

## Применение отечественных суперкомпьютерных технологий для создания перспективных образцов авиационной техники

А. В. Корнев<sup>1\*</sup>, А. С. Козелков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество «Авиационная холдинговая компания «Сухой», г. Москва, Российская Федерация

125284, Российская Федерация, г. Москва, ул. Поликарпова, д. 23 Б

\* avkorn@okb.sukhoi.org

<sup>2</sup> ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров, Нижегородская область, Российская Федерация

607188, Российская Федерация, Нижегородская область, г. Саров, пр. Мира, д. 37

### Аннотация

В статье рассматриваются вопросы, связанные с внедрением отечественных суперкомпьютерных технологий в авиастроительную отрасль Российской Федерации. Представлены основные средства государственной поддержки по разработке и внедрения отечественных суперкомпьютерных технологий в организации промышленности. Рассматриваются актуальные вопросы применения отечественных пакетов программных продуктов инженерного анализа Логос, SimInTech и Euler в задачах виртуальных испытаний. Представлены результаты решения типовых промышленно-ориентированных задач авиастроения с помощью отечественного программного обеспечения имитационного моделирования. Приведены примеры успешно решенных задач сокращения и замены натуральных испытаний виртуальными в области аэродинамики, гидродинамики, теплопроводности, прочности. Обозначены главные тенденции развития отечественных суперкомпьютерных технологий с учетом перехода на создание цифровых двойников изделий и агрегатов. Особое внимание уделяется вопросам методических подходов и проблемам разработки новых нормативных документов регламентирующих создание компьютерных моделей их валидации и применения. Представлена концепция проведения виртуальных испытаний в интересах проверки конструктивно-компоновочных решений, принимаемых для достижения оптимальных технико-экономических показателей и для подтверждения выполнимости требований. Описан инструмент для проведения верификации и валидации программного обеспечения имитационного моделирования на основе типовых тестовых задач по газодинамике, аэродинамике, акустике, тепловому анализу, прочности, мультидисциплинарному анализу, оптимизации и генерации дискретных пространственных моделей.

**Ключевые слова:** суперкомпьютерные технологии, виртуальные испытания, Логос, SimInTech, Euler, аэродинамика, гидродинамика, прочность, многодисциплинарность, цифровой двойник

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Для цитирования:** Корнев, А. В. Применение отечественных суперкомпьютерных технологий для создания перспективных образцов авиационной техники / А. В. Корнев, А. С. Козелков. – DOI 10.25559/SITITO.17.202102.250-264 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2021. – Т. 17, № 2. — С. 250-264.

© Корнев А. В., Козелков А. С., 2021



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



## Application of Domestic Supercomputer Technologies for the Development of Promising Models of Aviation Equipment

A. V. Kornev<sup>a\*</sup>, A. S. Kozelkov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> JSC "Aviation Holding Company "Sukhoi", Moscow, Russian Federation

23B Polikarpov St., Moscow 125284, Russian Federation

\* avkorn@okb.sukhoi.org

<sup>b</sup> Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region, Russian Federation

37 Mira Ave., Sarov 607188, Nizhny Novgorod region, Russian Federation

### Abstract

The article discusses issues related to the introduction of domestic supercomputer technologies in the Russian aircraft. The main means of State support for the development and introduction of domestic supercomputer technologies in industrial organization are presented. Topical issues of application of domestic software packages of engineering analysis Logos, SimInTech and Euler in virtual testing tasks are considered. The results of solving typical industrial-oriented aircraft engineering problems by means of domestic simulation software are presented. Examples are given of successfully solved problems of reduction and replacement of full-scale tests with virtual ones in the field of aerodynamics, hydrodynamics, heat conductivity and durability. The main trends in the development of domestic supercomputer technologies are outlined, taking into account the transition to the creation of digital duplicates of products and aggregates. Particular attention is paid to the issues of methodological approaches and the development of new regulations governing the creation of computer models for their validation and application. The concept of virtual testing is presented in order to verify design and layout decisions taken to achieve optimum technical and economic performance and to confirm the feasibility of requirements. A description is given of a tool for verifying and validating simulation software on the basis of typical test problems for gas dynamics, aerodynamics, acoustics, heat analysis, strength, multidisciplinary analysis, optimization and generation of discrete spatial models.

**Keywords:** supercomputer technology, virtual tests, Logos, SimInTech, Euler, aerodynamics, hydrodynamics, strength, multidisciplinary, digital twin

*The authors declare no conflict of interest.*

**For citation:** Kornev A.V., Kozelkov A.S. Application of Domestic Supercomputer Technologies for the Development of Promising Models of Aviation Equipment. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2021; 17(2):250-264. DOI: <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202102.250-264>



## Введение

За последние десятилетия в отечественной авиастроительной отрасли произошли значительные изменения, связанные с процессом проектирования и разработки новой авиационной техники. Одним из ключевых компонентов данного процесса стал переход к новой технологии проектирования, основанной на всеобъемлющем использовании современных средств вычислительной техники и кардинального увеличения объема методов математического, имитационного и суперкомпьютерного моделирования.

Внедрение в процесс проектирования методов моделирования возможно практически на всех его этапах, что в конечном итоге позволяет математическими методами обосновать не только оптимальные технико-экономические характеристики, но и принципиально улучшить потребительские свойства продукции авиационной промышленности. Кроме того, внедрение методов моделирования позволяет существенно сократить сроки и стоимость разработки изделий, а невозможность проведения в ряде случаев натурных испытаний в необходимом объеме, делает такой подход еще более актуальным [1-3]. В этих условиях, суперкомпьютерные технологии, по существу, становятся одним из важнейших компонентов процесса проектирования наукоемких изделий авиационной техники, обеспечивающим по сравнению с экспериментом формирование рациональной конструкции при меньших затратах времени и средств с одновременным повышением полноты и достоверности выполняемых оценок.

В настоящее время в РФ на государственном уровне осуществляется поддержка внедрения суперкомпьютерных технологий на предприятия высокотехнологичных отраслей промышленности на основании перечня поручений Президента Российской Федерации; протокола совещания у Председателя Правительства Российской Федерации «О российских информационных и суперкомпьютерных технологиях» от 19.02.2016; поручения Правительства Российской Федерации от 09 июня 2017 г. «О разработке высокотехнологичных и перспективных изделий ВВСТ только с применением современных технологий компьютерного проектирования, электронного математического моделирования»; указа Президента РФ от 07.05.2018 г. «О национальных целях и стратегических задачах развития РФ на период до 2024 года»; постановление Правительства РФ от 20.06.2018 г. «Об утверждении Правил предоставления субсидий из федерального бюджета организациям оборонно-промышленного комплекса на возмещение затрат, связанных с высокопроизводительными вычислениями, включая суперкомпьютерные технологии в интересах создания вооружений, военной и специальной техники».

