

На правах рукописи

Овдиенко Максим Александрович

**ГЛИССИРОВАНИЕ МОРСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МЕХАНИЗАЦИЕЙ**

Специальность **01.02.05** –
Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019 г.

Работа прошла апробацию на кафедре теоретической и прикладной аэрогидромеханики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Варюхин Антон Николаевич**,
кандидат технических наук

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина»
(ФГУП «СибНИА им. С. А. Чаплыгина»)

Защита состоится 20 декабря 2019 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета ФАКТ.01.02.05.001 по адресу: 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского Физико-Технического Института (национального исследовательского университета) <https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-tekhnicheskie-nauki.php>

Работа представлена 8 октября 2019 г. в Аттестационную комиссию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п.3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в мировом авиапарке гидроавиация занимает относительно малое место. Тем не менее, актуальность развития данной отрасли чрезвычайно важна для нашей страны в силу следующих объективных причин. Во-первых, в России существует огромное количество малонаселенных регионов не обладающих аэродромной инфраструктурой. Их оперативное транспортное сообщение осуществляется вертолётами, что крайне дорого. Но в связи с обилием водоёмов, гидроавиация могла бы решить эту проблему. Во-вторых, существует ряд важных задач, решение которых под силу только гидроавиации. Ярким примером тому служит, уникальный самолет-амфибия Бе-200, который на протяжении многих лет эффективно справляется с задачей пожаротушения. В-третьих, морские летательные аппараты обеспечивают преимущество России в области национальной безопасности, т.к. наша страна имеет обширные морские границы. В связи, с текущей геополитической ситуацией в мире, интерес со стороны Министерства обороны РФ к таким аппаратам значительно возрос. За рубежом также активно занимаются этим направлением, так Китай разрабатывает собственный тяжелый самолет-амфибию AG-600, который сейчас находится на стадии лётных испытаний.

Диссертационная работа посвящена исследованиям возможности и эффективности повышения мореходных и гидродинамических характеристик летательных аппаратов водного базирования за счет применения автоматически управляемой гидродинамической механизации, которая может быть установлена без существенных архитектурных изменений значительно повысить гидродинамические и мореходные характеристики. Т.е. исследованию возможности снижения гидродинамического сопротивления на режиме взлёта, повышения устойчивости, а самое главное – позволит осуществлять взлёт и посадку в условиях более высокого уровня волнения. Уровень мореходности является одним из ключевых параметров, характеризующих совершенство летательного аппарата водного базирования.

Существующие и опробованные ранее методы повышения мореходных и гидродинамических характеристик летательных аппаратов водного базирования или исчерпали себя, или не могут быть применены по конструктивным и эксплуатационным соображениям (например, подводные крылья). В тоже время в ФГУП «ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского» М.Ю. Банниковым и В.А. Лукашевским в 70-е годы 20-го века были разработаны устройства активной гидродинамической механизации скоростных глиссирующих судов на основе гидродинамических интерцепторов, которые доказали свою эффективность, но на летательных аппаратах ещё не применялись. Их использование на быстроходных судах позволило достичь гидродинамического качества 11 единиц. При этом в 1,5-2 раза были снижены амплитуды колебаний по углу дифферента и вертикальные перегрузки, в 6 раз снижены колебаний по углу крена. Комплексы автоматически управляемых интерцепторов были внедрены и используются по сей день, на таких проектах быстроходных судов, как «Мираж», «Мангуст», «Соболь» (ЦМКБ

«Алмаз»), «А-145» (ООО «Агат-Дизайн Бюро») и других. Эти устройства имеют малый вес и габариты, потребляют мало энергии. Поэтому весьма высоко оценивается вероятность повышения мореходных и гидродинамических характеристик летательных аппаратов водного базирования за счет установки на них подобной гидродинамической механизации (см. рисунок 1).

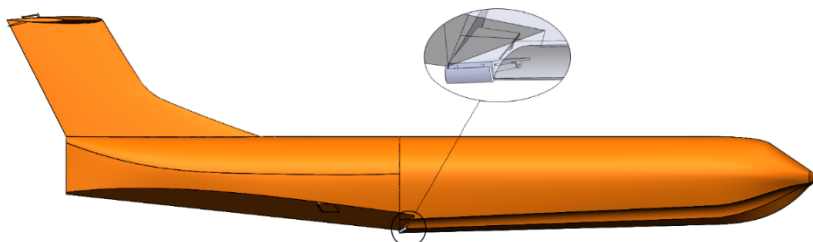


Рисунок 1 – Схема установки гидродинамических интерцепторов на поперечном редане фюзеляжа самолета-амфибии

Целью настоящей работы является обоснование возможности повышения мореходных и гидродинамических характеристик летательных аппаратов водного базирования с помощью автоматически управляемой гидродинамической механизации.

Задачи, которые решались для достижения указанной цели:

- разработка программы и методики испытаний динамически-подобной модели самолета-амфибии, оснащенной автоматически-управляемыми гидродинамическими интерцепторами;
- испытаний динамически-подобной модели самолета-амфибии, оснащенной гидродинамическими интерцепторами в опытовом бассейне;
- разработка и верификация методики численного моделирования глиссирования и быстрого входа тел в воду;
- численное моделирование глиссирования со скольжением с несимметрично выдвинутыми интерцепторами;
- разработка и верификация математической модели динамики глиссирования самолета-амфибии, оснащенного автоматически управляемыми гидродинамическими интерцепторами и аэродинамическим демпфером тангажа в продольной плоскости в условиях нерегулярного волнения;
- расчетное моделирование глиссирования самолета-амфибии, оснащенного автоматически управляемыми гидродинамическими интерцепторами и аэродинамической механизацией в условиях спокойной воды и регулярного волнения.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Впервые была разработана программа и методика гидродинамических испытаний модели самолета-амфибии, оснащенной автоматически управляемыми гидродинамическими интерцепторами.

2. Впервые были проведены экспериментальные исследования глиссирования модели самолета-амфибии, оснащенного гидродинамическими интерцепторами.

3. Впервые была разработана математическая модель динамики глиссирования летательного аппарата водного базирования, оснащенного автоматически управляемой гидродинамической механизацией.

4. Впервые были проведены исследования глиссирования летательного аппарата водного базирования, оснащенного автоматически управляемыми гидродинамическими интерцепторами в условиях волнения и спокойной воды

Теоретическая и практическая значимость результатов работы.

Теоретическая и практическая значимость состоит в том, что в работе была разработана и верифицирована на достоверных экспериментальных данных методика численного моделирования гидродинамического обтекания корпуса морского летательного аппарата на режиме глиссирования, основанных на решении системы уравнений Рейнольдса. Эта методика может быть использована при разработке перспективных летательных аппаратах водного базирования для предварительных расчетов гидродинамических характеристик, определения влияния интерцепторов, формы и положения редана и т.д.

Кроме этого была разработана математическая модель динамики глиссирования летательного аппарата водного базирования, оснащенного автоматически управляемыми гидродинамическими интерцепторами и аэродинамическим демпфером тангажа в условиях спокойной воды и волнения, реализованная в виде программы для ЭВМ. Эта матмодель может быть использована при разработке и отработке гидродинамической компоновки перспективных летательных аппаратов водного базирования для расчета гидродинамических сил и моментов, перегрузок, характера колебаний летательного аппарата при движении по воде в условиях волнения и спокойной воды, как с работающими интерцепторами, так и без них. Также математическая модель глиссирования может быть использована в качестве математического обеспечения авиационных пилотажных комплексов.

