

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ПАО «Ил»

Грудинин Ю. В.



### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Ялозо Андрея Владимировича «Методы одномерного, трехмерного и гибридного моделирования гидродинамических течений в инженерных гидросистемах летательных аппаратов», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

По мере того, как работа современных летательных аппаратов становится надежнее, эффективнее и безопаснее, их конструкция неминуемо усложняется. Проектирование сложных систем требует полного понимания работы всех отдельных подсистем и компонентов. Хотя инженеры могут получить недостающие данные с помощью эксперимента, такой подход может быть чрезвычайно дорогостоящим, а в некоторых случаях – невозможным. В связи с этим, применение компьютерного моделирования становится неотъемлемой частью процесса проектирования новых образцов авиационной техники. Данные обстоятельства обуславливают **актуальность** диссертационной работы А.В. Ялозо.

Основная **цель** диссертационной работы А.В. Ялозо – разработка отечественного программного комплекса для моделирования гидродинамических течений в инженерных гидросистемах и его верификация и внедрение на предприятия авиастроения для решения актуальных на сегодняшний день задач.

Чтобы добиться поставленной цели, диссертанту потребовалось решить ряд **задач** исследовательского и прикладного характера. Прежде всего, на основе надежных и эффективных методов и алгоритмов, была сформулирована методика гибридного моделирования инженерных гидросистем произвольной топологии с возможностью связывания одномерного и трехмерного подходов к моделированию. Предложенная методика реализована в виде полноценного программного комплекса. Значительных усилий потребовала также реализация довольно большого объема вычислительных экспериментов, требуемых для отработки и оценки эффективности предлагаемых методов и алгоритмов. Наконец, была успешно выполнена апробация и внедрение разработанного программного обеспечения в практическую деятельность для решения промышленно-ориентированных задач авиастроения.

Решение обозначенных задач позволило получить **ряд новых научных результатов**, представленных в диссертации:

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

02 04 2020

1. Разработана методика гибридного 1D-3D моделирования гидродинамических течений, основанная на итерационной процедуре обмена общими граничными условиями между разномасштабными областями с учетом восстановления картины развитого течения в трехмерной области.

2. Впервые предложен и реализован алгоритм «каскадного сбора глобального уровня» многосеточного решателя СЛАУ, позволяющий ускорить трехмерное моделирование гидродинамических течений в высокопараллельном режиме.

3. Разработаны полуэмпирические математические модели гидравлических элементов, составляющих топливные системы маневренных самолетов.

4. Составлен минимальный базис задач верификации и приведены результаты верификации разработанных методов и алгоритмов.

Полученные автором результаты, безусловно, представляют большое теоретическое и прикладное значение.

**Достоверность и обоснованность** полученных в диссертации теоретических результатов обеспечивается корректным применением математического аппарата, использованного для получения этих результатов. Оценку обоснованности и работоспособности разработанных численных алгоритмов дают результаты проведенных вычислительных экспериментов, а также сопоставление этих результатов с имеющимися «эталонными» данными, в качестве которых в некоторых случаях выступают полученные аналитические решения задач либо экспериментальные данные других авторов.

**Практическая значимость** полученных результатов, прежде всего, заключается в проведенных работах по созданию и развитию отечественных программных комплексов «FlowDesigner» и «ЛОГОС», в которых диссертант принимал непосредственное участие. В частности, с помощью программного комплекса «FlowDesigner» были проведены успешные расчетные исследования топливных систем летательных аппаратов, проектируемых ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого». Программный комплекс «ЛОГОС» также достаточно широко используется предприятиями России для решения различных промышленных задач.

Важно также отметить, что полученные в диссертации результаты использовались в нескольких российских промышленных и исследовательских проектах.

**Область исследования** диссертации соответствует пунктам 3, 4, 5 паспорта научной специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

**Общая характеристика диссертации.** Полный объем диссертации составляет 153 страницы, включая 82 рисунка и 11 таблиц. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 106 наименований, и двух приложений.

**Во введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируются цель, задачи, научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

**Первая глава** посвящена методике гибридного моделирования гидродинамических течений в инженерных гидросистемах. Такой подход является оптимальным при проведении численных расчетов различных видов инженерных

гидросистем, содержащих одновременно сеть разветвленных трубопроводов достаточной протяженности и элементы со сложной геометрической конфигурацией. Гибридная модель представляет собой модель гидросистемы в одномерном приближении, в которой выделяется один или несколько участков, гидродинамические характеристики которых оцениваются с помощью методов трехмерного численного моделирования.

Для обеспечения лучшей сходимости итерационного процесса в одномерной области, в отличие от уже существующих подходов, предлагается решать общую систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно давлений и расходов в узлах моделируемой гидросистемы. Предложенный численный метод решения СЛАУ позволяет найти единственное решение недоопределенных СЛАУ и однозначно выявить случаи, при которых СЛАУ является несовместной.

Связь одномерной и трехмерной моделей основывается на организации обменов граничными условиями между разномасштабными областями по ходу проведения расчета.

**Вторая глава** посвящена вопросу ускорения расчетов в трехмерной постановке с использованием многосеточных технологий. Как правило, при проведении гибридных расчетов физическое время моделирования областей в трехмерной постановке во много раз превосходит время, необходимое для расчета одномерных областей. Поэтому задача по ускорению моделирования трехмерных областей при проведении гибридных расчетов является особенно актуальной для достижения максимальной эффективности и сокращения общего времени расчета.