В настоящей статье приводятся результаты работы по внедрению отечественных суперкомпьютерных технологий в авиастроительную отрасль РФ за более чем десятилетний период. Представлено описание промышленно-ориентированных задач, решение которых без высокопроизводительных вычислений было бы практически невозможно. Представлено описание отечественного пакета программ Логос, а также предлагаемый подход внедрения суперкомпьютерных технологий с соблюдением всех нормативных требований.

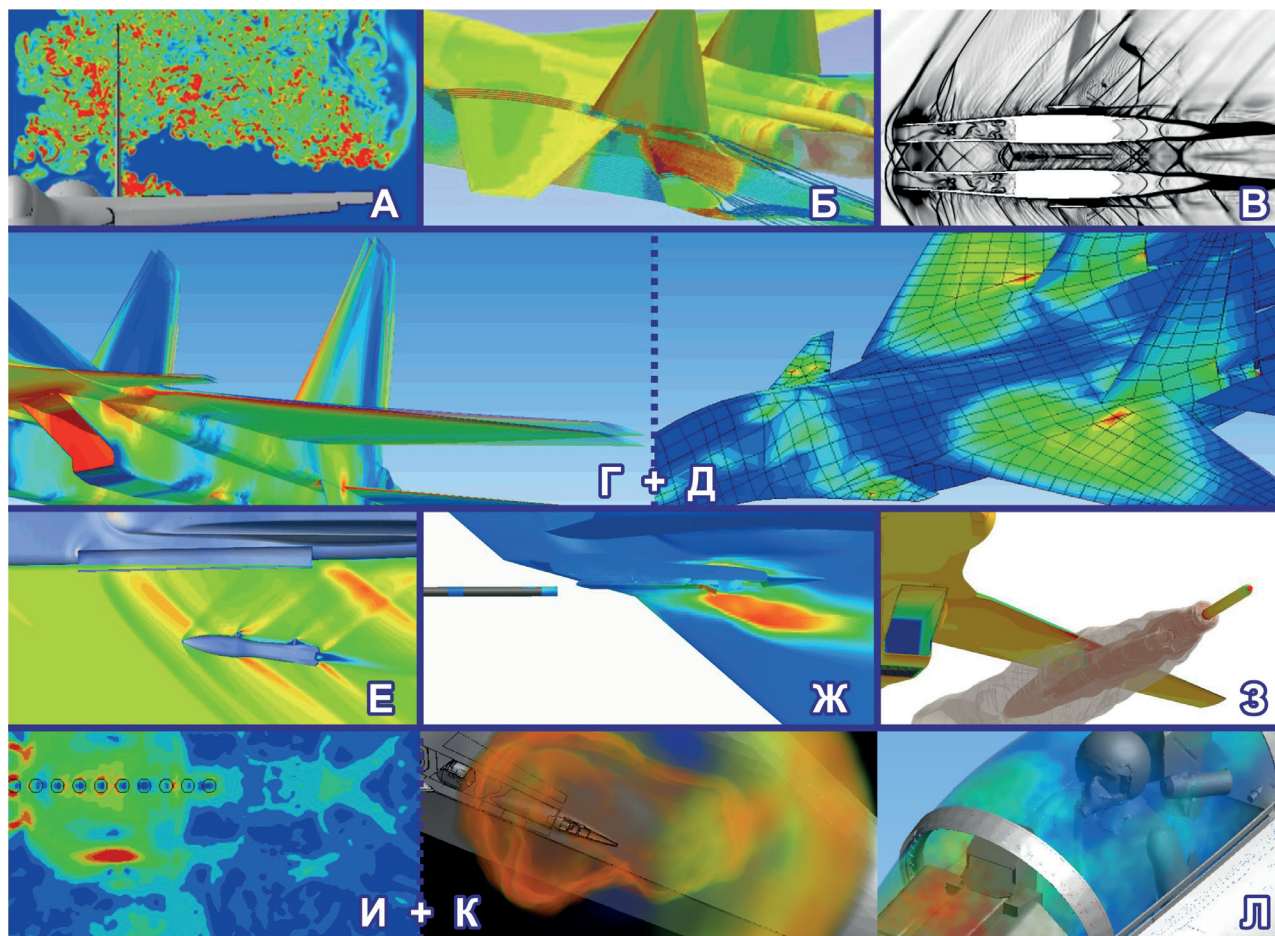
## Применение пакета программ Логос

Пакет программ Логос — отечественный пакет программ инженерного анализа, предназначенный для решения сопряженных трехмерных задач конвективного теплопереноса, аэродинамики, гидродинамики и прочности на параллельных ЭВМ. Пакет программ Логос состоит из двух ключевых модулей — Логос-ТМП (теплоперенос) и Логос-Прочность. Модуль Логос-ТМП позволяет рассчитывать течения вязкого сжимаемого и несжимаемого газа с учетом турбулентности с использованием всех современных подходов [4-6]. Данный модуль успешно прошел верификацию [7, 8] и показал достаточно хорошие результаты на серии различных гидродинамических задач, включая промышленные и фундаментальные [1-3], [9-11]. Модуль Логос-Прочность позволяет моделировать процессы статического и динамического упругопластического деформирования, газодинамики, разрушения, контактного взаимодействия, теплопроводности, кинематики, анализа частот и форм колебаний [12].

Пакет программ Логос позволяет проводить расчеты в высокопараллельном режиме с использованием нескольких десятков тысяч процессоров со средней эффективностью распараллеливания вычислений не менее 75% [6]. Это в несколько сотен раз ускоряет время проведения отдельного расчета и расширяет возможности проведения многовариантных расчетов. На стадии промышленной эксплуатации в ОКБ Сухого находятся высокоточные 3D методы, реализованные в пакете программ Логос и решаются следующие классы задач (рисунок 1):

- моделирование разномасштабных нестационарных вихревых структур и отрывных/присоединенных течений для всего летального аппарата (ЛА) (рисунок 1 — А) с учетом законов отклонения органов управления (рисунок 1 — Б) и работы силовой установки (рисунок 1 — В) при околозвуковых, до-, транс- и сверхзвуковых скоростях полета;
- определение нагрузок на ЛА и его агрегаты с учетом эффектов статической и динамической аэроупругости полета (рисунок 1 — Г+Д);
- решение задач безопасного отделения авиационных средств поражения (АСП) от носителя с учетом динамики пусковых и катапультных устройств, интерференции, аэроакустики (рисунок 1 — Е), теплового, эрозионного, абляционного и газодинамического воздействия на планер (химическая кинетика горения твердых топлив разгонных РДТТ) (рисунок 1 — Ж), а также устойчивости работы силовой установки (рисунок 1 — З);
- анализ ресурса конструкции, в том числе выполненной из полимерных композиционных материалов (ПКМ), при многократном импульсном воздействии выстрелов авиационной пушечной установки (рисунок 1 — И+К);
- связанный теплообмен с учетом влажности и образования/разрушения ледяных наростов/пленок (кинетический нагрев от скоростного напора, теплопроводность в многослойных конструкциях, конвекция в кабине или отсеке оборудования) (рисунок 1 — Л).