Методология исследования основана на проведении гидродинамических модельных испытаний, численном моделировании гидродинамических течений со свободными границами, разработке математической модели, её верификации и проведении расчетного моделирования.

Основные результаты работы, выносимые на защиту.

- программа и методика испытаний динамически-подобной модели самолета-амфибии, оснащенной гидродинамическими интерцепторами;
- результаты испытаний модели самолета-амфибии в опытовом бассейне;
- Методики численного моделирования глиссирования и быстрого входа тел в воду;
- результаты верификации программного комплекса вычислительной гидродинамики для задач глиссирования и быстрого входа тел в воду;
- результаты численного моделирования глиссирования со скольжением с несимметрично выдвинутыми интерцепторами;

– математическая модель динамики глиссирования самолета-амфибии, оснащенного автоматически управляемыми гидродинамическими интерцепторами и аэродинамическим демпфером тангажа в продольной плоскости в условиях нерегулярного волнения, и результаты верификации;

– результаты расчетного моделирования глиссирования самолета-амфибии, оснащенного автоматически управляемой гидродинамической механизацией в условиях спокойной воды и регулярного волнения.

Достоверность результатов.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается сравнением результатов расчетного моделирования с известными надежными экспериментальными данными, полученными другими авторами. Кроме этого, результаты работы публиковались в ведущих российских и зарубежных изданиях, докладывались на различных профильных научных конференциях.

Апробация работы. Результаты работ по диссертации докладывались и обсуждались на:

– 12th International Conference on Fast Sea Transportation FAST- 2013, Amsterdam, 2-5 December – 2013;

– 10-я Международная выставка и научная конференция по гидроавиации «Гидроавиасалон-2014» (г. Геленджик, 2014 г.);

– 58-я конференция МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук» (Долгопрудный – Жуковский, 2015 г.);

– 13th International Conference on Fast Sea Transportation (FAST-2015), Washington, DC, Sept. – 2015;

– 59-я конференция МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук» (Долгопрудный – Жуковский, 2016 г.);

– 11-я Международная выставка и научная конференция по гидроавиации «Гидроавиасалон-2016» (г. Геленджик, 2016 г.);

– Научно-техническая конференция по аэродинамике ЦАГИ, пос. Володарского, 2016 г;

– 15th International Conference on Fast Sea Transportation (FAST-2017), Nantes-France, 2017;

– XII Междунар. летней научной школы-конференции, посв.155-летию со дня рождения академика А.Н. Крылова. – Чебоксары, 2018.

Личный вклад автора заключается:

[1,5,8,9] - разработка алгоритмов и программная реализация математической модели продольной динамики глиссирования летательного аппарата водного базирования, оснащенного автоматически управляемой гидродинамической и аэродинамической механизацией.

[2] - разработка методики численного моделирования и верификации различных программных комплексов вычислительной гидродинамики для задач глиссирования и быстрого входа тел в воду;

[3,4,6,7] - разработка программы и методики проведения испытаний модели самолета-амфибии, оснащенной гидродинамическими интерцепторами в опытовом бассейне.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы представлены в 16 опубликованных работах, в том числе 5 в рецензируемых журналах из списка, рекомендуемого ВАК, 1 в международном рецензируемом издании, индексируемого базами данных Scopus и Web of Science и 10 в прочих изданиях. Кроме этого, автором было получено 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и поданы 2 заявки на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных результатов, заключения и списка литературы, используемого автором, включающего 99 наименований. Диссертация изложена на 163 страницах машинописного текста, содержит 111 рисунков, 1 таблицу.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлен обзор работ по тематике диссертации, сформулированы цели и задачи диссертации, изложено содержание и основные результаты, сформулированы положения, выносимые на защиту, изложена новизна результатов, их практическое применение, перечислены аргументы, указывающие на достоверность результатов, полученных диссертантом в ходе проведенных расчетно-экспериментальных исследований по обоснованию возможности повышения мореходных и гидродинамических характеристик летательных аппаратов водного базирования с помощью автоматически управляемой гидродинамической механизации.

В главе 1 формулируются основные требования, предъявляемые к ЛА водного базирования, дается определение мореходности. Приводится классификация и анализ существующих технических решений, направленных на улучшение этого параметра.

В конце главы делается вывод о том, что существующие методы повышения мореходных характеристик летательных аппаратов водного базирования, в том числе специальные устройства (подводные крылья, амортизированные элементы и пр.) практически исчерпали себя, и наиболее перспективным направлением является применение активной гидродинамической механизации. Автором предлагается использовать активную гидродинамическую механизацию на основе автоматически управляемых гидродинамических интерцепторов, установленных на днище лодки летательного аппарата водного базирования. Так как ранее, они доказали свою высокую эффективность в повышении мореходности и снижения сопротивления быстроходных глиссирующих судов.

Глава 2 посвящена экспериментальным исследованиям модели ЛА водного базирования, оснащенного гидродинамическими интерцепторами.

В начале главы был сформирован облик экспериментальной модели, для этого были сформулированы основные требования к ней, к интерцепторам и к их системе управления. На основании этих требований была разработана 3D модель фюзеляжа самолета-амфибии, оснащенного гидродинамической механизацией в виде гидродинамических интерцепторов на поперечном редане и дефлекторах, а также аэродинамическим демпфером тангажа, в качестве которого выступает руль высоты. Была разработана программа и методика буксировочных испытаний модели в опытовом бассейне, включающая: определение аэродинамических характеристик в необращенном движении; испытания в условиях спокойной воды; определение зон устойчивого глиссирования; испытания в условиях регулярного

волнения. Программа предполагает испытания как с неподвижными, так и с автоматически управляемыми интерцепторами и аэродинамическим демпфером тангажа. Система управления модели позволяет настраивать различные алгоритмы системы автоматического управления.

В работе была выполнена только часть испытаний, а именно экспериментальные исследования процесса глиссирования модели самолета-амфибии, оснащенной неподвижными интерцепторами в условиях спокойной воды.

На редане модели были установлены неуправляемые гидродинамические интерцепторы (рисунок 2). Они имели ширину 50мм и могли выдвигаться и фиксироваться на высоту до 3мм. Также интерцепторы были установлены на дефлекторах в межреданной части.

Были выполнены следующие испытания: буксировка с убранными интерцепторами и различными продольными моментами; буксировка с интерцептором на редане различной высоты и различными продольными моментами; буксировка с интерцептором различной высоты на дефлекторах и различными продольными моментами.



Рисунок 2 – Изображение модели самолета-амфибии, оснащенной неподвижными интерцепторами на редане и дефлекторах

Диапазон скоростей буксировок 4-11м/с, что соответствует диапазону скоростей 0,25-0,8 от взлётной скорости. Геометрический масштаб 1:10. Моделируемая масса модели 39кг. Модель была сбалансирована по моменту относительно точки подвеса в районе редана. Ширина модели в районе редана – 215мм, длина модели 3200мм, размах крыла 3270мм. В процессе испытаний измерялись: угол дифферента, полная сила сопротивления, вертикальные перемещения точки подвеса, расстояние до воды, скорость буксировки. На рисунках 3-4 представлены результаты испытаний в виде зависимостей угла дифферента и силы сопротивления от скорости буксировки при различных продольных моментах относительно точки закрепления.

