов с относительной погрешностью  $\varepsilon=10^{-6}$  в табличном виде и в виде графиков распределения физических параметров течения газа в канале.

X	давление P	скорости W	температура T	плотность газа rho	тепловая скорость звука DC	Формула между скоростью и температурой	Относительная погрешность
0.005	186055.583	47.487	425.325	4.893	0.381	-0.000015	-0.00001
0.010	588956.522	79.968	420.333	4.836	0.382	-0.000009	-0.000012
0.015	571428.571	112.849	420.103	4.745	0.327	-0.000007	-0.000006
0.020	551025.408	145.427	415.760	4.623	0.324	-0.000005	-0.000003
0.025	526525.240	178.119	410.461	4.477	0.322	-0.000004	-0.000002
0.030	500000.000	210.461	404.377	4.313	0.321	-0.000004	-0.000002
0.035	471615.721	242.275	397.681	4.137	0.320	-0.000003	-0.000001
0.040	442622.951	268.456	390.537	3.953	0.319	-0.000003	-0.000001
0.045	412793.103	294.969	383.093	3.768	0.319	-0.000003	-0.000001
0.050	382174.286	319.825	375.479	3.583	0.318	-0.000002	-0.000001
0.055	350803.987	343.072	367.800	3.403	0.318	-0.000002	-0.000001
0.060	319333.333	364.780	360.143	3.228	0.318	-0.000002	-0.000001
0.065	300455.987	385.034	352.575	3.062	0.318	-0.000002	-0.000001

Рис.5. Таблица результатов расчета

Представление или визуализации результатов вычисления в виде графиков позволяют оценить физические параметры процесса течения газа и установить его закономерности, как видно на рис.6.

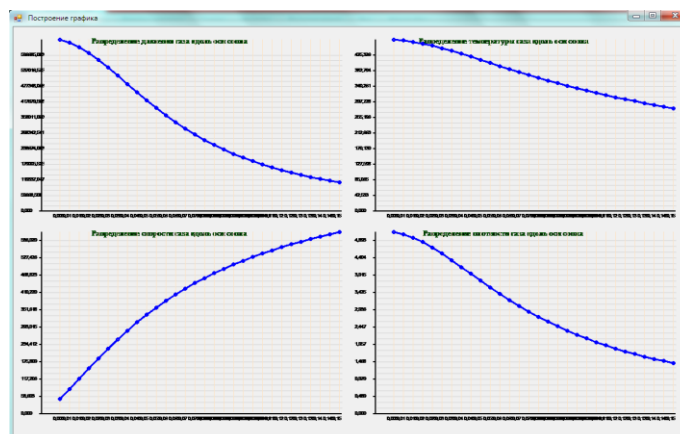


Рис. 6. Графики распределения параметров газа в одном окне

**В четвертой главе** представлены результаты вычислительных экспериментов в прикладном программном пакете ANSYS Fluent 15.0 с применением CFD-метода и средств компьютерного моделирования процессов течения газа в канале переменного сечения.

В разделе 4.1. решена задача истечения турбулентной осесимметричной струи из сопла в двумерной постановке. Расчётная область и само течение являются симметричными, таким образом, рассматриваем задачу в половине области (рис.7). Для создания сеточной модели задаются параметры сетки, производится ее проверка и масштабирование. Используем двумерные четырехугольные элементы, которые позволяют рассчитать турбулентное течение вязкой сжимаемой жидкости. Расчетная область разбивается на элементы, распределенные неравномерно, вблизи оси симметрии возле сопла, на основном участке движения струи и вдоль стенки, где больше градиенты параметров течения, элементы расположены густо и имеют небольшие размеры. На остальных участках, где градиенты малы, элементы расположены реже и имеют большие размеры. При задании параметров расчетной области потребовалось 21205 элементов. Для получения результатов достаточной точности, расчет потребовал 40000 итераций и длился около 12 часов. Использовалась следующая конфигурация компьютера: процессор - Intel ® Core (TM) i3-2350 CPU, тактовая частота ядра 2,30 ГГц (при стандартной частоте 2,30 ГГц); тип процессора – четырехядерный; оперативная память 4 Гб.