Р и с. 1. Набор технологий суперкомпьютерного численного моделирования ЛА в различных эксплуатационных ситуациях  
Fig. 1. Lethal Vehicle supercomputer numerical simulation suite in various operating situations

Такие модели позволяют исследовать фрагменты эксплуатационных ситуаций в диапазоне от  $10^{-9}$  до  $10^2$  секунд физического времени, при этом время расчета варьируется от нескольких часов до недель. Эффективность применения суперкомпьютерных моделей зависит от располагаемых вычислительных мощностей. Сегодня для решения необходимого спектра задач проектирования и проведения виртуальных испытаний ЛА предпочтительным уровнем производительности супер-ЭВМ являются сотни и тысячи Тфлоп/с.

### Виртуальная модель функционирования

Совершенствование вычислительных технологий идет по пути перехода от анализа отдельных конструктивных элементов к всеобъемлющему трехмерному анализу поведения комплекса в целом. Достижения в вычислительных методах позволяют уйти от расчета обособленных частей и включить в рассмотрение смежные дисциплины, а также специфические особенности, которые влияют на эффективность работы изделий в целом. В настоящее время методы численного моделирования задач аэродинамики широко применяются при разра-

ботке и оптимизации ЛА и элементов его конструкции [1-3], [10], [15]. Однако возникают задачи, решение которых с использованием только методов классической аэродинамики не позволяет учесть все особенности протекающих процессов, например, изменение аэродинамики упругого ЛА [21-25]. При решении связанных задач, таких как аэродинамика и прочности, важным этапом является корректная постановка задачи для двух и более независимых расчетных программ. Для повышения удобства постановки необходимо использовать пользовательский интерфейс, который существенно сократит как время создания связанных задач, так и количество ошибок, и помимо этого повысит эргономику продукта в целом. Поэтому одной из ключевых задач является разработка в составе Логос интеграционного модуля, объединяющего расчетные модели отдельных элементов систем маневренного самолета в единую систему функционирования ЛА в соответствии со сценарием и отвечающим фрагменту полетного задания. В настоящее время ОКБ Сухого активно переходит к применению полномасштабных математических моделей динамики движения ЛА и функционирования совокупности самолетных систем для описания поведения всех элементов при выполне-



нии полного профиля полетного задания. Построение и использование таких моделей осуществляется в отечественных пакетах программ одномерного анализа SimInTech<sup>1</sup> [13] и в среде моделирования динамических многокомпонентных механических систем Euler<sup>2</sup> [14].

На рисунке 2 показаны примеры таких функциональных моделей, где:

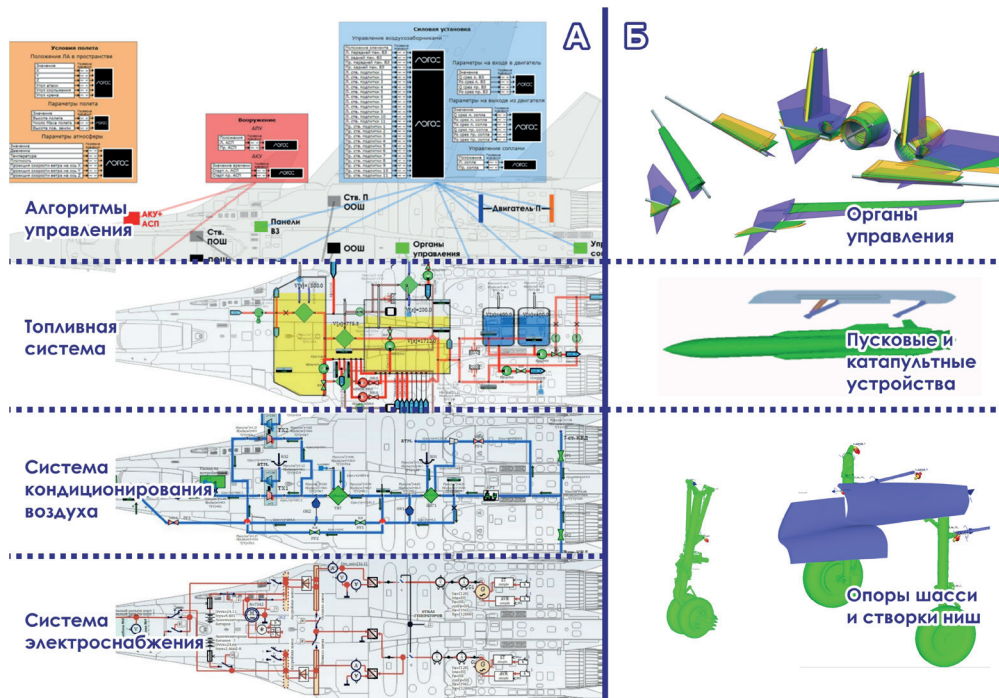
- группа А — совокупность увязанных алгоритмами управления математических моделей самолетных систем (алгоритмы управления полетом, алгоритмы работы топливной, гидравлической системой самолета и системой кондиционирования воздуха, а также алгоритмы работы системы электроснабжения);
- группа Б — набор динамических моделей органов управления и механических систем (органы управления полетом, пусковые и катапультные устройства, алгоритмы работы шасси и створки ниш).

Применение таких моделей для решения одиночных расчет-

ных случаев не требует супер-ЭВМ: решение задачи осуществляется в скалярном режиме в течение нескольких часов, однако при массивном расчете нескольких (десятки и сотни) профилей полета применяется распараллеливание на уровне отдельных подзадач. Данные функциональные модели позволяют решать следующие задачи:

- сбалансированная увязка всех систем и их компонентов;
- анализ требований к составным частям;
- определение допустимого и достигаемого уровня характеристик элементов и систем;
- определение показателей надежности;
- оценка причин и последствий единичных и групповых отказов элементов.

Каждая из групп математических моделей обладает рядом недостатков. Для группы высокоточных математических моделей требуется набор начальных и граничных условий, определение которых осложнено отсутствием информации о предельной истории исследуемого события.



