

На правах рукописи

АСМОЛОВСКИЙ Николай Александрович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЛАБЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ
С ГАЗОВЫМИ СРЕДАМИ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном
образовательном учреждении высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»
(национальный исследовательский университет)
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**Научный
руководитель:** доктор технических наук, доцент
Баскаков Владимир Дмитриевич

**Официальные
оппоненты:** **Герасимов Сергей Иванович,**
доктор физико-математических наук, старший научный со-
трудник, Федеральное государственное унитарное предприя-
тие «Российский федеральный ядерный центр – Всерос-
сийский научно-исследовательский институт эксперимен-
тальной физики», начальник отдела

Воротилин Михаил Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государ-
ственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Тульский государственный университет»,
заместитель директора Института высокоточных систем
им. В.П. Грязева

**Ведущая
организация:** Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный исследо-
вательский Томский государственный университет»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2017 г. в __ час. __ мин.
на заседании диссертационного совета Д 212.141.15 при Московском государ-
ственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005,
г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5, стр.1, зал Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте
(www.bmstu.ru) Московского государственного технического университета
имени Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

 А.В. Аттетков

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Существует важный класс задач, посвященный изучению влияния слабых технологических возмущений на быстропротекающие процессы. К таким задачам относятся воздействие продуктов детонации взрывчатых веществ на деформируемые тела в условиях влияния технологических возмущений, процессы несимметричного высокоскоростного пластического деформирования, а также возмущенного движения несимметричного тела в низкоплотных газовых средах. Влияние технологических погрешностей на быстропротекающие процессы в наибольшей степени проявляется в кумуляции, где слабые возмущения, в силу сходящегося высокоскоростного движения, могут вызывать значительные нарушения симметрии процесса высокоскоростного деформирования облицовки. Это особенно заметно для кумулятивных зарядов с менисковой облицовкой.

При взрыве кумулятивного заряда (КЗ) с менисковой облицовкой под действием давления со стороны продуктов детонации из облицовки формируется высокоскоростной элемент (ВЭ) с внутренней полостью и складчатой кормовой частью. В условиях действия малых технологических возмущений нарушается симметрия кумуляции: ВЭ приобретает поперечную и угловую скорости и движется в атмосфере по сложной траектории к преграде. Кроме того, в процессе формирования ВЭ может разрушиться. Основным инструментом при разработке и совершенствовании такого рода устройств является математическое моделирование.

Изучению процесса несимметричной кумуляции уделяется большое внимание, как в России, так и за рубежом. Например, в МГТУ им. Н.Э. Баумана и ТулГУ разработаны приближенные методики, основанные на аналитических зависимостях и экспериментальных данных. Однако возможности таких методик ограничены в силу несовершенства модельных представлений о механизмах влияния слабых технологических возмущений на процессы высокоскоростного деформирования твердых тел. Большинство исследований базируется на численном анализе моделей механики деформируемого твердого тела. Особенно следует отметить работы МГТУ им. Н.Э. Баумана, Института Эрнста-Маха (Германия), Университета Поля Верлена (Франция), Сандийских национальных лабораторий (США), Университета Техаса (США) в области анализа процесса формирования ВЭ, а также работы Нанкинского научно-технологического университета (Китай) по влиянию особенностей детонации на форму ВЭ.

Несмотря на важность проведенных исследований, малоизученными остаются вопросы влияния слабых возмущений технологической природы на кинематические, геометрические и аэродинамические параметры ВЭ. В этой связи необходимо создание специализированных моделей, алгоритмов и программ, расширяющих возможности универсальных программных комплексов

(ПК) таких как LS-Dyna и Ansys Autodyn, применяемых для количественных исследований путем вычислительных экспериментов в области кумуляции.

Цель проведенных исследований – разработка математических моделей, высокопроизводительных численных алгоритмов и программ для оценки влияния слабых технологических возмущений менисковой облицовки на геометрические, кинематические и аэродинамические параметры высокоскоростного полого элемента со складчатой кормовой частью, формируемого при взрыве кумулятивного заряда.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение **следующих основных задач:**

1. Разработка математической модели погрешностей менисковой облицовки кумулятивного заряда и алгоритма их введения в конечно-элементную расчетную сетку.

2. Разработка алгоритмов определения геометрических и кинематических параметров ВЭ с учетом нарушения его осевой симметрии и возможных разрушений при взрывном обжатии менисковых облицовок.

3. Разработка математической модели, высокопроизводительного алгоритма и программы расчета для определения аэродинамических сил, действующих на ВЭ с конической и складчатой кормовой частью при его движении с гиперзвуковой скоростью с учетом слабых кинематических возмущений, обусловленных технологическими погрешностями.

Методы исследования. При решении задач диссертационной работы использовались различные классы математических методов: вычислительной механики сплошной среды, компьютерной графики, дискретной математики.

Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов гарантируется строгостью математического аппарата и подтверждается сравнением результатов, полученных при помощи различных методов. Разработанные алгоритмы и программы были проверены на тестовых задачах. Результаты диссертационной работы согласуются с известными результатами других авторов.

Научная новизна. В диссертации получены следующие новые научные результаты, выносимые на защиту:

1. Математическая модель слабых технологических возмущений и алгоритм их введения в расчетную схему КЗ, основанный на искажении первоначально осесимметричной расчетной сетки в соответствии с распределением случайной технологической погрешности, задаваемым суммой тригонометрических гармоник.

2. Алгоритм определения геометрических и кинематических параметров ВЭ с учетом возможного разрушения материала при взрывном обжатии менисковых облицовок с технологическими погрешностями, основанный на вычислении множества конечных элементов, образующих ВЭ, с помощью

алгоритма поиска пути в графе, начиная с элемента, подверженного наименьшей деформации.

3. Математическая модель для экспресс-оценки аэродинамических коэффициентов осесимметричного ВЭ, движущегося с гиперзвуковой скоростью в условиях действия слабых кинематических возмущений, обусловленных влиянием технологических погрешностей.

4. Численный высокопроизводительный алгоритм и реализующий его программный комплекс АэроЕФП для определения аэродинамических коэффициентов ВЭ со складчатой кормовой частью при его гиперзвуковом движении в атмосфере Земли с учетом влияния кинематических возмущений.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что разработанные математические модели, численные методы и комплексы программ позволяют проводить анализ влияния технологических погрешностей КЗ на геометрические, кинематические и аэродинамические параметры ВЭ, формируемого при взрывном обжиге менисковой облицовки. Результаты работы могут быть использованы при назначении допусков на геометрические параметры деталей КЗ.