За рабочее тело выбираем жидкость (fluid) - модель вязкого газа с постоянным коэффициентом теплоемкости при постоянном давлении  $C_p$  – Air Ideal Gas (constant  $C_p$ ). Динамическая вязкость подчиняется закону Сазерленда (температурная зависимость). Граничные условия определяем в соответствии со схемой расчетной области, приведенной на рис.8:

На входе в сопло определяем: полное давление (pressure-inlet)  $P = 2.5 \cdot 10^5$  Па; параметры турбулентности - Turbulent Intensity=1.5%, Turbulent Length Scale= 10 мм; температура  $T = 287$  К.

На выходе расчетной области задаем: полное давление (pressure-outlet)  $P = 1.008 \cdot 10^5$  Па; температура  $T = 294$  К; параметры турбулентности такие же как на входе. На стенках (wall): температура  $T = 287$  К.

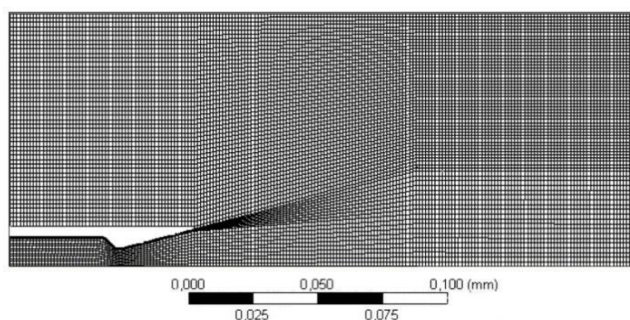


Рис.7. Сеточная модель

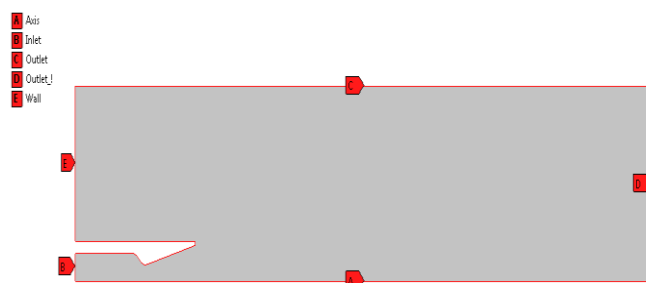


Рис.8. Границы

Проведено расчетное исследование процесса истечения турбулентной струи из сопла Лавалья и тестирование  $k-\epsilon$  - модели турбулентности, применяемой для моделирования течений вблизи стенок канала. (рис.9).

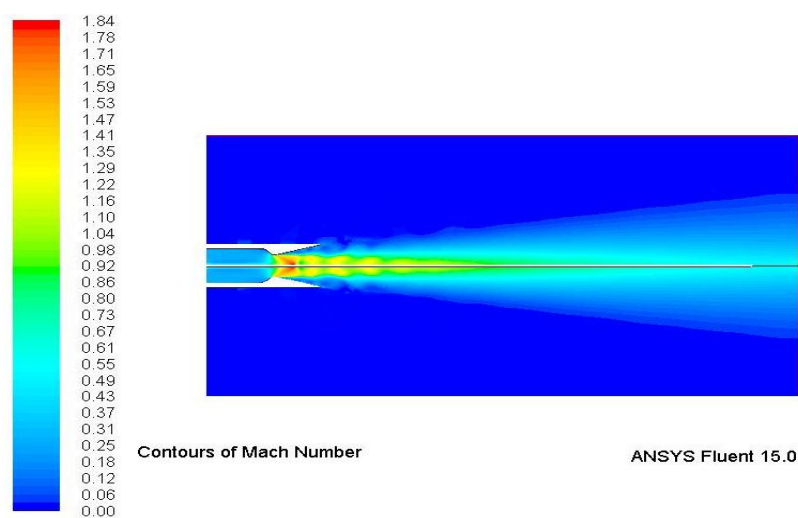


Рис.9. Поле чисел Маха

Применен метод конечных элементов высокого порядка точности для численного моделирования турбулентного истечения осесимметричной струи из сопла. Выявлено, что качество сеточной модели существенно влияет на результаты вычислительного эксперимента.