Р и с. 2. Примеры полномасштабных математических моделей динамики движения ЛА и функционирования совокупности самолетных систем

Fig. 2. Examples of full-scale mathematical models of aircraft motion dynamics and the functioning of aircraft systems

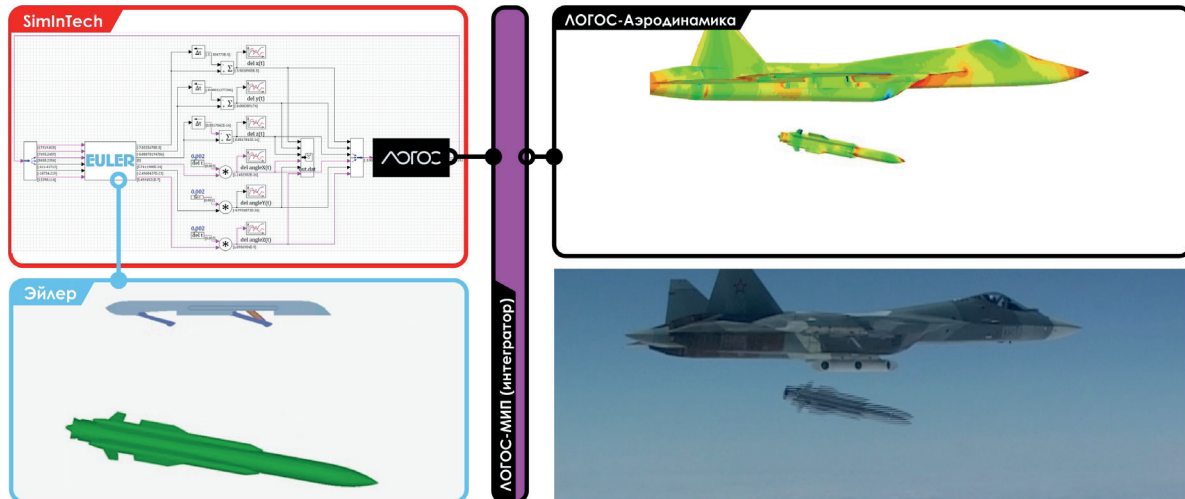
Группа функциональных моделей описывает упрощенно быстропотекающие переходные процессы и не учитывает сложные конструктивные и эксплуатационные особенности элементов систем. Одним из наиболее рациональных способов минимизации недостатков обеих групп моделей является их объединение или связывание. На рисунке 3 представлен механизм передачи начальных и граничных условий высоко-

точным моделям от функциональных моделей на примере задачи об отделении авиационного средства поражения. В итоге, функциональные модели входят в состав так называемой общей «суррогатной модели» функционирования ЛА (рисунок 4), в которой используются характеристики переходных процессов, полученные на основе применения трехмерного высокоточного моделирования.

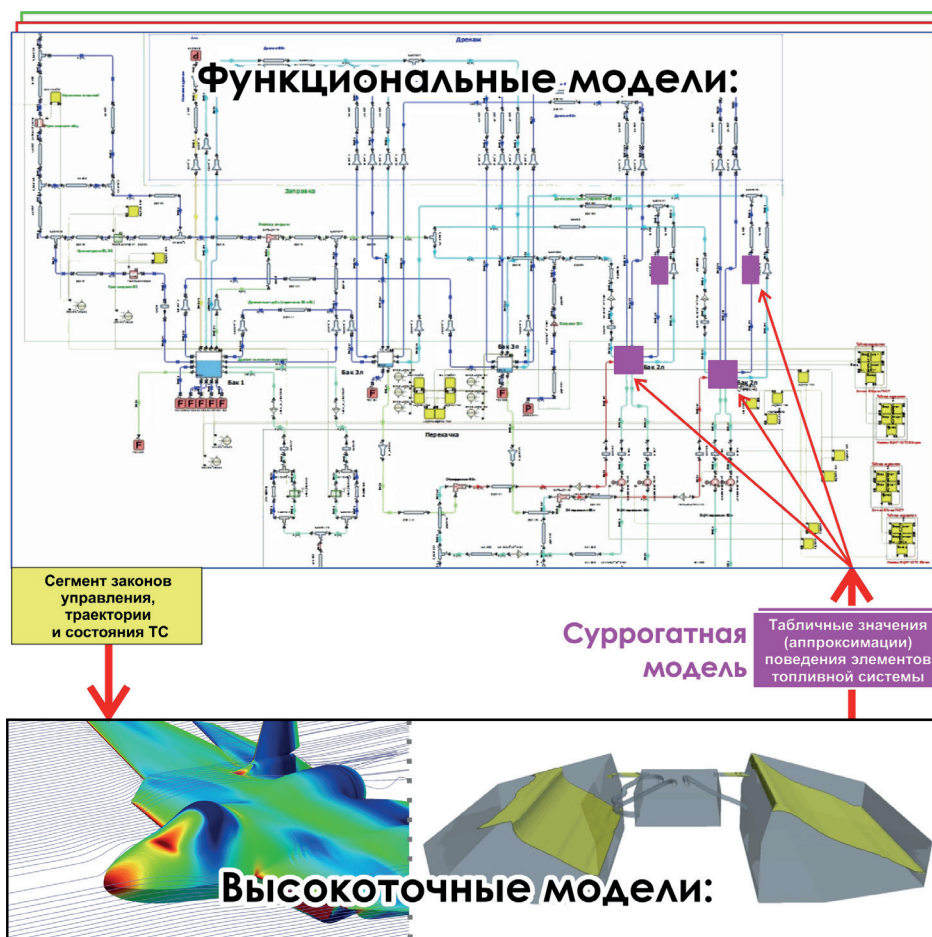
<sup>1</sup> Среда динамического моделирования SimInTech : офиц. сайт [Электронный ресурс]. 2021. URL: <https://simintech.ru> (дата обращения: 18.04.2021).

<sup>2</sup> Программный комплекс EULER : офиц. сайт [Электронный ресурс]. 2021. URL: <http://www.euler.ru> (дата обращения: 18.04.2021).