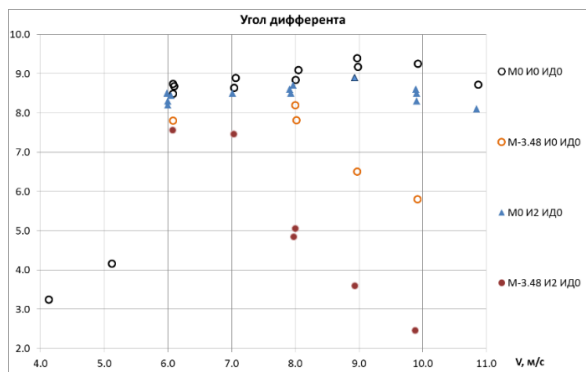


Рисунок 3 – Угол дифферента модели с интерцепторами на редане

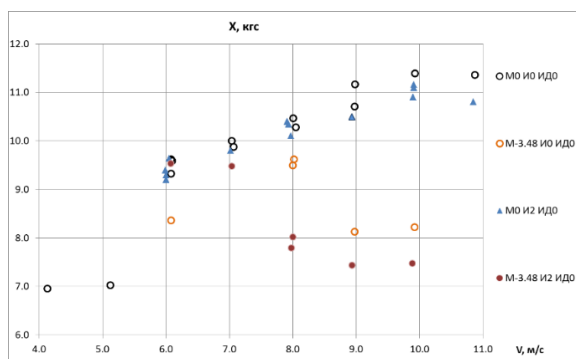


Рисунок 4 – Суммарное сопротивление модели с интерцепторами на редане

В результате испытаний было установлено, что при буксировках модели с интерцепторами на редане при исходной центровке их влияние довольно незначительно. При смещении центровки модели в носовую часть (эквивалентно приложению продольного момента $M=3,48 \text{ кгс} \cdot \text{м}$ относительно точки закрепления) и выдвигении интерцепторов угол дифферента снижается на 3° относительно случая с тем же моментом, но без интерцепторов. Уменьшение угла дифферента также сопровождается уменьшением гидродинамического сопротивления.

В целом качественно было подтверждено, что гидродинамические интерцепторы, установленные на редане ЛА водного базирования, позволяют управлять его углом дифферента и добиваться снижения сопротивления. При этом гидродинамические интерцепторы, установленные на дефлекторах в межреданной части, не показали какого-либо влияния на углы дифферента и сопротивление в исследуемом диапазоне скоростей.

Глава 3 посвящена разработке расчетных методов исследований глиссирования летательных аппаратов водного базирования. В работе были использованы два альтернативных подхода.

Первый подход основан на численном моделировании течений со свободными границами, в частности, решались задачи глиссирования и быстрого

входа тел в воду. Для этого автором была разработана методика моделирования и была проведена верификация различных вычислительных комплексов, таких как Ansys CFX, Ansys Fluent, Star CCM, отечественный продукт FlowVision, а также программа с открытым исходным кодом OpenFOAM с целью определения наиболее подходящего инструмента для решения задач гидродинамики течений со свободными границами. В качестве тестовых, рассматривались базовые задачи глиссирования и входа в воду, для которых имеются надёжные экспериментальные данные, а именно: стационарное глиссирование килеватого тела по невозмущенной поверхности воды на полной и неполной ширине, прохождение килеватым телом серии регулярных волн, вход призматического тела в воду и др. Варьировались типы и размеры расчетных сеток, размеры расчетных областей, граничные условия, модели турбулентности, шаги по времени и т.д. В результате, программные комплексы OpenFOAM и StarCCM+ показали наилучшее качественное и количественное совпадение с экспериментальными данными.

В работе была разработана методика моделирования обтекания лодки летательных аппаратов водного базирования на режиме глиссирования с помощью указанных программных комплексов, которая может быть использована на этапе разработке перспективных летательных аппаратов, исследования особенностей обтекания, дополнять эксперимент. Например, может быть использована для определения характеристик глиссирования со скольжением и креном.

К сожалению, численное моделирование задачи глиссирования летательного аппарата водного базирования в программных комплексах типа OpenFOAM или StarCCM+ требует больших временных и вычислительных ресурсов. Особенно для нестационарных задач с масштабом времени порядка десятков секунд. Поэтому для исследования влияния активной механизации на процесс глиссирования автором был использован **второй подход**, основанный на разработке упрощенной математической модели, которая позволяет моделировать динамику глиссирования в условиях волнения и спокойной воды в продольной плоскости. Структура матмодели в виде блок-схемы показана приведен на рисунке 5.

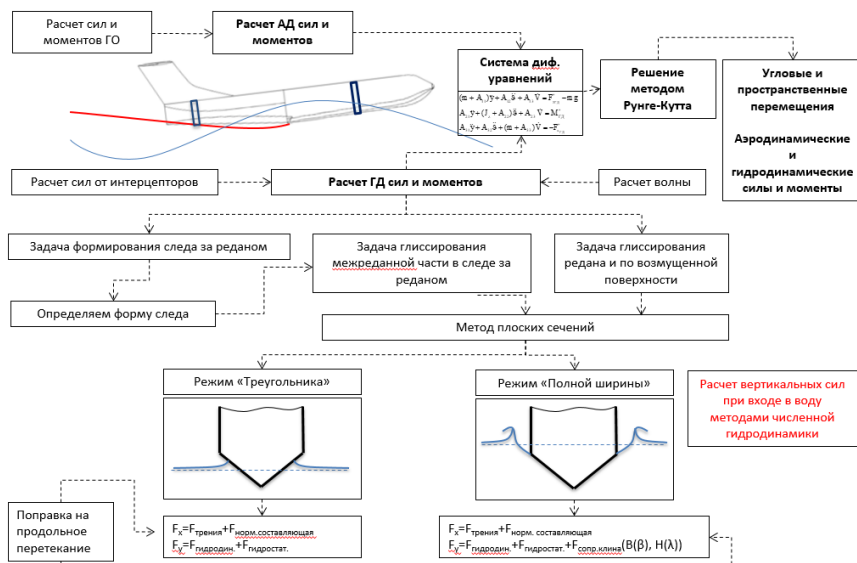


Рисунок 5 – Блок-схема математической модели глиссирования летательного аппарата водного базирования в продольной плоскости

Основой математической модели является расчет гидродинамических сил и моментов с помощью метода поперечных плоских сечений с поправками на продольное перетекание. Движение летательного аппарата рассматривается только в продольной плоскости. Согласно данной методике, течение в каждом поперечном сечении глиссирующего корпуса рассматривается независимо от соседних. Это позволяет свести задачу глиссирования ЛА к задаче определения гидродинамических сил и моментов, действующих на погружающееся клиновидное тело в воду. Выделяют два режима погружения. Первый – без смачивания скул, соответствующий глиссированию на «треугольнике», второй режим – со смоченными скулами.

В зависимости от режима имеют место свои подходы к определению гидродинамических сил, действующих на каждое поперечное сечение глиссирующего корпуса. На режиме без смачивания скул для плоско-килеватой пластины применяется известное решение Вагнера. Для режима со смоченными скулами применяется подход Г.В. Логвиновича, основанный на решении Бобылёва. Данные подходы хорошо себя зарекомендовали для плоско-килеватых тел, но не годятся для корпусов, имеющих сложные криволинейные многоскулые обводы, например, как на самолете-амфибии Бе-200. Для таких обводов предлагается использовать зависимости вертикальной гидродинамической от погружения, полученные в результате численного моделирования погружения поперечного сечения в воду. Пример такого расчета показан на рисунке 6.