Разработан и зарегистрирован программный комплекс АэроЕФП (свидетельство о государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности Российской Федерации №2016617398 от 04.07.2016 г.), позволяющий проводить расчет аэродинамических коэффициентов параметризованной геометрической модели ВЭ со складками, движущегося с гиперзвуковой скоростью в атмосфере Земли с учетом влияния малых кинематических возмущений. В основе комплекса лежит алгоритм автоматического определения области аэродинамической видимости. Реализованные в комплексе положения и допущения позволяют существенно сократить время расчета по сравнению с численными гидродинамическими решателями.

Аналитические зависимости аэродинамических коэффициентов цилиндрикоконического ВЭ, полученные при использовании упрощенного аналога базовой модели обтекания, могут быть использованы при экспресс-оценках влияния кинематических возмущений, вызванных погрешностями, на особенности траектории.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной конференции «Ударные волны в конденсированных средах» (Санкт-Петербург, 2010), Международной конференции «Харитоновские тематические научные чтения» (Саров, 2011), VIII Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике» (Москва, 2015).

Публикации. Основные научные результаты диссертации отражены в 8 научных работах, в том числе в 4 статьях из Перечня ведущих рецензируе-

мых научных журналов и изданий, в 3 тезисах докладов и в свидетельстве о государственной регистрации программ для ЭВМ, общим объемом в 5,8 п.л.

Личный вклад соискателя. Все исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию включен лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю; заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Диссертационная работа изложена на 120 страницах, содержит 58 иллюстраций и 9 таблиц. Библиография включает 104 наименования.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, их достоверность, основные положения, выносимые на защиту, а также приведены данные о структуре и объеме диссертационной работы.

В первой главе приведен литературный обзор исследований, посвященных математическому моделированию процессов высокоскоростного деформирования менисковых облицовок КЗ и гиперзвукового движения ВЭ с учетом малых возмущений, а также обоснована цель и задачи диссертации.

Вторая глава посвящена математическому моделированию процесса формирования ВЭ с учетом слабых технологических возмущений и определению кинематических и геометрических параметров формируемых ВЭ.

В связи с высокой скоростью деформаций математическое моделирование процесса формирования ВЭ принято проводить при помощи эйлеровых решателей. Использование такого подхода к задачам с неравномерностями геометрии малой амплитуды требует значительных вычислительных затрат. Для решения этой проблемы была разработана математическая модель процесса формирования ВЭ с позиции подхода Лагранжа. Описание движения продуктов детонации взрывчатого вещества (ВВ), облицовки и корпуса КЗ проводится с использованием законов механики сплошной среды. Параметры материала корпуса заданы при помощи упругопластической модели. Поведение ВВ определяется уравнением состояния Джонса-Уилкинса-Ли, а свойства материала облицовки представлены гидродинамической упругопластической моделью и уравнением состояния Ми-Грюнайзена. Математическая модель учитывает также разрушение материала облицовки по критериям предельной деформации и критического давления. Контакт между ВВ, облицовкой и корпусом задается условиями прилипания, поскольку жесткость продуктов детонации мала по сравнению с материалом облицовки и корпуса, а взаимодействие между продуктами детонации и другими деталями происходит по нормали к поверхности. Начальным условием является точечное

идеальное инициирование заряда ВВ. Решение задачи проводится методом конечных элементов при помощи ПК LS-Dyna.

Анализ экспериментальных совмещенных круглограмм наружной и внутренней поверхности облицовок показал, что для адекватного описания геометрии поперечного сечения уместно использование двух рядов тригонометрических гармоник:

$$R_{o/i} \approx R_0 \left[1 + \frac{\delta_0}{R_0} \sum_{m=1}^M \bar{b}_m \cos(m\varphi + \chi_m) \right] \pm \frac{\delta_0}{2} \left[1 + \sum_{n=1}^N \bar{a}_n \cos(n\varphi + \psi_n) \right], \quad (1)$$

где $R_{o/i}$ – радиус внешней и внутренней поверхности облицовки в поперечном сечении; δ_0 – номинальное значение толщины в поперечном сечении; R_0 – номинальное значение радиуса срединной поверхности облицовки в поперечном сечении; N, M – число гармоник погрешностей средней поверхности и неравномерности толщины соответственно; $\bar{a}_n, \bar{b}_m$ – амплитуды гармоник неравномерности радиуса и толщины по отношению к δ_0 ; φ – угловая координата в плоскости поперечного сечения КЗ, изменяющаяся в диапазоне $0 \leq \varphi \leq 2\pi$; χ_m, ψ_n – начальные фазы гармоник средней поверхности и неравномерности толщины соответственно.

Наиболее важными с феноменологической точки зрения видами погрешностей облицовки являются: несоосность ее наружной и внутренней поверхности ($M = 1$), связанная с процессом штамповки заготовки; неравномерность толщины облицовки, приобретаемая за счет остаточных деформаций в результате ее закрепления при механической обработке (например, $N = 6, \bar{a}_6 \neq 0$, при закреплении в 6-ти лепестковой цанговой оправке).

Геометрия деталей КЗ с учетом гармоник (1) может быть получена путем преобразования тел цилиндрической формы (Рис. 1). В частности, путем преобразования уравнения (1) получена модель преобразования диска в менисковую облицовку с учетом суперпозиции несоосности и неравномерности толщины:

$$X = x + \bar{b} z; Y = y; Z = z - \left(h + f \frac{R}{R_L} \delta_0 \sum_{n=1}^N \bar{a}_n \cos(n\varphi + \psi_n) \right); \quad (2)$$

$$h = \sqrt{R_1^2 - R^2} - \sqrt{R_1^2 - R_L^2}; R = \sqrt{x^2 + y^2}; \varphi = \arctg\left(\frac{y}{x}\right),$$

где x, y, z – координаты точки цилиндрического тела; X, Y, Z – координаты точки облицовки; R_1 – радиус кривизны облицовки; R_L – радиус заряда; f – геометрический параметр профиля неравномерности толщины ($0 \leq f \leq 1$); $\bar{b}$ – параметр несоосности.

Для проведения вычислительных экспериментов по определению зависимости геометрических и кинематических параметров ВЭ от погрешностей КЗ разработан алгоритм, состоящий из следующих шагов.