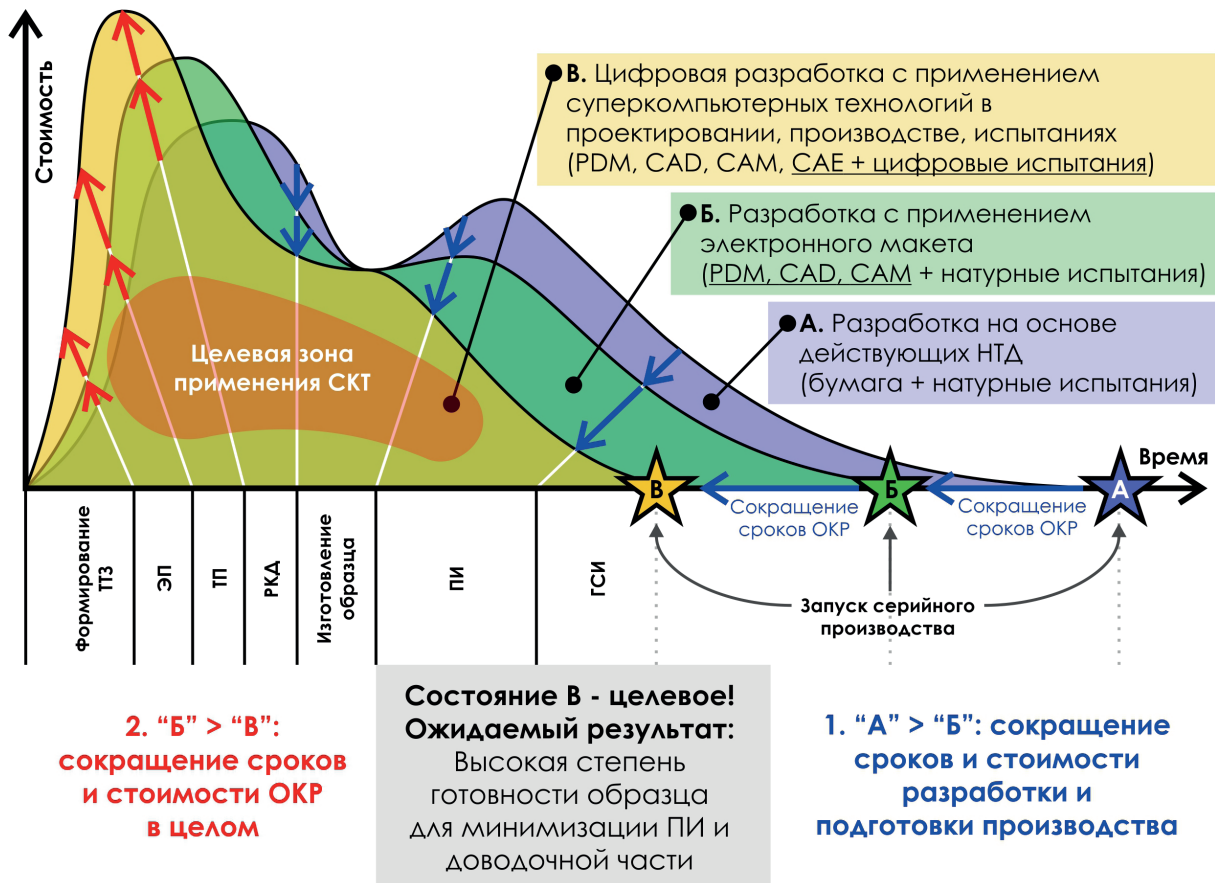
Р и с. 3. Пример обеспечения высокоточных трехмерных моделей начальными и граничными условиями от функциональных моделей  
F i g. 3. An example of providing high-precision three-dimensional models with initial and boundary conditions from functional models



Р и с. 4. Пример построения суррогатной модели сложного переходного процесса для уточнения поведения компонентов функциональной модели  
F i g. 4. An example of building a surrogate model of a complex transient process to clarify the behavior of the components of a functional model

Выполнив обобщение разномасштабных по времени и физическим процессам математических моделей, обеспечив их взаимодействие различными принципами связывания (многодисциплинарность), формируется комплекс математических моделей, или виртуальная модель функционирования (ВМФ) — как прототип функционального цифрового двойника (ФЦД). ВМФ до появления первых опытных образцов дает первичное представление о поведении проектируемого изделия, которое уточняется, начиная со стендовых, наземных и летных испытаний. Таким образом, функциональный цифровой

двойник изделия — это виртуальная модель функционирования, прошедшая валидацию (подтверждение достоверности) на выполненных натурных испытаниях [16], [18], [19]. Совокупный ожидаемый эффект от применения ВМФ и ФЦД — сокращение всего цикла ОКР по срокам на 10-20% (рисунок 5) за счет синергии: высокой готовности первых образцов к испытаниям, сокращению предварительных испытаний (ПИ) и последующего снижения объема государственных совместных испытаний (ГСИ).



Р и с. 5. Трансформация графика разработки авиационной техники при применении виртуальной модели функционирования и функциональных цифровых двойников

Fig. 5. Transformation of the aircraft development schedule when using a virtual model of operation and functional digital twins

Формирование ВМФ описанным выше способом преследует решение следующих задач:

1. Качественная проверка конструктивно-компоновочных решений, принимаемых для достижения сбалансированных технико-экономических показателей проекта.
2. Проведение виртуальных испытаний для подтверждения выполнимости будущих натурных работ, повышения зачетности, формирования сбалансированной программы предварительных и государственных испытаний, включая обоснование ее сокращения.
3. Расчетное сопровождение стендов при их проектировании и проведении испытаний.

## Разработка регламента проведения виртуальных испытаний

Уровень развития программного обеспечения компьютерного моделирования уже сегодня позволяет получать результаты виртуальных испытаний [1-3], [6-8], не уступающие результатам натурных испытаний по достоверности, и даже превосходящие их по своей полноте. Следующим закономерным шагом можно считать внедрение виртуальных испытаний в качестве обязательного этапа проектирования изделий, предшествующего натурному эксперименту, а в отдельных случаях его частичной или полной замены. В тоже время, система норма-

тивных требований в области испытаний остаётся на уровне 80-х — 90-х гг. Примером этого являются государственные военные стандарты, которые не содержат норм и определили бы правила проведения и применения результатов виртуальных испытаний при проектировании, создании и испытаний опытных образцов изделий.

С учетом отсутствия нормативных требований к процессам проведения виртуальных испытаний, необходимо провести разработку документов по стандартизации по следующим направлениям:

- классификация компьютерных моделей (КМ);
- технические требования к видам КМ;
- порядок проведения виртуальных испытаний с КМ, порядок сопоставления результатов виртуальных и физических экспериментов;
- порядок валидации КМ и документирования результатов валидации (удостоверяющие документы, подтверждающие возможность и область применения моделей);
- задание требований к КМ и экспериментам с ними в технических заданиях на ОКР (опытно-конструкторские работы).

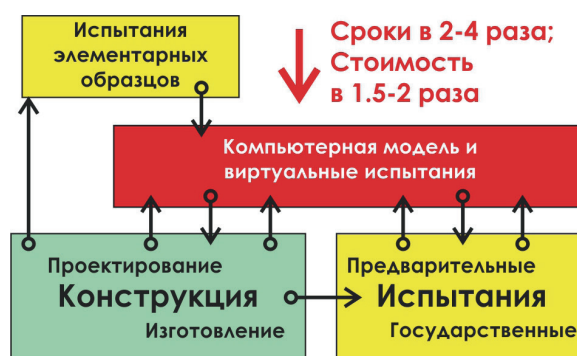
Представленные здесь задачи нормативного регулирования могут быть реализованы, через соответствующее развитие нормативно-правовой базы государства и национальных и государственных военных стандартов<sup>3</sup>. В настоящее время проводится согласование новой редакции «Положения о создании авиационной техники военного назначения и авиационной техники специального назначения», в которой учтены предложения ПАО «ОАК» и ПАО «Компания «Сухой» по порядку создания, валидации и применения комплексов математического моделирования. Следующий шаг — внесение гармонизированных изменений в государственные военные стандарты, а также в ОТТ ВВС и РИАТ по регламенту проведения виртуальных испытаний, и одновременно, разработка техническим комитетом №700 при Минпромторге РФ специальных стандартов по математическому моделированию.