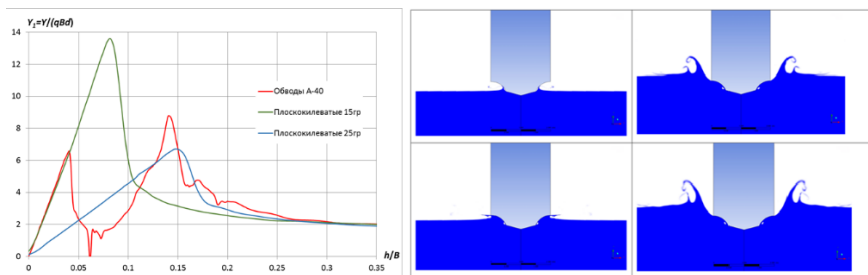


Рисунок. 6 – Результаты численного моделирования погружения поперечного сечения в воду корпуса, имеющего многоскулые криволинейные обводы.

На рисунке показан график зависимости вертикальной гидродинамической силы от погружения и форма свободной поверхности на разных этапах погружения.

Гидродинамические силы в каждом сечении интегрируются по длине корпуса для определения сил и момента. Вводится поправка на продольное перетекание. Связано это с тем, что по методу поперечных плоских сечений максимальная вертикальная сила должна быть в кормовом сечении, но в реальности в кормовом сечении вертикальная подъёмная гидродинамическая сила стремится к нулю. Поэтому вводится поправка, учитывающая уменьшение горизонтальной скорости в рассматриваемом сечении на величину среднего значения $\partial\varphi/\partial x$ в нем:

$$V_1 = V - \frac{\partial\varphi}{\partial x} = V \left[1 - \frac{f_y(V_1)}{2\rho V V_1 b} \right]$$

Для задания волн используется модель одномерного морского волнения, основанная на теории прогрессивных волн малой амплитуды:

$$\eta(t, x) = \sum_{i=1}^{N_p} a_i \cos\left(\omega_i t - \frac{\omega_i^2}{g} x + \varphi_i\right)$$

Где a_i - амплитуда i -й гармоники, ω_i - её частота, φ_i - фаза. Если рассматривается регулярная волна, то в выражении (1) берётся только одна гармоника заданной частоты и амплитуды. Если требуется смоделировать нерегулярную волну, то в (1) берётся сумма конечного числа гармоник (по опыту достаточно $N_p = 20-30$). Амплитуда каждой гармоники определяется на

основании заданного спектра волнения $a_i = \sqrt{2S(\omega_i)\Delta\omega}$, где $\Delta\omega = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{N_p}$.

В отечественной практике принято следующее выражение для спектра волнения, которое характеризуется таким параметром, как $h_{3\%}$ - высота волны 3% обеспеченности.

$$S(\omega) = \frac{2}{\pi} 9,43 \frac{D}{\bar{\omega}} \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^6 e^{-1,5 \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^4}$$

Здесь $D = 0,143 \left(\frac{h_{3\%}}{2} \right)^2$ – дисперсия волнения, $\bar{\omega} = \frac{2\pi}{3,3\sqrt{h_{3\%}}}$ – средняя частота

волнения, а $\omega_m = 0,77\bar{\omega}$ – частота, на которой спектр волнения $S(\omega)$ имеет максимум. В данной модели фаза ϕ_i и частота ω_i i -ой составляющей волны берётся случайным образом в диапазоне от 0 до 2π для фазы и от $0.5 \omega_m$ до $2.5 \omega_m$ для частоты.

Хвостовая часть гидросамолета глиссировать по волновой впадине (кильватерный след), сформированной основным реданом. Для определения гидродинамических сил, действующих в хвостовой части необходимо знать её форму. К сожалению, существует довольно мало работ, посвященных данной проблеме. Фактически можно выделить только работу D. Savitsky (США), который выполнил измерения формы кильватерного следа для определенного набора параметров и вывел эмпирические зависимости, а также экспериментальные и теоретические работы А.И. Тихонова в ЦАГИ. В данной работе была использована упрощенная математическая модель для описания формы свободной поверхности за реданом самолета-амфибии с эмпирическими поправочными коэффициентами, изначально предложенная В.А. Лукошеским, но доработанная автором диссертации.

$$\eta_{\text{сл}}(x_c) = e^{-\left(\frac{\omega x_c}{\pi V}\right)^2} \left[\zeta_p \cos\left(\frac{\omega x_c}{V}\right) + \frac{a_2}{\omega} \dot{\zeta}_p \sin\left(\frac{\omega x_c}{V}\right) \right]$$

Эмпирические коэффициенты подбирались на основе данных D.Savitsky и А.И. Тихонова.

Уравнения динамики гидросамолета помимо гидродинамических сил и моментов дополнены аэродинамическими силами и моментами, действующими на крыло, фюзеляж и горизонтальное оперение, а также силой тяги двигателей.

Дополнительная подъемная сила и сила сопротивления, обусловленные наличием интерцептора, как было показано М.Ю. Банниковым и В.А. Лукашеским, практически не зависят от угла дифферента и величины погружения. В этом случае суммарная подъемная сила может быть выражена следующим образом:

$$C_B(\vartheta, H, \delta) = C_{B0}(\vartheta, H) + \Delta C_B(\delta)$$

Где δ – высота интерцептора, ΔC_B – дополнительная подъемная сила, обусловленная наличием интерцептора, $C_{B0}(\vartheta, H)$ – коэффициент гидродинамической подъемной силы корпуса без интерцептора. В расчетной методике принято, что изменение подъемной силы при изменении высоты интерцептора происходит мгновенно.

Составляющая подъемной силы $\Delta F_{y\delta}$ и сила сопротивления интерцептора $\Delta F_{x\delta}$ движущегося с углом дифферента ϑ глиссирующего корпуса, определяются по следующим выражениям:

$$\Delta F_{y\delta} = \Delta C_B(\delta) \cos(\beta) \frac{\rho V^2}{2} B^2$$

$$\Delta F_{x\delta} = \Delta C_{xB}(\delta) \frac{\rho V^2}{2} B^2 + 9 \Delta F_{y\delta}$$

где β – угол килеватости днища, B – ширина глиссирующего корпуса в районе редана.

Точка приложения дополнительной подъёмной силы, обусловленной наличием интерцептора, принимается сосредоточенной в точке на киле на удалении от интерцептора в сторону носа на величину равную 1.5δ .

Для управления величиной выдвигания интерцептора используется следующее выражение:

$$\delta = \delta_0(V) + f_\delta(\vartheta, \dot{\vartheta}, \Delta n_y)$$

где $\delta_0(V)$ – постоянная составляющая выдвигания интерцептора, зависящая от скорости движения самолета V , $f_\delta(\vartheta, \dot{\vartheta}, \Delta n_y)$ – переменная составляющая выдвигания интерцептора, обеспечивающая демпфирование колебаний, $\vartheta, \dot{\vartheta}$ – угол и угловая скорость дифферента (тангажа), Δn_y – избыточная вертикальная перегрузка. Постоянная составляющая δ_0 – подбирается таким образом, чтобы обеспечить минимальное сопротивление при заданной скорости глиссирования.