В разделе 4.2. решена задача двухфазного течения смеси жидкости и твердых частиц под давлением в сопловом насадке (рис.10), с целью определения физических закономерностей процесса течения и влияния входного давления и объёмного содержания твердой фазы в смеси на износ сопла. Расчетная область задачи изображена на рис.11.

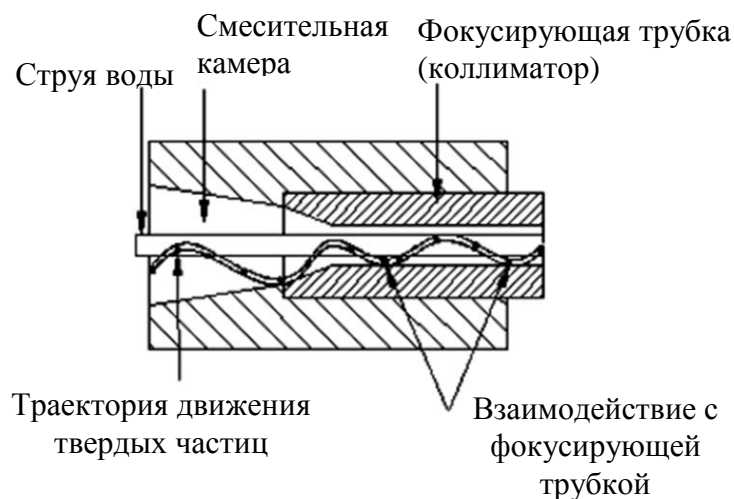


Рис.10. Процесс смешивания твердых частиц со струей воды

Численное моделирование течения проводилось с использованием многофазной модели Эйлера. Для стационарного несжимаемого потока решаются дифференциальные уравнения в частных производных сохранения массы, рассчитывающие объемную долю каждой фазы и количества движения, сформулированные для каждой из двух фаз.

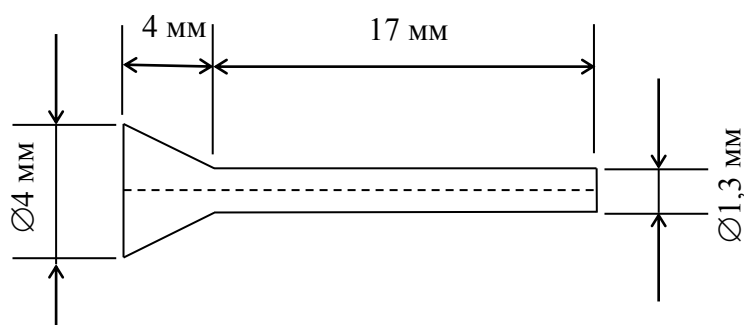


Рис. 11. Размеры расчетной области

При численном моделировании смеси газа и твердых частиц задаем две фазы, где вода рассматривается как несущая фаза – жидкая фаза I, а песок граната как твердые частицы – твердая фаза II. Входные параметры материалов двух фаз, используемые в анализе, приведены в таблице 1.

Таблица 1.- Входные параметры материалов для моделирования

№	Параметры	Значение
1	Объемная доля твердых частиц	5%, 10%, 15
2	Плотность I фазы – жидкая фаза	998,2кг/м <sup>3</sup>
3	Плотность II фазы – твердая фаза (песок граната)	2300 кг/м <sup>3</sup>
4	Вязкость I фазы	0,001003 кг/(м.с)
5	Вязкость II фазы	1,7894е-05 кг/(м.с)
6	Размер частицы	0.1 мм



Результаты эксперимента, полученные в работе G. Hu, W.Zhu, T.Yu J. Yuan, использовались для подтверждения адекватности настоящей численной модели.

График распределения скорости жидкой фазы (рис.12), полученный при численном моделировании был сопоставлен с графиком, указанным в работе G. Hu, W.Zhu, T.Yu J. Yuan, как показано на рисунке 13. Очевидно, что между двумя моделями существует согласованность относительно распределения скоростей.