1. Подготовка расчетной сетки КЗ путем преобразования идеальной цилиндрической сетки.
2. Сохранение полученной сетки и подготовка расчетного файла LS-Dyna на базе шаблонов.
3. Запуск расчета LS-Dyna.
4. Выборка векторов координат и скоростей узлов конечно-элементной сетки облицовки из файлов результатов расчета LS-Dyna.
5. Построение топологии сетки в виде графа, и определение конечных элементов, образующих ВЭ.
6. Расчет кинематических и геометрических параметров ВЭ.

Выполнение всех шагов алгоритма полностью автоматизировано. Отдельные шаги реализованы в виде прикладных программ на языке Python, обмен данными между ними осуществляется при помощи текстовых или бинарных файлов.

Входными данными для генерирования расчетной сетки являются геометрия облицовки и базовая конечно-элементная сетка, состоящая из нескольких цилиндрических тел. Алгоритм осуществляет перемещение узлов сетки (Рис. 1), привнося геометрические особенности кумулятивного заряда. Модель (2) используется для генерирования сеток облицовок (Рис. 2). Подобный подход к заданию геометрии погрешностей КЗ с менисковой облицовкой применяется впервые.

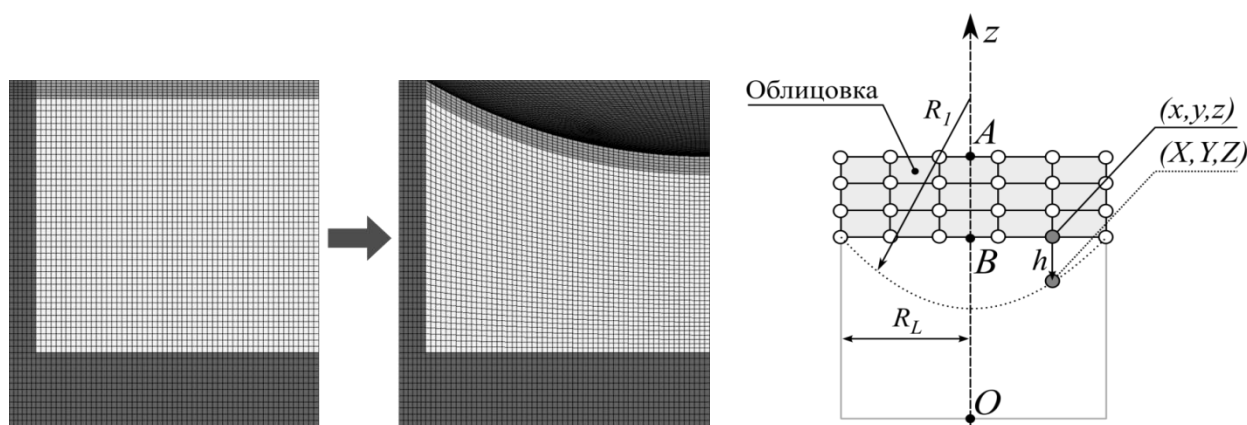


Рис. 1. Схема подготовки расчетной сетки

Определение кинематических и геометрических параметров ВЭ проводится на основе бинарных файлов результатов расчетов LS-Dyna, содержащих информацию о скоростях и координатах узлов, а также топологии конечно-элементной сетки облицовки. Чтение файлов проводится при помощи командного интерфейса процессора LS-PrePost, после чего информация о

скоростях и координатах сохраняется в матричном виде для удобства вычислений.

В процессе высокоскоростного деформирования менисковой облицовки только часть материала непосредственно участвует в формировании ВЭ. Кроме того, облицовка может разрушиться вплоть до конечных этапов формирования ВЭ. С практической точки зрения наибольшую ценность представляет информация о кинематических и геометрических параметрах цельного фрагмента облицовки с наибольшей кинетической энергией. Один из возможных способов определения конечных элементов облицовки, участвующих в образовании ВЭ, основан на выборке конечных элементов, находящихся в заданном участке траектории после окончания процесса формирования. Однако такой способ не является универсальным, так как зависит от скорости ВЭ и продолжительности процесса его формирования, а также не учитывает целостность фрагментов. В связи с этим предложен альтернативный алгоритм, использующий информацию о топологии сетки.