Помимо гидродинамических интерцепторов для парирования колебаний на режиме глиссирования может использоваться аэродинамический демпфер тангажа, в роли которого выступает автоматически управляемый руль высоты. Подобное управление реализовано на самолете-амфибии Бе-200. Режим работы аэродинамического демпфера переключается автоматически между режимами «полёт» и «глиссирование», но также имеется возможность ручного переключения. На этих режимах отличаются передаточные коэффициенты закона управления рулём высоты. В данной работе использовался следующий упрощённый закон управления углом установки руля высоты:

$$\delta_a = K_a \dot{\vartheta}$$

В итоге вертикальная сила, действующая на руль высоты определяться следующим выражением

$$F_{yPB} = (\alpha + \delta_a) C_{yPB} \frac{\rho_a V^2}{2} S_{PB},$$

где α – угол атаки самолёта, S_{PB} – площадь руля высоты.

Математическая модель была верифицирована на надёжных экспериментальных данных. Так на рисунках 7 и 8 представлено сопоставление экспериментальных и расчетных данных стационарного глиссирования плоскокилеватой пластины со скоростью 8м/с, углом поперечной килеватости $\beta = 15^\circ$, при постоянном угле дифферента $\vartheta = 5,7^\circ$.

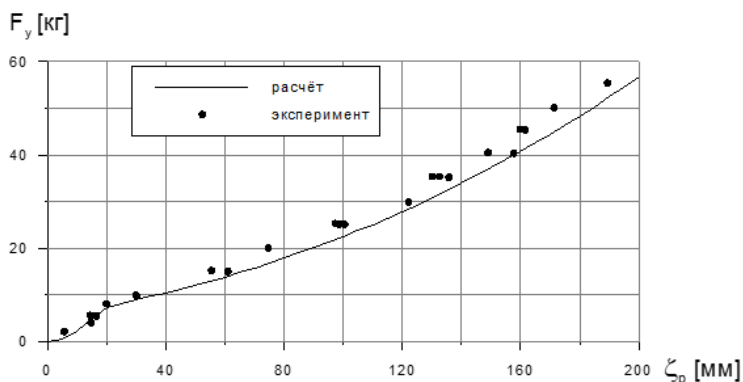


Рисунок 7 – Зависимость подъёмной силы, действующей на глиссирующее тело, от глубины погружения

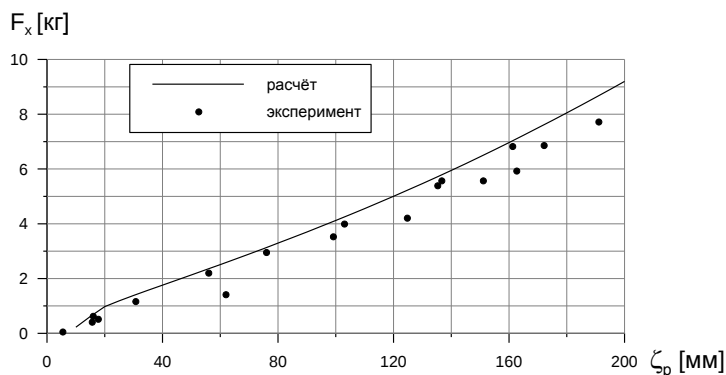


Рисунок 8 – Зависимость силы сопротивления, действующей на глиссирующее тело, от глубины погружения

Получено хорошее согласование результатов.

Математическая модель позволяет моделировать динамику глиссирования летательного аппарата морского базирования в условиях спокойной воды, регулярного и нерегулярного волнения. Моделировать различные алгоритмы работы автоматически управляемой гидродинамической и аэродинамической механизации.

Основным достоинство матмодели является высокая скорость расчета, позволяющая выдавать результаты в режиме реального времени с частотой 100- 200Гц. Это позволяет использовать её в качестве математического обеспечения авиационных тренажеров и пилотажных комплексов.

На реализацию математической модели в виде компьютерных программ в Роспатенте были получены свидетельства «на программу для ЭВМ» №2018616919 и №2015612428. На основе моделирования с помощью указанных программ была разработана компьютерная программа для системы автоматического управления

гидродинамическими интерцепторами, на которую получено свидетельство №2018616919.

Глава 4 посвящена расчетным исследованиям влияния гидродинамических интерцепторов на гидродинамические и аэродинамические характеристики самолета-амфибии.

В первой части главы были выполнены расчеты динамики глиссирования для самолета-амфибии со следующими характеристиками: взлетная масса 37т, момент инерции относительно центра масс 1150тм^3 , ширина фюзеляжа в районе редана 2,1м, площадь крыла 112м^2 , гидродинамическое удлинение фюзеляжа 13,5, угол поперечной килеватости в районе редана 25° , взлетная скорость $V_0 = 52\text{ м/с}$.

На первом этапе были выполнены расчеты глиссирования в условиях спокойной воды. Определялась возможность снижения суммарного гидродинамического сопротивления.

Выполненные расчеты в основном носят качественный характер, тем не менее было показано, что в диапазоне скоростей $V = 0,5 \div 0,8V_0$, наличие постоянного выдвинутого интерцептора, установленного на основном редане, позволяет управлять углом дифферента самолета, и тем самым добиваться наиболее выгодного с точки минимизации сопротивления, режима движения (см. рисунок 9).

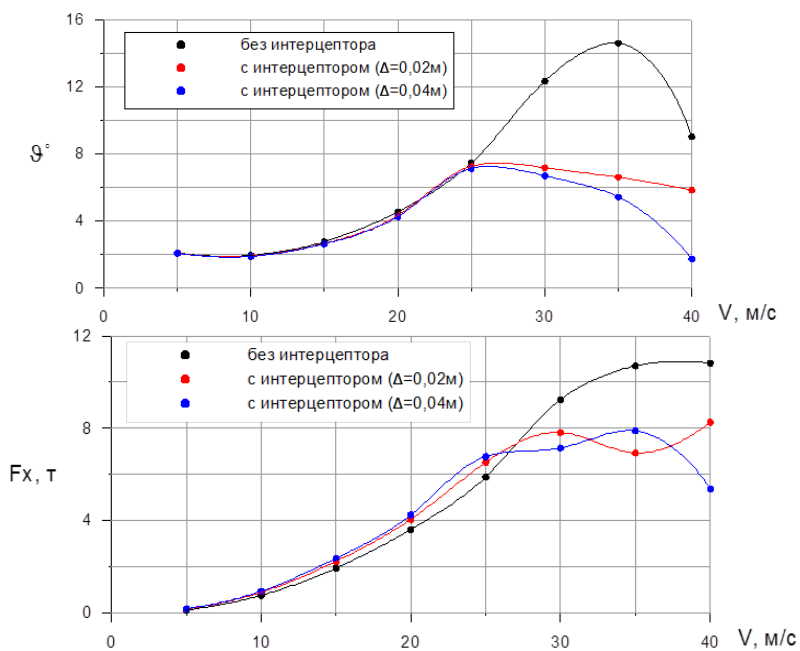


Рисунок 9 – Зависимость угла дифферента и полного сопротивления от скорости при различных постоянных высотах интерцептора

В тоже время, было показано, что неуправляемый интерцептор, т.е. без переменной части $f_{\delta}(\vartheta, \dot{\vartheta}, \Delta n_y)$ в законе управления, может являться причиной неустойчивого движения, провоцировать появление колебаний (см. рисунок 10 и 11). Так на рисунке представлены временные диаграммы угла дифферента и вертикальных перемещений центра масс самолета для случаев без интерцептора, с фиксированным интерцептором и автоматически управляемым интерцептором. При фиксированном интерцепторе при глиссировании на спокойной воде возникают колебаний с периодом 2сек. Но при включении автоматического управления колебания исчезают.