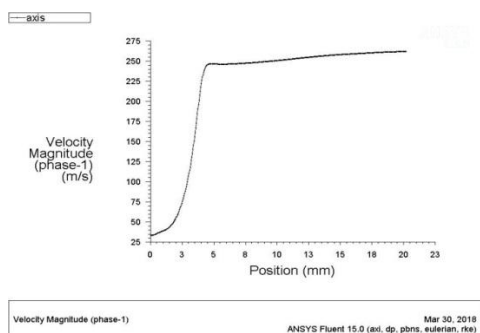


Рис. 12. Распределение скорости вдоль сопла

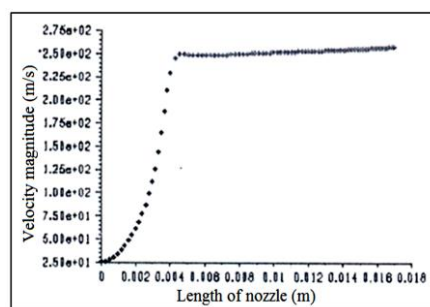


Рис. 13. Распределение скорости жидкой фазы из работы G. Hu и др.

Проведено расчетное исследование процесса двухфазного течения смеси газа и твердых частиц в канале переменного сечения и тестирование k-ε модели для моделирования турбулентности течения.

Выявлены закономерности влияния рабочего давления на входе и объемной доли твердой фазы на касательное напряжение на стенки канала (рис.14).

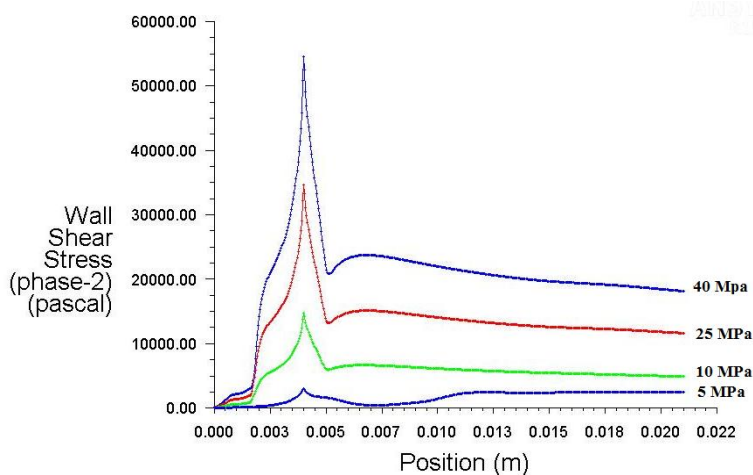


Рис. 14. Зависимость входного давления и касательного напряжения

Установлено, что для любого заданного входного рабочего давления касательное напряжение на стенки канала начинает увеличиваться в сходящейся секции сопла и достигает пика вблизи критического участка, что связано с внезапным изменением градиента скорости, соответствующего изменению площади в критическом сечении канала (рис15.).

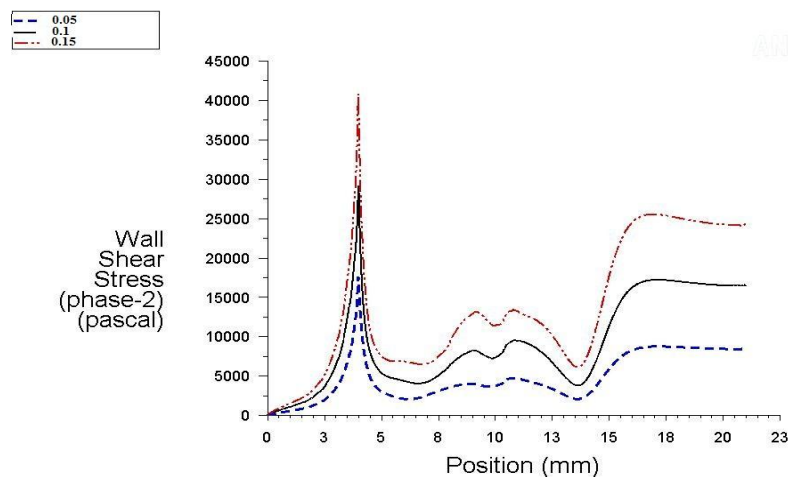


Рис.15. Зависимость объемной доли твердых частиц в смеси и касательного напряжения

Установлено, что увеличение объемной доли твердых частиц в смеси приводит к увеличению касательного напряжения на стенки канала, быстрому разрушению стенок и к износу сопла. Почти весь импульс осажденных конденсированных частиц уничтожается трением, и вклад в импульс смеси от движения пристеночного слоя твердых частиц пренебрежимо мал.