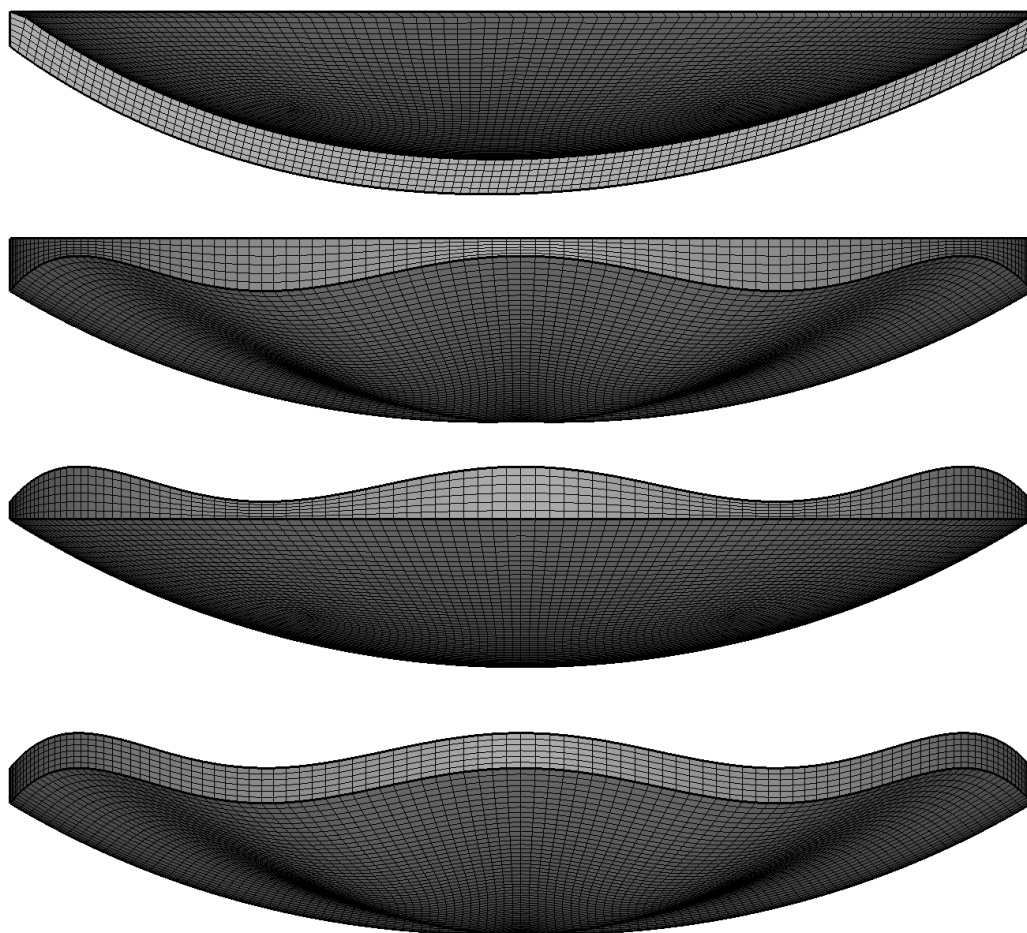


Рис. 2. Примеры сгенерированных облицовок с погрешностями различной конфигурации (погрешности увеличены для визуализации; сверху вниз: несоосность облицовки; три формы неравномерности толщины)

Топология сетки в промежуточных или конечных этапах формирования представлена в виде графа. Тогда множество конечных элементов A , об-

разующих ВЭ, определяется при помощи алгоритма поиска пути в графе, начиная с элемента, подверженного наименьшей деформации. Для каждого из элементов множества A вычисляется масса и средняя скорость. В таком случае определение положения и скорости центра масс ВЭ тривиально. Проекция узлов элементов из множества A на ортогональные плоскости позволяет определить контур ВЭ. Угол поворота ВЭ рассчитывается как угол между вектором, соединяющим центр масс ВЭ с головной частью, и вектором скорости набегающего потока при полете. Угловая скорость определяется путем дифференцирования угла поворота ВЭ по времени.

Третья глава посвящена математическому моделированию процесса силового взаимодействия газовой среды с телами, движущимися с гиперзвуковой скоростью в широком диапазоне изменения угла атаки. На основе обобщения экспериментальных и расчетных данных предложена геометрическая модель ВЭ со складчатой кормовой частью (Рис. 3).

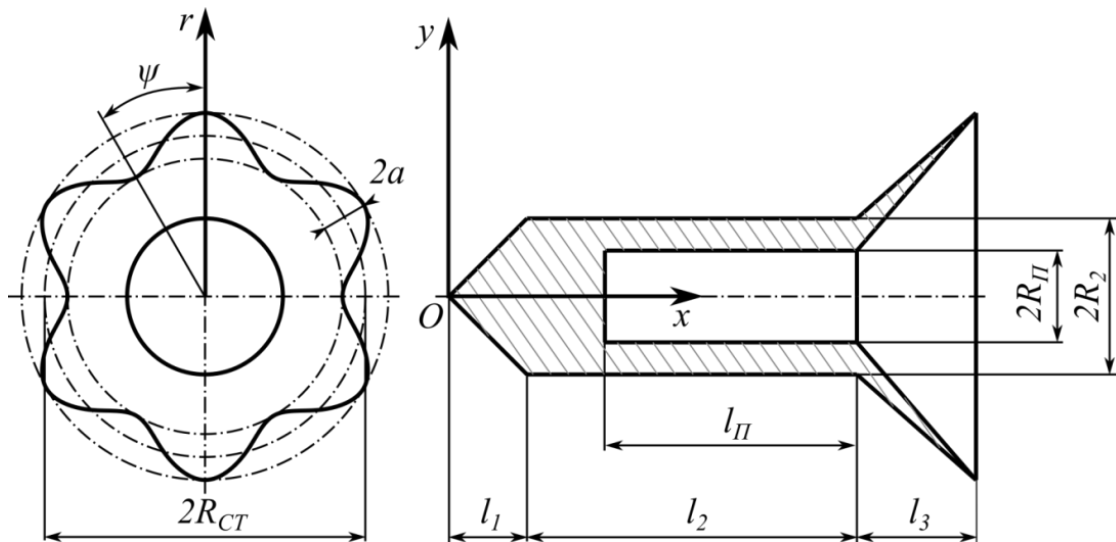


Рис. 3. Геометрическая модель ВЭ с шестью складками ($k = 6$)

Силовое взаимодействие ВЭ в полете рассматривается с позиции метода Ньютона, широко применяемого при расчете коэффициентов тел осесимметричной формы, движущихся с гиперзвуковыми скоростями. Аэродинамические коэффициенты определяются путем интегрирования следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} dc_x = \frac{K}{S_M} \cos^2 \eta \frac{\cos \alpha_x}{\cos \xi} r dx dy; \\ dc_y = \frac{K}{S_M} \cos^2 \eta \frac{\cos \beta_y}{\cos \xi} r dx dy; \\ dm_z = -\frac{K}{S_M L} \frac{\cos^2 \eta}{\cos \xi} (x \cos \beta_y - y \cos \alpha_x) r dx dy, \end{cases} \quad (3)$$

где dc_x – дифференциал коэффициента осевой силы; dc_y – дифференциал коэффициента нормальной силы; dm_z – дифференциал коэффициента момента тангажа; γ – меридиональный угол; x – осевая координата; α_x, β_y – углы, образованные вектором внутренней нормали поверхности в точке (x, γ) в системе координат xOy ; S_m – миделево сечение ВЭ; ξ – угол между вектором внутренней нормали поверхности в точке (x, γ) и вектором внутренней нормали цилиндра с радиусом r и осью, совпадающей с координатной осью Ox ; L – характерный линейный размер тела; η – угол наклона поверхности элемента к направлению потока; K – коэффициент, зависящий от условий задачи.

Данная модель является базовой при проведении дальнейших исследований. Интегрирование системы (3) необходимо проводить в области аэродинамической видимости. При наличии нескольких поверхностей, загораживающих друг друга, вычисление интегралов возможно только численными методами. В некоторых частных случаях, например, для сферических поверхностей, определение границы области видимости тривиально, и интегралы могут быть вычислены аналитически.