Рисунок 10 – Временная зависимость угла дифферента при движении по спокойной воде со скоростью $V=30\text{ м/с}$

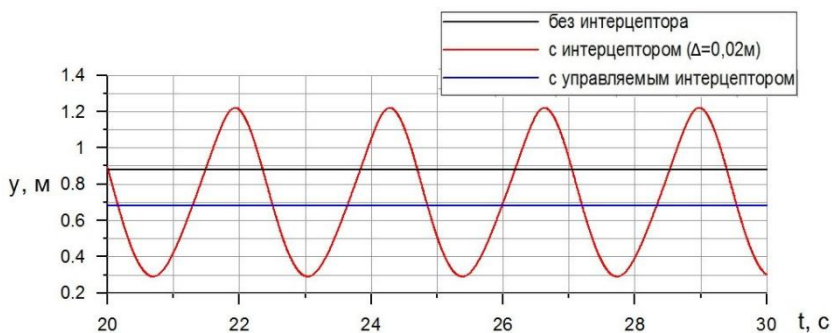


Рисунок 11 – Временная зависимость вертикальных перемещений центра масс при движении по спокойной воде со скоростью $V=30\text{ м/с}$

Подобные результаты объясняются следующей особенностью динамики глиссирования гидросамолета. На скоростях выше 0,6-0,7 от взлётной скорости кормовая часть гидросамолета при обычных условиях выходит из воды. Замытой остается только относительно небольшая область перед поперечным реданом. Если при каких-либо условиях кормовая часть при этих скоростях коснётся воды, то может возникнуть существенный дестабилизирующий момент на пикирование. Это приведет к резкому уменьшению угла дифферента и погружению в воду

носовой части, в следствии чего появится большой кабрирующий момент, стремящийся резко увеличить угол дифферента. В зависимости от ситуации это может привести к незатухающим колебаниям и катастрофе. Данное явление называется верхняя граница устойчивости. В этой ситуации управляемый интерцептор парирует колебания, не позволяя им развиваться. Кроме того, с его помощью возможно удерживать самолет-амфибию в определенном диапазоне углов дифферента, при котором глиссирование устойчиво. На рисунке 12 представлены эквивалентные зоны устойчивости.

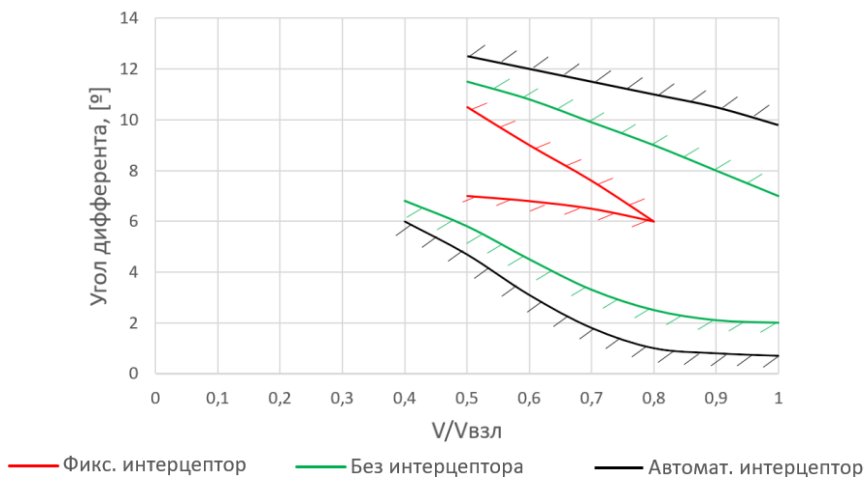


Рисунок 12 – Зоны устойчивости глиссирования самолета-амфибии

Для исследования влияния автоматического управления интерцепторами на мореходные характеристики были проведены расчеты движения гидросамолета с постоянной скоростью в условиях регулярного волнения. Длина волны в расчетах составляла $\lambda = 50\text{ м}$, высота волны $h = 0.8\text{ м}$. Данные параметры соответствуют нерегулярному волнению высотой 3% обеспеченности $h_{3\%} = 1.6\text{ м}$. Длина волны примерно соответствует двум длинами лодки гидросамолета. Этот случай является наихудшим с точки зрения мореходности.

На рисунках 13 и 14 представлены результаты расчетов колебаний угла дифферента гидросамолета при глиссировании со скоростями $V = 25\text{ м/с}$, которая примерно соответствует половине взлетной скорости, и скорости $V = 35\text{ м/с}$. Расчеты выполнены для следующих случаев: интерцепторы отсутствуют, интерцепторы выдвинуты на постоянную величину, выдвижение интерцепторов управляется автоматически.

Как можно видеть из результатов при скорости глиссирования $V = 25\text{ м/с}$ наличие интерцепторов и управление ими практически не сказывается на характере колебаний.

Но уже при скорости глиссирования $V = 35\text{ м/с}$ автоматическое управление интерцепторами позволяет снизить амплитуду колебаний почти в 5 раз.

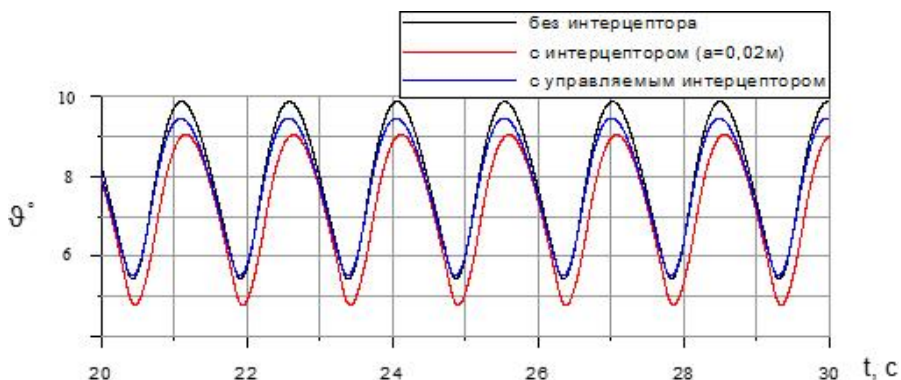


Рисунок 13 – Временная зависимость угла дифферента в условиях волнения при скорости $V=25\text{ м/с}$

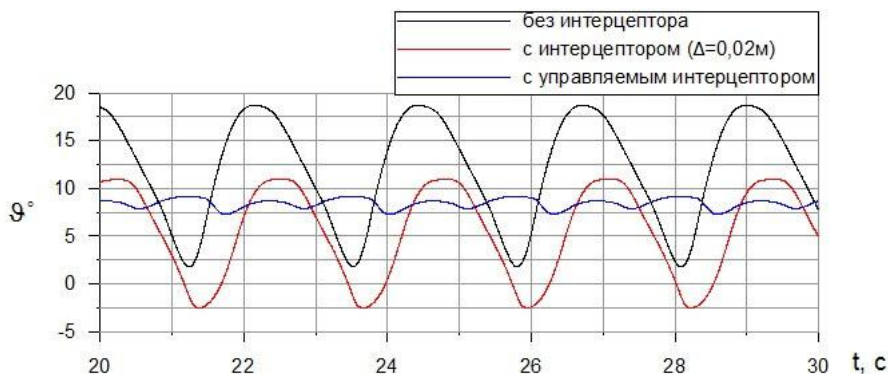


Рисунок 14 – Временная зависимость угла дифферента в условиях волнения при скорости $V=35\text{ м/с}$

Как уже было отмечено, на самолете-амфибии Бе-200 для парирования колебаний при глиссировании в условиях волнения используется аэродинамический демпфер тангажа. Для проверки возможности дополнительного повышения мореходных характеристик за счёт использования интерцепторов были проведены сравнительные расчеты динамики колебаний гидросамолета в условиях регулярного волнения для следующих вариантов: без интерцепторов с аэродинамическим демпфером тангажа; с фиксированным интерцептором и аэродинамическим демпфером тангажа; с управляемым интерцептором и аэродинамическим демпфером тангажа.