Применен метод контрольных объемов для компьютерного моделирования двухфазного течения смеси газа и твердых частиц в канале переменного сечения.

В разделе 4.3. в рамках реализации компетентностного подхода к подготовке инженеров дано обоснование необходимости применения математического моделирования, численных методов вычислительной гидродинамики, систем и технологий инженерных расчетов, CAE/CAD – технологий в обучении специальных дисциплин. Предложена модель формируемых профессиональных компетенций решения технико-экономических задач при подготовке специалистов по инженерным направлениям, в основу которой положены следующие компетенции: общепрофессиональные компетенции, профильно-ориентированные компетенции, компетенции владения базовыми технологиями, исходящие (рабочие) компетенции, дополнительные компетенции.

В разделе 4.4. предложены технологии обучения: кейс-метод, имитационное моделирование, исследовательский метод, как необходимые составляющие в формировании учебного знания, познавательной деятельности и практических навыков в решении проблемно-ориентированных задач по дисциплинам «Вычислительные методы», «Моделирование сложных систем», «Планирование вычислительного эксперимента», «Вычислительная гидродинамика», «Гидрогазодинамика» и другие.

Разработана методика расчетного исследования и компьютерного моделирования стационарного течения газа в канале переменного сечения, которая позволит построить адекватные модели и получить достоверные результаты при исследовании подобных течений (Приложение 3).