Разработан упрощенный аналог базовой модели, основанный на разбиении набегающего потока на две независимые взаимно ортогональные составляющие и оценке аэродинамических сил для каждой из составляющих по отдельности. Предложенный подход позволил получить аналитические зависимости коэффициентов c_x , c_y и m_z от угла атаки $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ для цилиндрической модели ВЭ без складок в кормовой части ($a = 0$):

$$c_x(\alpha) = 2(k_1 \sin^2 \beta_1 + k_2 \sin^2 \beta_2) \cos^2 \alpha + \frac{1}{2}(k_1 \cos^2 \beta_1 + k_2 \cos^2 \beta_2) \sin^2 \alpha; \quad (4)$$

$$c_y(\alpha) = \frac{4}{3\pi} \left(k_1 \frac{\cos^2 \beta_1}{\operatorname{tg} \beta_1} + k_2 \frac{\cos^2 \beta_2}{\operatorname{tg} \beta_2} + 2 \frac{\bar{R}_2 \bar{l}_2}{\bar{R}_{CT}} \right) \sin^2 \alpha; \quad (5)$$

$$m_z(\alpha) = \frac{4}{3\pi} \left(\frac{2}{3} k_1 \bar{R}_2 + \bar{R}_2 \frac{\bar{l}_2^2}{\bar{R}_{CT}^2} \left(1 + \frac{\bar{l}_1^2}{\bar{l}_2^2} \right) + 2 \frac{\cos^3 \beta_2}{\sin \beta_2} \left(\frac{\bar{R}_{CT}}{1,5 \sin 2\beta_2} \left(1 - \frac{\bar{R}_2^3}{\bar{R}_{CT}^3} \right) + \frac{k_2}{2} \left(\bar{l}_1 + \bar{l}_2 - \frac{\bar{R}_2}{\operatorname{tg} \beta_2} \right) \right) \right) \sin^2 \alpha, \quad (6)$$

где $k_1 = (\bar{R}_2 / \bar{R}_{CT})^2$; $k_2 = 1 - k_1$; $\bar{l}_1 = \frac{l_1}{l}$; $\bar{l}_2 = \frac{l_2}{l}$; $\bar{R}_2 = \frac{R_2}{l}$; $\bar{R}_{CT} = \frac{R_{CT}}{l}$; $l = l_1 + l_2 + l_3$; $l_1, l_2, l_3, R_{CT}, R_2$ – параметры геометрической модели; β_1, β_2 – углы наклона образующих соответственно головного и кормового конусов модели.

Сравнение результатов расчета по полученным зависимостям (4) – (6) с результатами гидродинамического решателя Flow Simulation показывает их приемлемое согласование (Рис. 4). В частности показано хорошее согласо-

ние результатов координаты центра давления. Параметры решателя были настроены при помощи модельной задачи продувки конуса гиперзвуковым потоком так, чтобы погрешность расчета по сравнению с экспериментальными данными не превышала 3%.

Для определения аэродинамических коэффициентов ВЭ со складчатой кормовой части разработан численный алгоритм с автоматическим разрешением области аэродинамической видимости. Предложенный алгоритм состоит из следующих шагов.

1. Составление геометрии поверхности из параметризованных примитивов: конус, цилиндр, складчатая поверхность.

2. Дискретизация поверхностей примитивов в области геометрической видимости, если таковая известна априори (по знаку скалярного произведения вектора элементарной нормали и вектора потока). В противном случае проводится дискретизация всей поверхности целиком, и факт прямой видимости определяется для каждого элемента дискретизации.

3. Определение факта принадлежности к зоне видимости для каждого элемента дискретизации поверхностей, удаленных от начала отсчета (взаимное «загораживание» поверхностей), осуществляется при помощи алгоритма бросания лучей (ray casting). Для повышения эффективности алгоритма вычисление точки пересечения луча с поверхностью проводится аналитически, однако для некоторых поверхностей, где аналитическое решение затруднительно, используется метод Ньютона-Рафсона.

4. Вычисление интегралов (3) в элементах, находящихся в зоне видимости, с применением метода Гаусса.

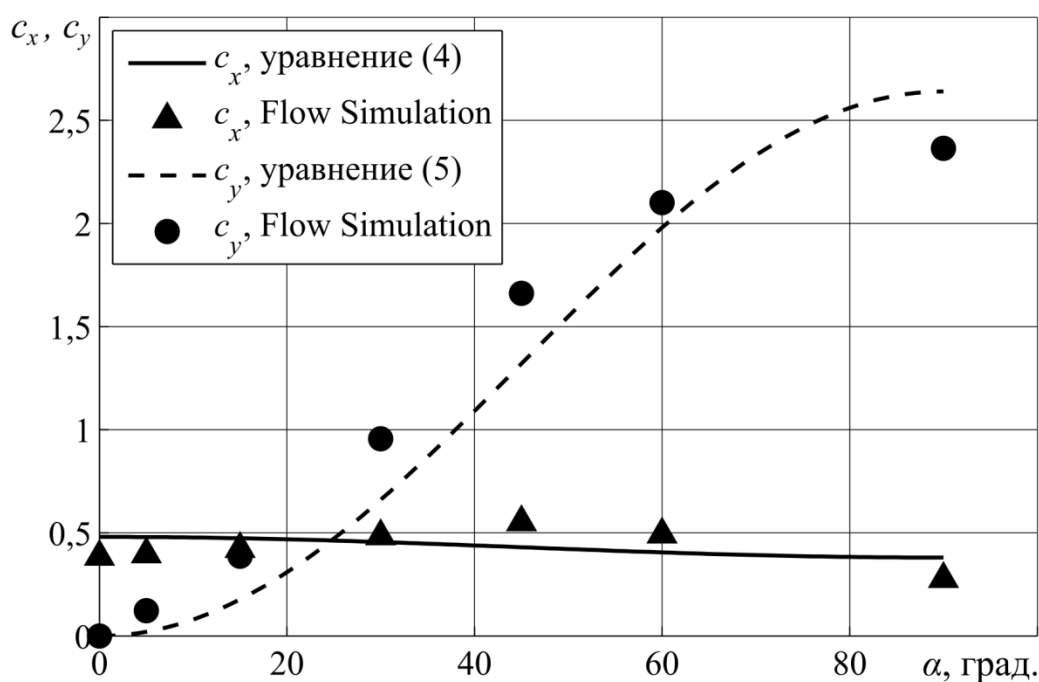


Рис. 4. Характер изменения коэффициентов осевой c_x и нормальной сил c_y от угла атаки α

Предложенный численный алгоритм применен в программном комплексе АэроЕФП, созданном в среде MATLAB и организованном в виде библиотеки классов, реализующих алгоритм вычисления интегралов для геометрических примитивов, а также управляющего модуля, отвечающего за определение области видимости и агрегацию результатов вычислений.

Тестирование алгоритма и программы было проведено путем сравнения результатов с аналитическими выражениями коэффициентов для конуса в замкнутой форме. Далее алгоритм был применен к параметризированной модели ВЭ со складками, представленной в виде нескольких примитивов (Рис. 5).