Эти результаты представлены на рисунке 15 и 16 в виде временных зависимостей угла дифферента и вертикальных перемещений центра масс при скорости 35 м/с, примерно соответствующей скорости 0,7 от взлётной.

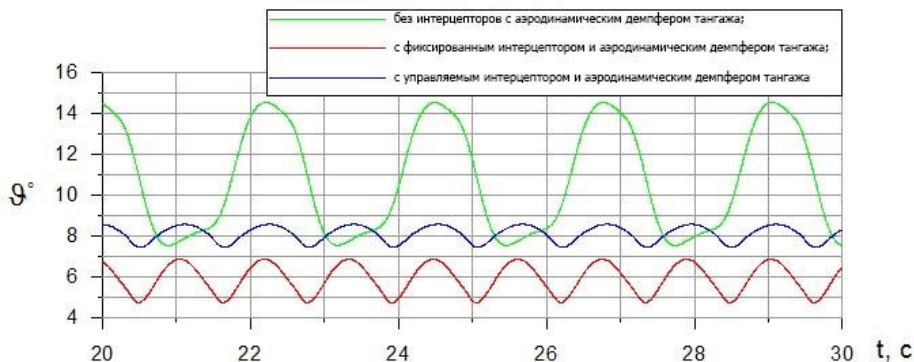


Рисунок 15 – Временная зависимость угла дифферента в условиях волнения при скорости $V=35\text{м/с}$ при использовании интерцепторов и аэродинамического демпфера тангажа

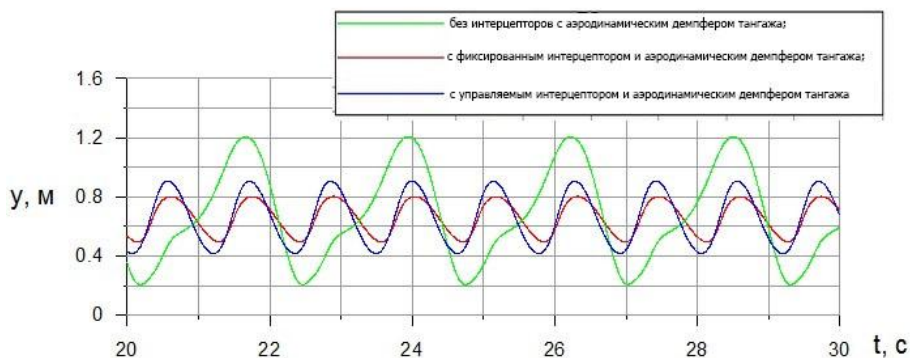


Рисунок 16 – Временная зависимость вертикальных перемещений центра масс в условиях волнения при скорости $V=35\text{м/с}$ при использовании интерцепторов и аэродинамического демпфера тангажа

Из них видно, что при использовании управляемых интерцепторов существенно снижаются амплитуды колебаний. Объясняется это тем фактом, что при этих скоростях существенная доля гидродинамической подъемной силы обеспечивается интерцептором. Что приводит к уменьшению площади днища, погруженной в воду. Фактически она получается сосредоточена вблизи центра масс. При этом гидродинамическая подъемная сила, обусловленная интерцептором, практически не зависит от угла дифферента и погружения, и расположена вблизи центра масс самолета. В итоге с точки зрения гидродинамических сил и моментов самолет находится в неустойчивом равновесии. С одной стороны - это недопустимо. Но при наличии автоматически управляемых органов управления, а именно аэродинамического демпфера тангажа, возможно эффективно управлять углами дифферента, тем самым парируя колебания самолета при глиссировании в условиях волнения, и обеспечивать устойчивость.

Во второй части главы 4, в программном комплексе OpenFoam были выполнены расчеты стационарного глиссирования плоско-килеватого корпуса с несимметрично выдвинутыми интерцепторами и ненулевыми углами скольжения. Результаты моделирования представлены на рисунках 18 и 19

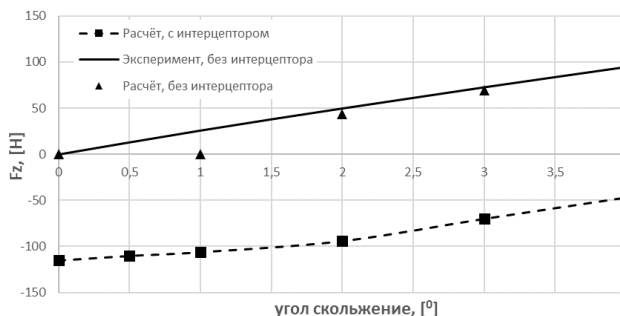


Рисунок 18 – Зависимость суммарной боковой силы, действующей на плоско-килеватый корпус при глиссировании со скольжением

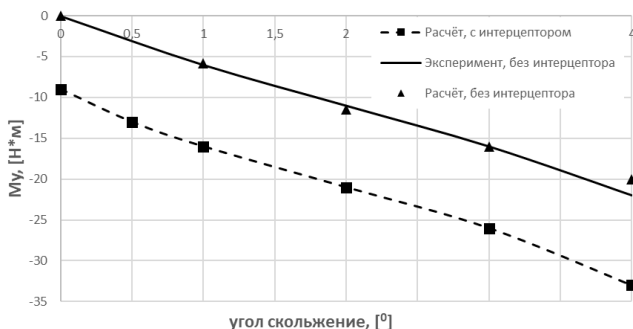


Рисунок 19 – Зависимость разворачивающего момента, действующего на плоско-килеватый корпус при глиссировании со скольжением

Из результатов моделирования следует, что несимметричный гидродинамический интерцептор приводит с одной стороны к увлечению разворачивающего момента, а с другой к изменению значения боковой гидродинамической силы. Если при нулевом интерцепторе имеет место монотонное увеличение боковой силы с углом скольжения, то при установке интерцептора эта кривая сместилась на графике вниз, фактически поменяв знак. Это говорит нам о том, что несимметрично выдвинутые гидродинамические интерцепторы способны компенсировать боковую силу, возникающую при движении ЛА водного базирования с не нулевыми углами скольжения. Таким образом применение несимметрично выдвинутых интерцепторов позволяет управлять траекторией движения летательного-аппарата по курсу на режиме взлета и посадки, что может потребоваться в случае отказа двигателя или сильного бокового ветра в условиях ограниченного водоёма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана программа и методика испытаний динамически-подобной модели самолета-амфибии, оснащенной автоматически-управляемыми гидродинамическими интерцепторами и аэродинамическим демпфером тангажа

2. Проведены экспериментальные исследования глиссирования модели самолета-амфибии, оснащенной неподвижными гидродинамическими интерцепторами, которые подтвердили возможность с их помощью эффективно управлять углами дифферента, обеспечивая тем самым минимальное сопротивление.