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Созданы математические модели двухжидкостного течения смеси газа и твердых частиц с поверхностью разрыва типа пелены в сопле и течения идеального газа в канале переменного сечения с перфорированной перегородкой:
  - проведена численная реализация задачи о двухжидкостном течении смеси газа и твердых частиц с поверхностью разрыва типа пелены в сопле, отмечены особенности задачи, связанные со сходом со стенки пристеночной пелены, образующейся из-за инерционного выпадения твердых частиц в суживающейся части сопла.
  - проведена численная реализация задачи о течении идеального газа в канале переменного сечения с перфорированной перегородкой, определены параметры течения двух слоев, влияние перфорированной перегородки на параметры течения газа в ней и в целом. Установлено, что определяющим фактором воздействия перфорированной перегородки на поток, является степень проницаемости перегородки.
  - разработана программа, позволяющая провести расчет задачи об одномерном течении идеального газа в канале переменного сечения, с целью доказательства корректности метода вычисления.
2. Проведено компьютерное моделирование, и расчетное исследование в ANSYS Fluent 15.0 процесса истечения осесимметричной турбулентной струи из сопла Лаваля. В расчете получено удовлетворительное воспроизведение ударно-волновой структуры течения, выявлено, что крупные вихри, формирующиеся в зоне смещения турбулентной струи порождают пульсирующее поле давления. Средняя по времени величина давления зависит от относительного расстояния между параллельными отрезками замкнутого крупного вихря, расположенного в поперечном сечении струи.
3. Проведены расчетные исследования для компьютерного моделирования двухфазного течения смеси газа и твердых частиц в канале переменного сечения в ANSYS Fluent 15.0. Установлено, что увеличение объемной доли твердых частиц в смеси и рабочего давления на входе приводит к увеличению касательного напряжения на стенки канала, быстрому разрушению стенок и к износу сопла. Почти весь импульс осажденных конденсированных частиц уничтожается трением, и вклад в импульс смеси от движения пристеночного слоя твердых частиц пренебрежимо мал.
4. Разработана методика расчетного исследования и компьютерного моделирования стационарного течения идеального газа в канале переменного сечения, которая позволит построить адекватные модели и получить достоверные результаты при исследовании подобных течений.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Картанова, А.Дж. Технологические задачи объемного формоизменения [Текст] / А.Дж. Картанова, Я. И. Рудаев, С.М. Сулайманова // Материалы VII Междунар. науч. конф. «Прочность и разрушение материалов и конструкций». – Оренбург, 2010. – Т.2. – С.501-511.
2. Картанова, А.Дж. Компетентностный подход в подготовке IT-специалистов [Текст] / А.Дж. Картанова, А.А.Тороев // Вестн. Кырг. гос. ун-та строительство, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова. Междунар. науч.-практ. конф. – Бишкек, 2011. – Т. 1, № 2(32). – С. 34-38. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22767507> – Загл. с экрана.
3. Картанова, А.Дж. Двухжидкостные течения смеси газа и твердых частиц с «пеленами» и «шнурами» в сопле Лавая [Текст] / А. Дж. Картанова, С.М. Сулайманова // Вестн. Кырг. гос. ун-та строительство, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. Междунар. науч.-практ. конф. – Бишкек, 2014. – № 2(44). – С.116-121. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24325011> – Загл. с экрана.
4. Картанова, А.Дж. Расчет двухжидкостного течения смеси газа и твердых частиц в сопле с разрывами типа «пелены» и «шнура» [Текст] / А.Дж. Картанова, С.М. Сулайманова, Н. Кожомбердиева // Изв. КГТУ им. И. Раззакова. Материалы Междунар. науч. конф. «Наука, образование, инновации: приоритетные направления развития». – Бишкек, 2014. – Ч. 2, № 32. – С.53-57. – Режим доступа: [http://libkstu.on.kg/wp-content/uploads/2014/news\\_32\\_2\\_2014.pdf](http://libkstu.on.kg/wp-content/uploads/2014/news_32_2_2014.pdf) – Загл. с экрана.
5. Картанова, А.Дж. Численное моделирование истечения струи из сопла Лавая [Текст] / А.Дж. Картанова // Современные проблемы механики сплошных сред. – Бишкек, 2014. – Вып.20. – С.205-210.
6. Картанова, А.Дж. Моделирование процессов течения газа в областях с перфорированными перегородками [Текст] / А.Дж. Картанова, С.М. Сулайманова // Вестн. НАН Респ.Казахстан. – Алматы, 2015. – № 3. – С.60-66. – Режим доступа: [http://nauka-nanrk.kz/ru/assets/%D0%B6%D1%83%D1%80%D0%BD%D0%B0%D0%BB%202015%203/%D0%92%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%BA\\_03\\_2015\\_%D0%93%D0%9E%D0%A2%D0%9E%D0%92.pdf](http://nauka-nanrk.kz/ru/assets/%D0%B6%D1%83%D1%80%D0%BD%D0%B0%D0%BB%202015%203/%D0%92%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%BA_03_2015_%D0%93%D0%9E%D0%A2%D0%9E%D0%92.pdf) – Загл. с экрана.
7. Картанова, А.Дж. Расчет двухфазного течения смеси газа и твердых частиц в канале с разрывами типа «пелены» и «шнура» [Текст] / А.Дж. Картанова, С.М. Сулайманова // Докл. НАН Респ. Казахстан. – Алматы, 2015. – № 3. – С.143-148. – Режим доступа: [http://nblib.library.kz/elib/library.kz/jurnal/%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4\\_03\\_2015/Kartanova0315.pdf](http://nblib.library.kz/elib/library.kz/jurnal/%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4_03_2015/Kartanova0315.pdf) – Загл. с экрана.
8. Картанова, А.Дж. Расчет течения в трубе переменного сечения с перфорированной перегородкой [Текст] / А.Дж. Картанова, С.М. Сулайманова, Ж. Темирбеков // Материалы третьей Всерос. науч.-техн.

конф. с междунар. участием. Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – Ч. 3. – С.132-137. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24953696> – Загл. с экрана.

9. Картанова, А.Дж. Технологии процесса обучения при изучении биоэтики [Текст] / А.Дж. Картанова, Ж.В. Чашина // Интеграция образования. – Саранск, 2016. – Т. 20, № 1. – С.97-104. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25609164> – Загл. с экрана.
10. Картанова, А.Дж. Компьютерное моделирование истечения струи из сопла Лаваля [Текст] / А.Дж. Картанова, С.М. Сулайманова // Вестн. Кырг.-Рос. Славян. ун-та. – Бишкек, 2017. – Т.17, № 5. – С.31-33. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29729467> – Загл. с экрана.