Наиболее перспективным путем модификации ОТТ ВВС в части использования виртуальных испытаний для проведения оценок технических характеристик авиационной техники военного назначения (АТ ВН), является внесение изменений и формулировка правил, разработанных ранее и уже доказанных с помощью достоверных математических моделей относительно ранее проведенных натурных или экспериментальных работ. Такая работа, по разработке последовательных и обоснованных предложений по внесению изменений в ОТТ ВВС (РИАТ) для разрабатываемых в ОКБ Сухого перспективных изделий, уже ведется на базе успешно проведенных ПИ и ГСИ самолета Су-35. Начиная с 2021 г. и до конца 2022 года ожидается последовательное изменение РИАТ и формирование набора эталонных математических моделей для доказательного сокращения/замены отдельных видов испытаний перспективных ЛА.

<sup>3</sup> О стандартизации в Российской Федерации: федер. закон от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ [Электронный ресурс]. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_181810](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_181810) (дата обращения: 18.04.2021); О порядке стандартизации в отношении оборонной продукции (товаров, работ, услуг) по государственному оборонному заказу, продукции, используемой в целях защиты сведений, составляющих государственную тайну или относимых к охраняемой в соответствии с законодательством Российской Федерации иной информации ограниченного доступа, продукции, сведения о которой составляют государственную тайну, а также процессов и иных объектов стандартизации, связанных с такой продукцией (с изменениями и дополнениями на 25 ноября 2020 года) : Постановление Правительства РФ от 30 декабря 2016 г. № 1567 [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/71582798> (дата обращения: 18.04.2021).

Помимо перечисленных мероприятий ПАО «Компания «Сухой» ведет разработку внутренних стандартов, регламентирующих создание и применение математических моделей в практической деятельности. Стандарты опираются на два основных варианта использования компьютерных моделей для виртуальных испытаний.

Первый основан на валидации физико-математических моделей на испытаниях элементарных образцов (см. рисунок 6) и формировании компьютерной модели проектируемого изделия на основе набора достоверных моделей. Полученная таким образом компьютерная модель позволяет до начала проведения натурных испытаний выполнить виртуальные и, в случае обнаружения ошибок в конструкции, оперативно сформировать предложения по доработке конструкции, тем самым повышая готовность конструкции к натурным испытаниям и снижая цикличность проектирование-испытания-доработка.



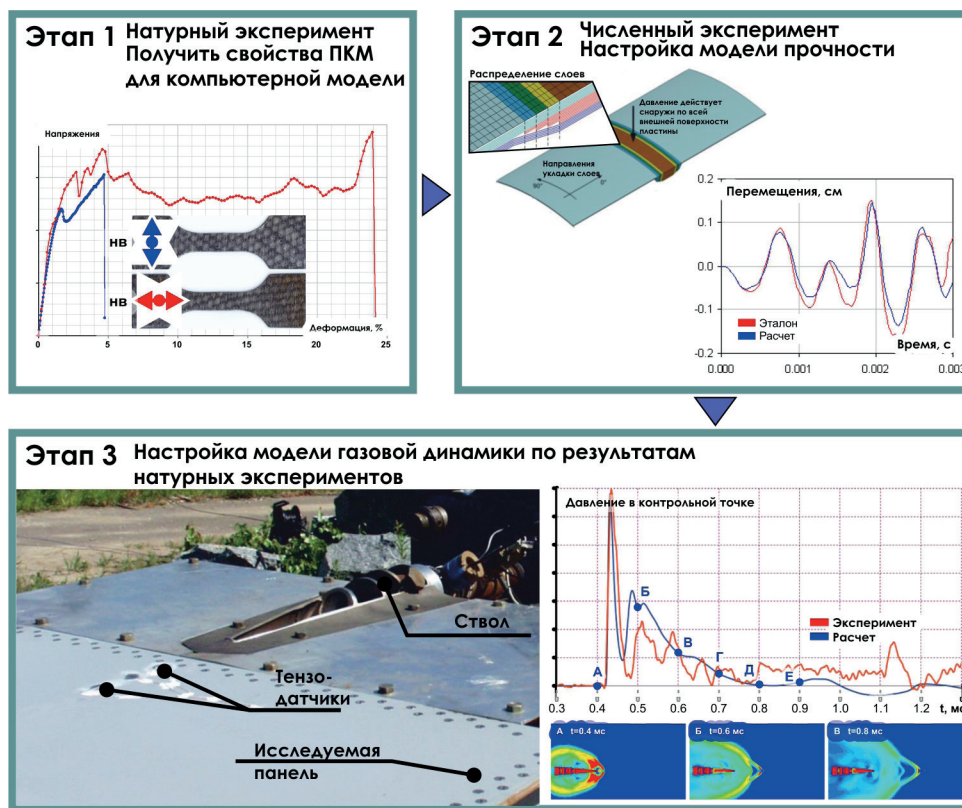
Р и с. 6. Первый способ использования компьютерных моделей для виртуальных испытаний

Fig. 6. The first way to use computer models for virtual tests

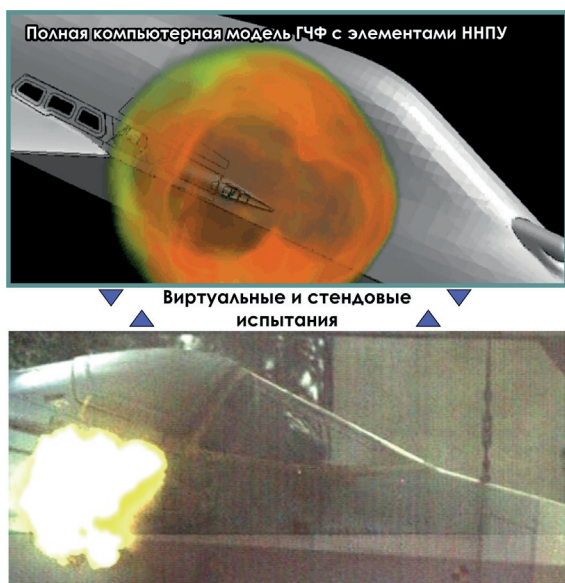
Метод прошел проверку при проектировании Су-57 на стенде пушечной установки. Была выполнена работа по экспериментальной отработке элементарных и конструктивно-подобных образцов для валидации отдельных физико-математических моделей ресурса слоистых полимерных композиционных материалов и газодинамического воздействия при интенсивном импульсном нагружении конструкции (рисунок 7). Построив полную компьютерную модель головной части фюзеляжа (рисунок 8) и выполнив всесторонние расчетные исследования, удалось выявить наиболее критичные зоны в конструкции и внести изменения, что сократило цикл стендовых отработок и позволило приблизиться к летным испытаниям пушечной установки на борту ЛА. Параллельно комплексная модель дала возможность оценить эффективность продува отсека пушечной установки, организовать отвод пороховых газов, снизить вероятность их детонации при стрельбе различными очередями, доказать безопасность отвода стрелянных гильз, обосновать достаточность объемов звеньесборника путем оценки порядка его заполнения.