3. Разработана методика моделирования и верифицированы программные комплексы вычислительной гидродинамики для решения задач глиссирования и быстрого входа тел в воду.

4. Выполнено расчетное моделирование глиссирования фюзеляжа гидросамолета с ненулевыми углами скольжения, которое показало, что при несимметричном выдвижении интерцепторов, установленных на поперечном редане, возникает боковая гидродинамическая сила, компенсирующая (в зависимости от стороны выдвижения интерцепторов) боковую гидродинамическую силу, возникающую из-за несимметричного обтекания фюзеляжа.

5. Разработана матмодель динамики глиссирования летательного аппарата морского базирования, оснащенного автоматическими гидродинамическими интерцепторами и аэродинамическим демпфером тангажа в условиях спокойной воды и волнения. Модель может быть использована в качестве математического аппарата для пилотажных комплексов и авиационных тренажеров.

6. Расчетное моделирование динамики глиссирования самолета-амфибии показало, что автоматическое управление гидродинамическими интерцепторами позволяет расширить диапазон устойчивого глиссирования по спокойной воде и снизить колебания и перегрузки, действующие на летательный аппарат при глиссировании в условиях волнения. Оценки показывают, что максимальная высота волны, которую сможет преодолеть летательный аппарат может быть увеличена в 1,5 раза.

Список работ, опубликованных по теме диссертаций

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы:

1. Овдиенко, М.А. Разработка расчетной модели глиссирования гидросамолета, оснащенного автоматически управляемыми интерцепторами // Труды МАИ, вып.103, 2018. Доступно на: http://trudymai.ru/upload/iblock/c64/Ovdienko_rus.pdf?lang=en&issue=103

2. Варюхин А. Н., Овдиенко М. А. Верификация программного комплекса OpenFOAM на задачах моделирования глиссирования морских летательных аппаратов // Труды МАИ, вып.104, 2019. Доступно на: https://mai.ru/upload/iblock/c0b/Varyukhin_Ovdienko_rus.pdf

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК и Минобрнауки России по прочим специальностям:

3. А.Н. Варюхин, В.В. Веселов, С.В. Дикий, М.А. Овдиенко Эксплуатация самолетов-амфибий на заснеженной поверхности // Научный вестник МГТУ ГА №223(1), Москва, 2016, с.161-167

4. Варюхин, А.Н., Веселов В.В., Дикий С.В., Овдиенко М.А. Экспериментальные исследования мореходных характеристик гидросамолета с амортизированными поплавками // Вестник УГАТУ, [S.I.], v. 22, n. 1 (79), p. 51-57, апр. 2018. ISSN 1992-6502

<<http://journal.ugatu.ac.ru/index.php/Vestnik/article/view/252>

5. Власов А.В., Варюхин А.Н., Овдиенко М.А. Математическая модель качки гидросамолета на режиме дрейфа // Вестник УГАТУ, [S.I.], v. 22, n. 1 (79), p. 58-66, апр. 2018. ISSN 1992-6502. Доступно на:

<<http://journal.ugatu.ac.ru/index.php/Vestnik/article/view/251>

Публикации в изданиях, индексируемые в Web of Science и/или Scopus:

6. Zhuravlev Y.F., Varyukhin A.N., Shulman N.A., Arzhanov A.I., Ovdienko M.A. Experimental and theoretical investigations of cylinder with hydrodynamic interceptor glissading on flat water surface // FAST 2013 – 12th International conference on fast sea transportation, 2013 г.

Объекты интеллектуальной собственности:

7. Варюхин А.Н., Арилин А.В., Овдиенко М.А., Дикий С.В., Веселов В.В. Компьютерная программа для моделирования динамики глиссирования поплавкового гидросамолета с амортизированными стойками крепления поплавкового шасси в условиях регулярного волнения // Программа для ЭВМ, Свидетельство №2015612428.

8. Варюхин А.Н., Овдиенко М.А., Киселев И.О. Программа для системы автоматического управления гидродинамическими интерцепторами // Программа для ЭВМ, Свидетельство №2018616919.

9. Варюхин А.Н., Овдиенко М.А., Власов А.В. Математическая модель продольной динамики глиссирующих корпусов, оборудованных автоматически управляемыми гидродинамическими интерцепторами, в условиях волнения // Программа для ЭВМ, Свидетельство №2018616918.

Публикации в прочих изданиях:

10. Шульман Н. А., Варюхин А. Н., Овдиенко М. А. Оценки возможности совершения посадки самолёта-амфибии на снежную поверхность // Сборник докладов X международной научной конференции по гидроавиации "Гидроавиасалон-2014", Геленджик, 2014 г.

11. Варюхин А.Н., Арилин А.В., Дикий С.В., Овдиенко М.А. Расчётное исследование эффективности применения амортизированных и демпфированных стоек крепления поплавкового шасси для увеличения мореходности поплавкового гидросамолёта // Сборник докладов X международной научной конференции по гидроавиации "Гидроавиасалон-2014", Геленджик, 2014 г

12. Варюхин А.Н., Овдиенко М.А. Анализ эффективности применения автоматически управляемых интерцепторов как средства повышения мореходности самолетов-амфибий // Сборник тезисов 58-й научной конференция МФТИ, 2015 г.

13. Ovdienko M.A., Varyukhin A.N., Veselov V.V. and others. «Improving seaplane seakeeping through the use of floats with shock absorbers». FAST-2015, Amsterdam, 2015 г.

14. Варюхин А.Н., Овдиенко М.А. «Глиссирование самолета-амфибии при отказе одного из двигателей», Сборник тезисов 59-ой научной конференция МФТИ, 2016

15. Дикий С.В., Веселов В.В., Варюхин А.Н., Овдиенко М.А., Шульман Н.А. Экспериментальное исследование влияния амортизации крепления поплавков на мореходные характеристики гидросамолета // 11-я международная выставка и научная конференция по гидроавиации «Гидроавиасалон-2016», Геленджик, 2016 г.

16. Варюхин А.Н., Овдиенко, Дикий С.В., Арилин А.В., Веселов В.В. Математическое моделирование глиссирования самолета-амфибии, оснащенного автоматическими гидродинамическими интерцепторами // 11-я международная выставка и научная конференция по гидроавиации «Гидроавиасалон-2016», Геленджик, 2016 г.

17. Варюхин А.Н., Арилин А.В., Овдиенко М.А. Использование автоматически управляемого интерцептора для повышения мореходности самолетов-амфибий // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции по аэродинамике ЦАГИ, пос. Володарского, 2016 г.

18. Ovdienko M.A., Varyukhin A.N. The development of stepped planing hull equipped with interceptors // FAST-2017, Nantes-France, 2017 г.

19. Овдиенко М.А., Варюхин А.Н. Глиссирование самолета-амфибии с гидродинамическими интерцепторами // Гидродинамика больших скоростей и кораблестроение: сб. тр. XII Междунар. летней научной школы-конференции, посв.155-летию со дня рождения академика А.Н. Крылова. – Чебоксары, 2018. – С.103-106.