## РЕЗЮМЕ

**Диссертации Картановой Асель Джумановны «Математическое моделирование процессов течения газа в каналах переменного сечения с применением САЕ-технологий» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.**

**Ключевые слова:** математическая модель, течения газа, твердые частицы, двухфазные течения, квазиодномерная модель, перфорированная перегородка, сопло, ANSYS Fluent, численные методы, программа.

**Объект и предмет исследования:** двухфазные течения смеси газа и твердых частиц в канале переменного сечения и численное моделирование этих процессов, а также проведение расчетных исследований подобных течений в расчетно-программном комплексе ANSYS Fluent 15.0.

**Цель диссертационной работы:** разработка математических моделей двухфазного течения смеси газа и твердых частиц с поверхностями разрыва типа пелены в сопле, течения газа в канале переменного сечения с перфорированной перегородкой и в исследовании возможностей численного моделирования сложных газодинамических явлений в соплах гидротехнических аппаратов, обеспечивающих эффективность применения струй высокого давления.

**Методы исследования:** теория механики сплошных сред, методы вычислительной гидродинамики, приближенные методы.

**Аппаратура:** ноутбук Intel Core i3, ANSYS Fluent 15.0.

**Полученные результаты и их новизна:** Разработаны математические модели двухжидкостного течения смеси газа и твердых частиц в сопле и стационарного течения идеального газа в канале переменного сечения с перфорированной перегородкой в квазиодномерной двуслойной постановке. Получены уравнения и соотношения различных режимов течения и влияния поверхностей разрыва на поток. Проведены расчетные исследования, получены результаты, пригодные для компьютерного моделирования параметров одно- и двухфазных течений газа в среде ANSYS Fluent 15.0.

**Использование результатов исследования:** Разработанные модели течений идеального газа, предложенные приемы и методы могут применяться при численном моделировании широкого круга задач газовой динамики либо как инструмент решения, либо для улучшения качества решения и повышения быстродействия реализующих его алгоритмов.

**Область применения:** Численные алгоритмы и программы могут применяться при исследовании струй сверхвысокого давления в различных гидротехнических машинах и при обучении студентов инженерных направлений подготовки, изучающих механику жидкости и газа и вычислительную гидродинамику.

**Картанова Асель Джумановнанын «Кесилиши өзгөрүлмө түтүктөрдөгү газ агымдарынын процесстерин САЕ-технологияларын колдонуу менен математикалык моделдөө» деген темадагы, адистиги: 05.13.18 «Математикалык моделдөө, сандык эсептөөлөр жана программалардын комплекси» боюнча физика-математика илимдеринин кандидаты илимий даражасын изденип алууга диссертациясынын**

## **ТАРЖЫМАЛЫ**

**Ачкыч сөздөр:** математикалык модель, газдын агымы, катуу бөлүкчөлөр, эки фазалуу агымдар, дээрлик бир өлчөмдүү коюулуш, перфорацияланган тосмо, сопло, ANSYS Fluent, сандык методдор, программа.

**Изилдөөнүн объекти жана предмети:** кесилиши өзгөрүлмө каналдарда газдын жана катуу майда бөлүкчөлөрдүн эки фазадагы агымдары жана бул процесстерди сандык эсептөөлөрү, ошондой эле ANSYS Fluent 15.0 программалык комплексте ушуга окшош агымдардын эсептөө изилдөөлөрүн жүргүзүү.

**Диссертациялык иштин максаты:** Сопло-түтүктөгү “пелена” түрүндөгү үзүлүш беттери менен эки фазадагы газ жана катуу майда бөлүкчөлөрдүн биргелешкен агымынын, тешиктери бар тосмо орнотулган кесилиши өзгөрүлмө түтүктөгү таза газдын агымын математикалык моделдөөдөн жана жогорку басымдагы суюктук агымын колдонуунун натыйжалуулугун камсыздоочу гидротехникалык аппараттардын түтүктөрүндөгү татаал газ динамикасынын кубулуштарын сандык эсептөө мүмкүндүктөрүн изилдөөдөн турат.

**Изилдөөнүн методдору:** үзгүлтүксүз чөйрөнүн механикасынын теориясы, гидродинамикалык эсептөөлөрдүн методдору, жакындатылган эсептөөлөр методдору.