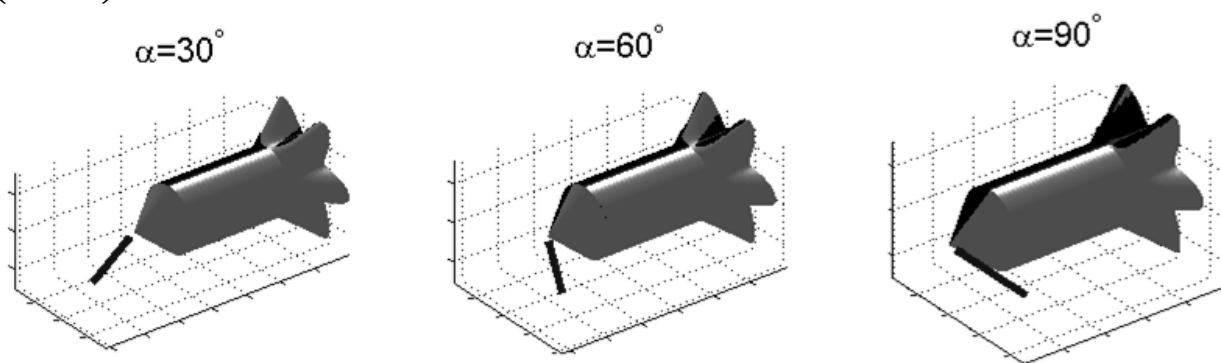


Рис. 5. Конфигурация аэродинамической тени для модели ВЭ со складчатой кормовой частью в зависимости от угла атаки α

Площадь зоны аэродинамической тени изменяется сложным образом (Рис. 6). Наличие точки излома при значении $\alpha \approx 40^\circ$ связано с изменением характера видимости конической поверхности в головной части ВЭ. Если $\alpha \leq \beta_1$, то вся поверхность конуса является видимой, в противном случае видимым является только ее участок, причем его площадь зависит от α .

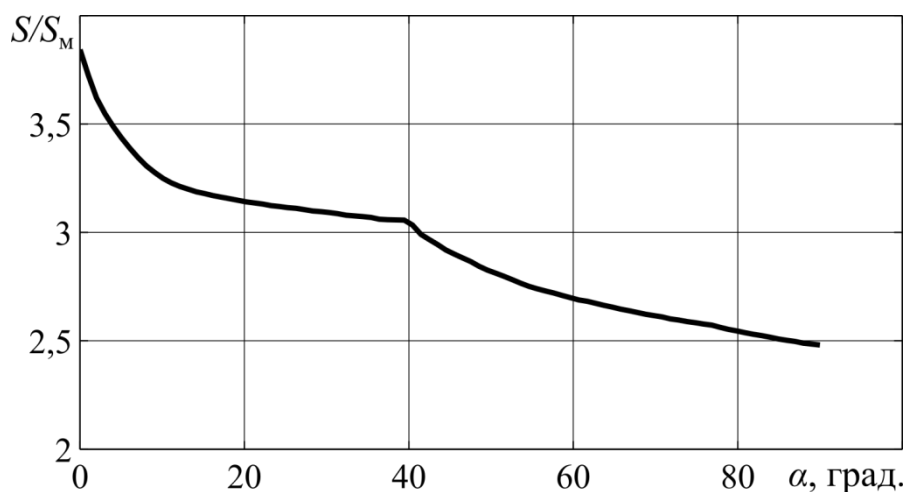


Рис. 6. Изменение площади S области аэродинамической видимости в зависимости от α для модели ВЭ с $k = 6$

Результаты расчетов аэродинамических коэффициентов ВЭ с $k = 6$ и амплитудой складки, равной 30% радиуса большего основания конической части $R_{СТ}$, полученные при помощи АэроЕФП, хорошо согласуются с аналогичными результатами, полученными при помощи гидродинамического решателя Flow Simulation (Рис. 7). Причем время расчета Flow Simulation на три порядка превышало время расчета АэроЕФП.

Разработанный программный комплекс позволяет проводить оценку влияния геометрии элемента на аэродинамические коэффициенты, которые могут быть использованы для определения траектории движения ВЭ к преграде или для выбора его рациональной конфигурации.

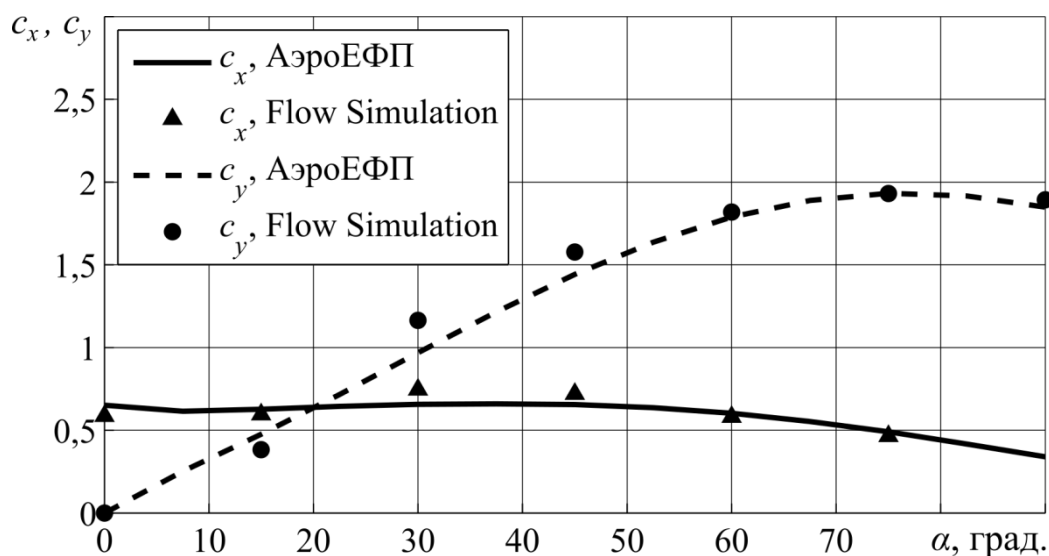


Рис. 7. Сравнение результатов расчетов аэродинамических коэффициентов модели ВЭ со складками при помощи АэроЕФП и Flow Simulation

В **четвертой главе** приведены результаты исследования влияния погрешностей облицовки на процесс формирования и аэродинамического обтекания ВЭ при помощи математических моделей, алгоритмов и программ, разработанных в диссертационной работе.