В данной главе приводится описание многосеточного метода с использованием алгоритма «каскадного сбора глобального уровня», предложенного и реализованного диссертантом в рамках программного комплекса «ЛОГОС», а также результаты верификации и исследования эффективности метода на серии численных экспериментов. По результатам приведенных численных экспериментов можно сделать вывод, что предложенный диссертантом алгоритм позволяет значительно ускорить общее время решения задачи, и основное его преимущество начинает проявляться с увеличением числа процессоров, используемого для расчета трехмерных областей.

**В третьей главе** приводится описание программного комплекса «FlowDesigner», основанного на методике, представленной в первой главе, и предназначенного для моделирования гидродинамических течений в инженерных гидросистемах. Разработка данного программного комплекса проводилась при определяющем участии диссертанта. Также в главе представлены результаты верификации разработанного программного комплекса на примере типичных задач, возникающих при моделировании инженерных гидросистем. Расчет трехмерных областей гибридных моделей производится с использованием программного комплекса «ЛОГОС».

**В четвертой главе** представлены результаты успешного практического применения разработанного программного комплекса «FlowDesigner» для решения промышленно-ориентированных задач моделирования работы топливных и гидравлических систем маневренных самолетов, проектируемых ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого». Полученные результаты хорошо согласуются с имеющимися аналитическими и экспериментальными данными.

**В заключении** приведены основные результаты диссертационного исследования, которые соответствуют основным положениям, выносимым на защиту.

**Рекомендации по использованию результатов диссертации.** Результаты диссертационной работы А.В. Ялозо могут быть успешно применены для имитационного моделирования работы топливных систем самолетов, что подтверждается положительный опытом и планами дальнейшего использования программного комплекса «FlowDesigner» в ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого» при разработке перспективных образцов летательных аппаратов.

**Автореферат** диссертации соответствует ее содержанию и позволяет получить о ней достаточно полное представление.

Ознакомление с текстом диссертации А.В. Ялозо вызывает следующие **замечания** по ее содержанию.

Прежде всего, следует отметить, что предложенный диссертантом алгоритм каскадного сбора для ускорения моделирования трехмерных областей, судя по результатам приведенных численных экспериментов, дает ощутимое преимущество на сеточных моделях, содержащих десятки млн. ячеек. На сегодняшний день, несмотря на развитие суперкомпьютерных технологий, моделирование течений с использованием таких сеточных моделей не является широко распространенной практикой. Представленный алгоритм можно рассматривать как перспективный подход для будущих исследований, когда, в связи с дальнейшим развитием суперкомпьютерных технологий, будет широко распространено моделирование течений на сеточных моделях, содержащих десятки млн. ячеек и более.

Параграф 1.1 диссертации носит название «Метод одномерного моделирования гидросистем, обеспечивающий неявную связь расход-давление на уровне общей СЛАУ». Термин «неявный» в данном случае представляется неудачным, так как задача по сути своей стационарная, хотя интуитивно ясно, что автор имеют в виду.

При записи уравнений движения вязкой жидкости в программном комплексе «FlowDesigner» отсутствует слагаемое, содержащее массовые силы. При моделировании гидросистем маневренных летательных аппаратов, которые могут в процессе своего движения менять положение в пространстве, отсутствие учета массовых сил может привести к существенным погрешностям.

В тексте диссертации имеется утверждение: «За счет использования общей СЛАУ для расходов и давлений количество итераций до заданного уровня сходимости меньше, чем при отдельном нахождении расхода и давления». Это утверждение никак не обосновано в тексте, и, строго говоря, спорно. Не пояснено, что означает «сходимость задачи».

**Заключение о соответствии диссертации критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней.** Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертация отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. Тема диссертации и полученные результаты соответствуют паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (физико-математические науки).

Ялозо Андрея Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв подготовлен заместителем Главного конструктора ПАО «Ил» по аэродинамике, динамике полета и системе управления самолетом, кандидатом технических наук Кругляковой Ольгой Валентиновной.

Диссертационная работа Ялозо А.В. и данный отзыв обсуждены и одобрены на научном семинаре отдела аэродинамики ПАО «Авиационный комплекс им. С.В. Ильюшина» (протокол № 01 от 17.03.2020 г.).

Заместитель Главного конструктора ПАО «Ил»  
по аэродинамике, динамике полета  
и системе управления самолетом,  
кандидат технических наук

Круглякова Ольга Валентиновна

ПАО «Ил»

Адрес: 125190, г. Москва, Ленинградский пр., д. 45 "Г"

Телефон: +7 (499) 943-81-85

e-mail: KruglyakovaOV@ilyushin.org

Подпись О.В. Кругляковой заверяю.  
Директор по персоналу ПАО «Ил»

Алферова Е.В.



23.03.2020 г.

**Сведения об организации:** Публичное акционерное общество «Авиационный комплекс им. С.В. Ильюшина» (ПАО «Ил»); 125190, Российская Федерация, город Москва, Ленинградский проспект, дом 45 "Г"; Телефон: +7 (495) 000-00-10; Электронная почта: info@ilyushin.org.