**Аппаратура:** ноутбук Intel Core i3, ANSYS Fluent 15.0.

**Алынган жыйынтыктар жана алардын жаңылыгы:** “Пелена” түрүндөгү үзүлүш бети менен газ жана катуу майда бөлүкчөлөрдүн аралашмасынын бири бирине өтүшкөн эки суюктук катары караган соплодогу агымынын модели жана тешиктери бар тосмосу менен кесилиши өзгөрүлмө түтүктөгү идеалдык газдын стационардык агымынын модели иштелип чыкты. Бул эки маселе тең дээрлик бир өлчөмдүү коюлушта каралды. ANSYS Fluent 15.0. программалык комплексинде кесилиши өзгөрүлмө каналдарда газдын жана катуу майда бөлүкчөлөрдүн эки фазадагы агымынын эсептөөлөрү жүргүзүлдү.

**Изилдөөнүн корутундуларын колдонуу:** Иштелип чыккан кесилиши өзгөрүлмө каналдардагы газдын жана катуу бөлүкчөлөрдүн эки фазалуу агымынын моделдери жана ыкмалар газдардын динамикасынын кеңири камтылган маселелерин сандык жактан чыгарууда инструмент, же чыгарылыштарды жакшыртуунун жолдору катары колдонулса болот.

**Колдонуу тармактары:** Сандык алгоритмдер жана программалар ар кандай гидротехникалык машиналардагы жогорку басымдагы агымдарды изилдөөдө жана суюктуктардын жана газдардын механикасын, эсептик гидродинамиканы окуп жаткан, даярдоонун инженердик багыттарына студенттерди окутууда колдонулат.

## SUMMARY

**The dissertation of Asel Dzhumanovna Kartanova “Mathematical modeling of gas flow processes in variable cross-section channels with the use of CAE-technologies” for the academic degree of candidate of physico-mathematical sciences in the specialty: 05.13.18 - Mathematical modeling, numerical methods and program complexes.**

**Keywords:** mathematical model, gas flow, solid particles, two-phase flow, quasi-one-dimensional model, perforated partition, nozzle, ANSYS Fluent, numerical methods, program.

**The object and subject of research:** two-phase flows of a mixture of gas and solid particles in a variable cross-section channel and numerical modeling of these processes, as well as carrying out computational studies of similar flows in the

**The purpose of dissertation:** the development of mathematical models of two-phase flow of a mixture of gas and solids with discontinuity surfaces such as filament in a nozzle, gas flow in a variable cross-section channel with a perforated partition and the study of the possibilities of numerical simulation of complex gas-dynamic phenomena in nozzles of hydraulic devices, ensuring the efficiency of high jets pressure.

**Research methods:** theory of mechanics of continue, methods of computational fluid dynamics, approximate methods.

**Hardware:** Intel Core i3 laptop, ANSYS Fluent 15.0.

**The obtained results and novelty:** Mathematical models of two-fluid flow of a mixture of gas and solid particles in a nozzle and stationary flow of an ideal gas in a variable cross-section channel with a perforated partition in a quasi-one-dimensional two-layer formulation have been developed. Equations and relations are obtained for various flow regimes and the effects of discontinuity surfaces on flow. Calculation studies have been carried out, and results have been obtained that are suitable for computer simulation of the parameters of one- and two-phase gas flows in the ANSYS Fluent 15.0 medium.

**Using the results of the research:** The developed models of ideal gas flows, the proposed techniques and methods can be used in numerical modeling of a wide range of gas dynamics problems either as a solution tool or to improve the quality of a solution and increase the speed of algorithms implementing it.

**Scope:** Numerical algorithms and programs can be used in the study of ultra-high pressure jets in various hydraulic engineering machines and in teaching students of engineering training courses that study the mechanics of fluid and gas and computational fluid dynamics.



**Картанова Асель Джумановна**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В КАНАЛАХ  
ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ CAE-ТЕХНОЛОГИЙ**

Автореферат диссертации

Подписано в печать 23.11.2018 г.  
Формат 60х84/16. Объем 1,25 п.л.  
Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Тираж 100 экз. Заказ 616.

---

720020, Бишкек, ул. Малдыбаева, 34 б,  
Кыргызский Государственный университет строительства,  
транспорта и архитектуры им. Н.Исанова  
Учебно-издательский центр «Авангард»