Проведен численный анализ влияния несоосности внутренней и внешней поверхностей облицовки и неравномерности толщины облицовки КЗ на кинематические и геометрические параметры ВЭ.

Методом вычислительного эксперимента получены зависимости между амплитудой неравномерности толщины облицовки и амплитудой сформированной складки для трех конфигураций профиля неравномерности толщины облицовки (Рис. 2). Исследованы особенности нескольких механизмов образования складок: неравномерности метаемой массы и неравномерности прихода ударной волны.

Проведена оценка влияния суперпозиции несоосности и неравномерности толщины, провоцирующей образование складок, на кинематические параметры. Показано, что радиальная скорость, угол поворота и угловая ско-

рость ВЭ линейно возрастают с увеличением амплитуды погрешности, при этом осевая скорость остается неизменной. Показано (Рис. 8), что влияние несоосности на кинематические параметры ВЭ усиливается при наличии неравномерности толщины облицовки. С точки зрения практического применения это означает, что при создании огранки облицовки с целью образования складок требуется более точный контроль несоосности поверхностей облицовки. Полученные профили проекций указывают на наличие существенного угла поворота ВЭ в результате наличия несоосности порядка 2% толщины облицовки. Установлено, что фазовый угол гармоники несоосности оказывает влияние на геометрию формируемого элемента.

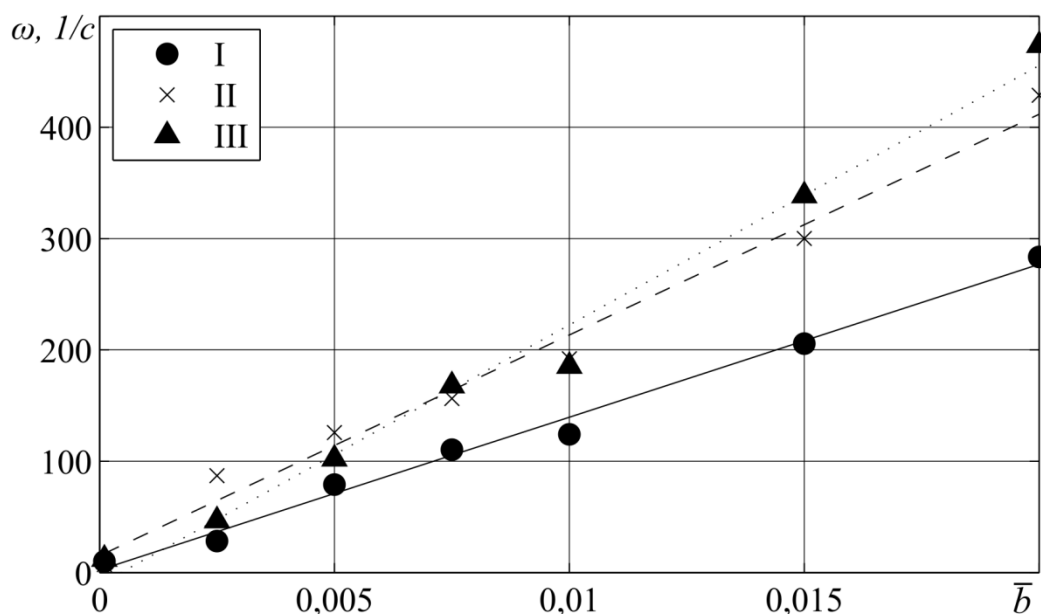


Рис. 8. Влияние суперпозиции гармоник погрешностей на угловую скорость ω : I – несоосность; II – несоосность и неравномерность толщины ($\psi_6 = \pi/3, \bar{a}_6 = 0,03$); III – несоосность и неравномерность толщины ($\psi_6 = 0, \bar{a}_6 = 0,03$); ▲×● – расчет; —,---, ... – регрессии

При расширении диапазона варьирования амплитуды погрешностей выявлено наличие предельной величины погрешности, превышение которой приводит к нарушению режима формирования ВЭ. Вследствие критического состояния материала в процессе формирования, наиболее вероятным результатом наличия погрешностей значительной амплитуды является искажение формы (Рис. 9) и разрушение ВЭ. Например, при $\bar{b} = 0,05$ и $\bar{a}_6 = 0,03$ на промежуточных этапах процесса формирования ВЭ наблюдается его изгиб, приводящий к разрушению. Увеличение величины несоосности или неравномерности толщины облицовки по отдельности также приводят к разрушению ВЭ во время формирования.



Рис. 9. Изгиб оси ВЭ при суперпозиции гармоник

С помощью программного комплекса АэроЕФП проведен анализ аэродинамических коэффициентов ВЭ со складчатой кормовой частью при варьировании амплитуды складок. Для удобства вычислений вводится параметр амплитуды складки Λ , равный отношению между величиной амплитуды складки и радиуса большего основания конической поверхности R_{CT} (Рис. 3). Начальная фаза 6-ой гармоники принималась равной нулю.

На основе геометрической модели ВЭ с шестью складками показано (Рис. 10), что при возрастании параметра амплитуды складок Λ координата центра давления CP , отсчитываемая от вершины ВЭ, увеличивается (особенно при $20^\circ < \alpha \leq 60^\circ$), улучшая баллистическую устойчивость элемента в полете, но при этом увеличивается осевое сопротивление, испытываемое ВЭ.