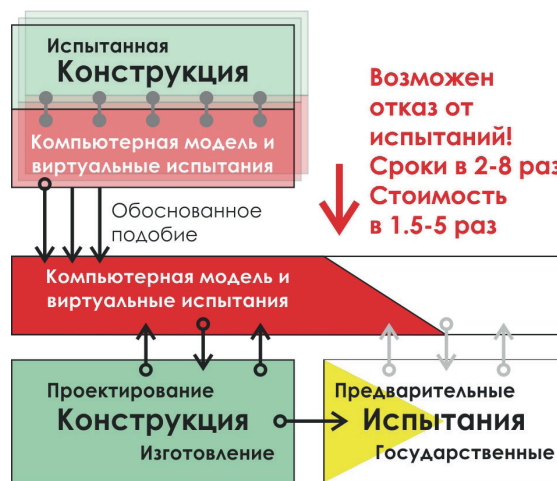


Р и с. 7. Валидация компьютерных моделей для оценки ресурса ПКМ и газодинамического воздействия пушечной установки  
F i g. 7. Validation of computer models for evaluating the resource and gas-dynamic impact of a gun mount



Р и с. 8. Компьютерная модель головной части фюзеляжа с элементами пушечной установки (верхняя часть рисунка — виртуальные испытания, нижняя часть рисунка — стендовые испытания)  
F i g. 8. Computer model of the head part of the fuselage with elements of the gun mount (upper part of the figure - virtual tests, lower part of the figure - bench tests)

Второй способ основан на применении компьютерной модели ранее испытанной схожей конструкции (рисунок 9).



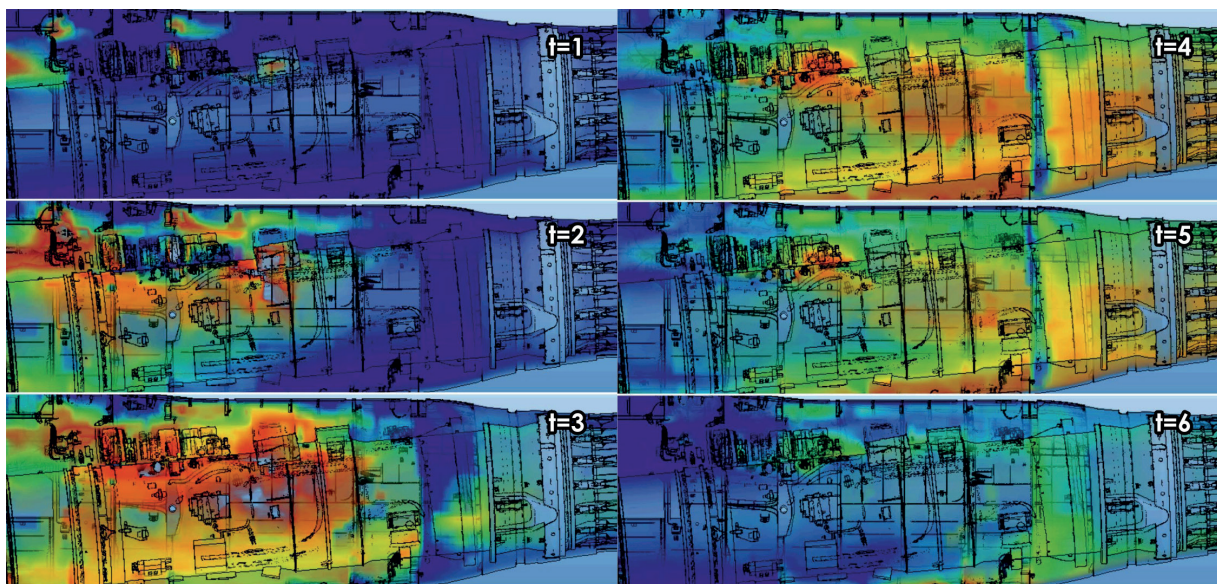
Р и с. 9. Второй способ использования компьютерных моделей для виртуальных испытаний  
F i g. 9. The second way to use computer models for virtual tests

Примером применения второго способа использования компьютерных моделей является результат выполнения НИР

«Охотник-Б» (совместно ПАО «Компания «Сухой» и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ») в рамках которой на базе отечественного программного продукта инженерного анализа Логос была разработана методика расчета системы пожаротушения для подтверждения требований по допустимым концентрациям огнегасящей смеси при срабатывании огнетушителей. Были разработаны эталонные компьютерные модели, прошедшие валидацию на базе ранее проведенных стендовых и летных испытаний самолетов Су-35 и Су-57. В результате были разработаны подробные компьютерные модели системы пожаротушения и отсеков силовой установки: гидравлическая часть содержит полные 3D модели огнетушителей, системы разветвлённых трубопроводов с коллекторами и форсунками (более 500 форсунок); газодинамическая модель (~50 млн. ячеек) основана на детализированных геометрических обводах исследуемого отсека со всеми конструктивно-компоновочными особенностями, включая воздухозаборный тракт, двигатель с

обвязкой и эжекторной частью сопла. Условия продува воздухом отсека моделировались без упрощения с учетом обтекания ЛА на различных этапах полета. Выполненные расчетные исследования убедительно доказали достаточность системы пожаротушения по заданному в РИАТ времени выдерживания минимальной концентрации огнегасящей смеси в защищаемом объеме (см. рисунок 10). Полученные результаты могут стать одним из прецедентов внесения изменений в ОТТ ВСС (РИАТ) в части условий применения виртуальных испытаний для подтверждения эффективности бортовых систем пожаротушения.

По предварительным оценкам ожидаемый результат применения виртуальных испытаний — сокращение отдельных видов испытаний на 20-40%. Например, для группы испытаний типовой программы ПИ и ГСИ, состоящей из 300 полетов возможно сокращение на 60-120 полетов.



Р и с. 10. Результаты расчета распространения огнегасящей смеси в отсеке силовой установки

F i g. 10. The results of the calculation of the spread of the fire-extinguishing mixture in the compartment of the power plant

## Текущие проблемы внедрения суперкомпьютерных технологий

Для разработки и применения комплексных компьютерных моделей (виртуальных моделей функционирования) в использовании виртуальных испытаний при проведении оценок технических характеристик АТ ВН необходимо решить в комплексе ряд следующих задач:

1. Оснащение вычислительными ресурсами.
2. Разработка и применение интегральной среды ВМФ.
3. Развитие нормативной документации в части применения математического моделирования.