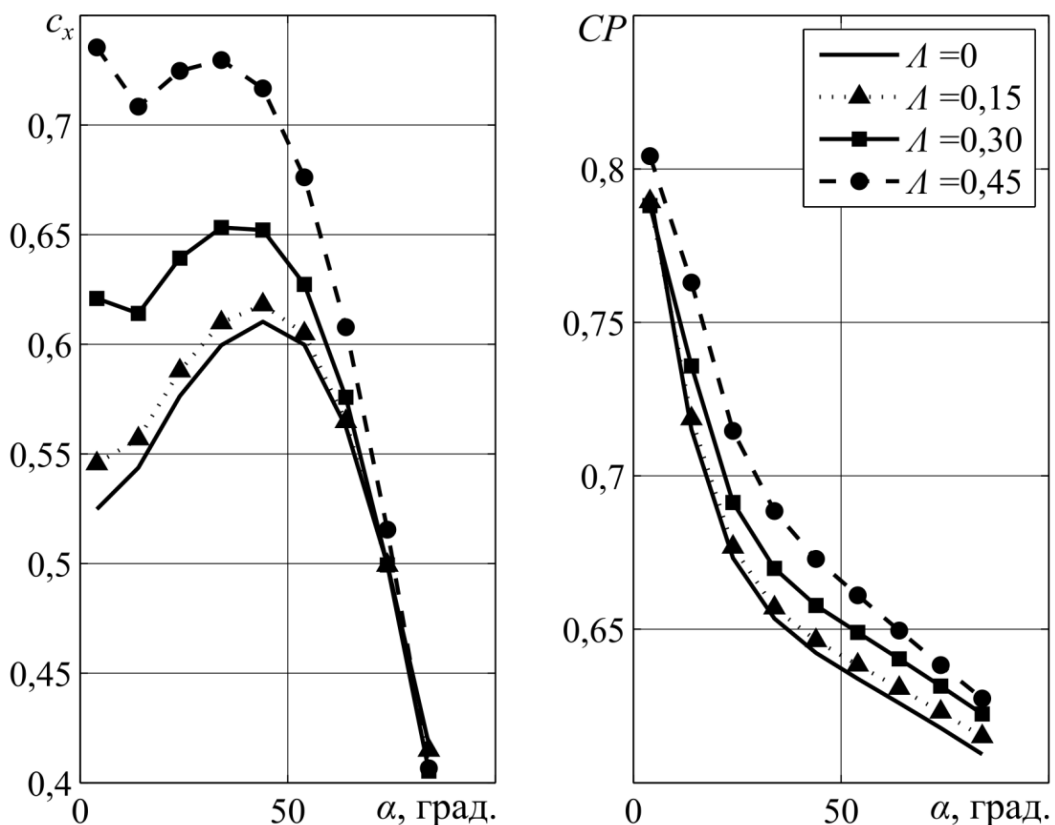


Рис. 10. Влияние параметра амплитуды складок Λ на аэродинамические коэффициенты ($k = 6$)

Основные результаты диссертационной работы

1. Разработанный комплекс математических моделей, алгоритмов и программ создает основу для математического моделирования влияния малых возмущений технологической природы на процессы формирования и полета высокоскоростного элемента, полученного при ударно-волновом взаимодействии менисковой облицовки с продуктами детонации:

- предложена математическая модель, адекватно описывающая геометрию погрешностей менисковой облицовки. На основе модели разработан алгоритм, осуществляющий введение погрешностей в расчетную схему путем перемещения узлов конечно-элементной сетки в соответствии с заданными параметрами;
- разработан комплекс алгоритмов для определения кинематических и геометрических параметров формируемых тел. При этом совокупность конечных элементов, образующих тело и определяющих его параметры, определяется при помощи алгоритма, основанного на поиске пути в графе топологии сетки;
- разработана математическая модель определения коэффициентов силового взаимодействия низкоплотной газовой среды с осесимметричным телом, движущимся с гиперзвуковой скоростью, основанная на разбиении набегающего потока на две взаимно ортогональные составляющие;
- разработан алгоритм определения коэффициентов силового взаимодействия с автоматическим определением области аэродинамической видимости. Алгоритм реализован в программном комплексе АэроЕФП, предназначенном для определения коэффициентов параметризированной модели ВЭ со складчатой кормовой частью.

2. Применение комплекса математических моделей, алгоритмов и программ позволило:

- проанализировать влияние технологических возмущений на кинематические и геометрические параметры элемента, формируемого при высокоскоростном взаимодействии менисковой облицовки с продуктами детонации;
- оценить чувствительность к влиянию амплитуд и сдвигу фаз гармоник технологических возмущений облицовки на процесс формирования элемента под действием продуктов детонации;
- записать аналитические зависимости коэффициентов аэродинамических сил и положения центра давления цилиндроконического ВЭ в широком диапазоне угла атаки;
- повысить производительность расчетов примерно в 3 раза на стадии формирования и на 3 порядка на стадии полета высокоскоростного элемента со складчатой кормовой частью по сравнению с гидродинамическими решателями.

Основные результаты диссертации отражены в работах:

1. Математическое обеспечение вероятностной оценки влияния технологических погрешностей на эффективность удлиненных поражающих элементов снарядоформирующих зарядов / Н.А. Асмоловский [и др.] // Оборонная техника. 2009. №1–2. С. 49–53. (0,31 п.л./0,1 п.л.).

2. Асмоловский Н.А., Баскаков В.Д. Численное моделирование процесса взрывного формирования удлиненных поражающих элементов со складчатой кормовой частью // Ударные волны в конденсированных средах: труды IX Международной конференции. СПб., 2010. С. 188–190. (0,15 п.л./0,12 п.л.).

3. Влияние малых периодических возмущений конструктивных параметров снарядоформирующих зарядов на эффективность действия удлиненных поражающих элементов / Н.А. Асмоловский [и др.] // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: труды Международной конференции XIII Харитоновские тематические научные чтения. Саров, 2011. С. 522–525. (0,23 п.л./0,05 п.л.).

4. Асмоловский Н.А., Баскаков В.Д., Тарасов В.А. Анализ влияния периодических возмущений на формирование высокоскоростных стержневых элементов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 8. С. 8–14. (1 п.л./0,9 п.л.).

5. Асмоловский Н.А., Баскаков В.Д., Тарасов В.А. Численно-аналитическая оценка аэродинамических коэффициентов удлиненных тел сложной формы методом Ньютона // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2014. № 4. С. 109–122. (1,25 п.л./1,1 п.л.).

6. Асмоловский Н.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В. Численная оценка влияния погрешностей изготовления взрывного устройства на кинематические параметры высокоскоростного стержневого элемента // Необратимые процессы в природе и технике: труды VIII Всероссийской конференции. М., 2015. Т.2. С. 236. (0,06 п.л./0,04 п.л.).

7. Асмоловский Н.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В. Анализ влияния технологических погрешностей менисковых облицовок на динамику взрывного формирования высокоскоростных стержневых элементов // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2015. № 5. С. 71–84. (1,3 п.л./1,0 п.л.).

8. Математическое моделирование процесса ударного нагружения менисковой облицовки / Н.А. Асмоловский [и др.] // Математическое моделирование и численные методы. 2016. №9. С. 52–67. (1,5 п.л./1,3 п.л.).

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016617398. Программа расчёта аэродинамических коэффициентов АэроЕФП / Н.А. Асмоловский, В.Д. Баскаков. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 04.07.2016.