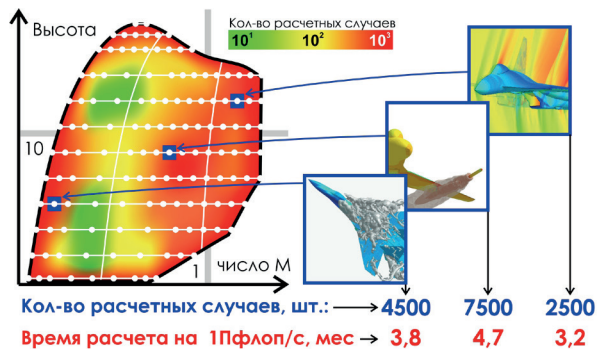
Предложения по развитию нормативной документации в части применения математического моделирования описаны выше. Здесь остановимся на проблемах оснащения предприятий и КБ авиастроительной отрасли РФ (данные рассуждения справедливы и для других отраслей), внедряющих матема-

тическое моделирование в процесс проектирования изделий, вычислительными ресурсами для создания виртуальных моделей функционирования и цифровых двойников.

Современные средства определения стационарных и нестационарных аэродинамических характеристик ЛА и нагрузок на него с учетом отклонения органов управления, работы силовой установки, расположения грузов в транспортном положении и при их отделении, аэроупругости — это гибридные URANS+LES физико-математические модели [4-6], [10], описывающие разномасштабные вихревые структуры, пространственные отрывные течения и системы взаимодействующих скачков уплотнения. Оценка потребных вычислительных ресурсов для определения всего спектра аэродинамических характеристик (АДХ) с учетом перечисленных выше особенностей во всей области углов атаки и скольжения, высот, скоростей и перегрузок представлена на рисунке 11, где показано, что, супер-ЭВМ производительностью 1 Пфлоп/с (1000 Тфлоп/с) менее чем за



12 месяцев позволяет выполнить все необходимые расчеты. Соответственно, применив 10 Пфлоп/с супер-ЭВМ время расчета сокращается до уровня 2-3 месяцев с учетом времени на автоматизированную обработку результатов. Применение высокоточных моделей процессов горения и тушения пожара еще более ресурсоемки, на один — два порядка.



Р и с. 11. Объем вычислительных ресурсов, необходимый для оценки АДХ ЛА во всем эксплуатационном диапазоне

Fig. 11. The amount of computing resources required to assess the aerodynamic characteristics of the aircraft in the entire operational range

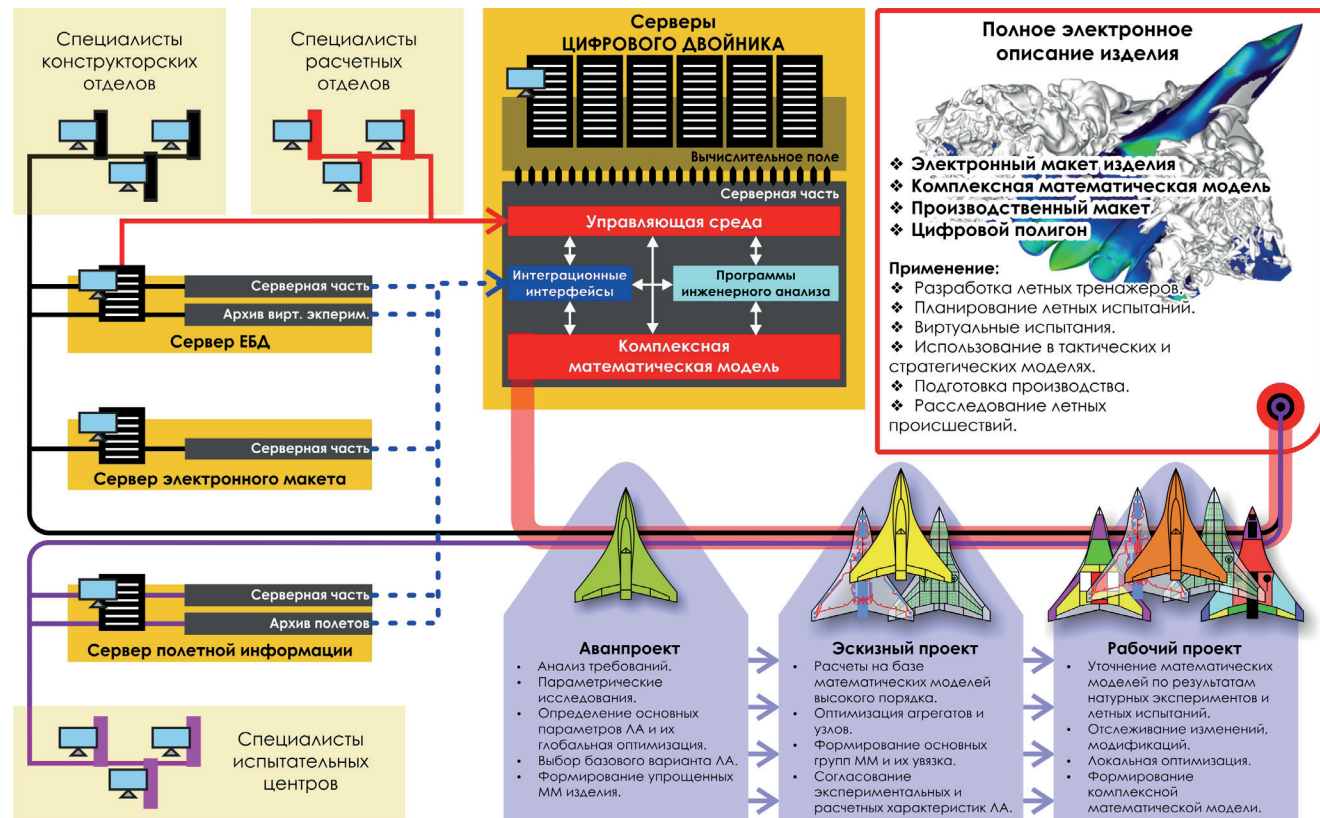
Помимо вычислительных ресурсов, ключевой составляющей внедрения виртуальных моделей функционирования в про-

цесс проектирования авиационных изделий, является, собственно, среда, в которой эти модели создаются.

Более чем 10-летнее практическое использование средств управления данными об электронной конструкторской документации (PDM) дало положительный эффект. Сегодня ОКБ Сухого ориентируется на применение отечественной PDM T-FLEX DOCs. Следующий шаг развития — SPDM системы, обеспечивающие включение инженеров-расчетчиков и инженеров-экспериментаторов в информационный обмен с конструкторами и технологами (рисунк 12), это позволит:

- инженерам-расчетчикам обладать оперативными данными о состоянии и составе проектируемой конструкции;
- конструкторам получить актуальные данные о текущем состоянии конструкции для своевременного проведения ее анализа на эксплуатационные и поведенческие характеристики.

Отечественные разработчики выполняют работу по созданию подобных систем, однако промышленные образцы, способные эффективно оперировать десятками терабайт данных в сутки, отсутствуют [17], [20]. В ближайшие 2-3 года ожидается появление отечественного промышленного образца SPDM для применения на всех этапах разработки ВМФ в интересах авиационной промышленности. Прототип SPDM системы — единая база данных (ЕБД) разработана в 2020 г. специалистами ФГУП «РЯЦ-ВНИИ-ЭФ» и введена в промышленную эксплуатацию в ОКБ Сухого.



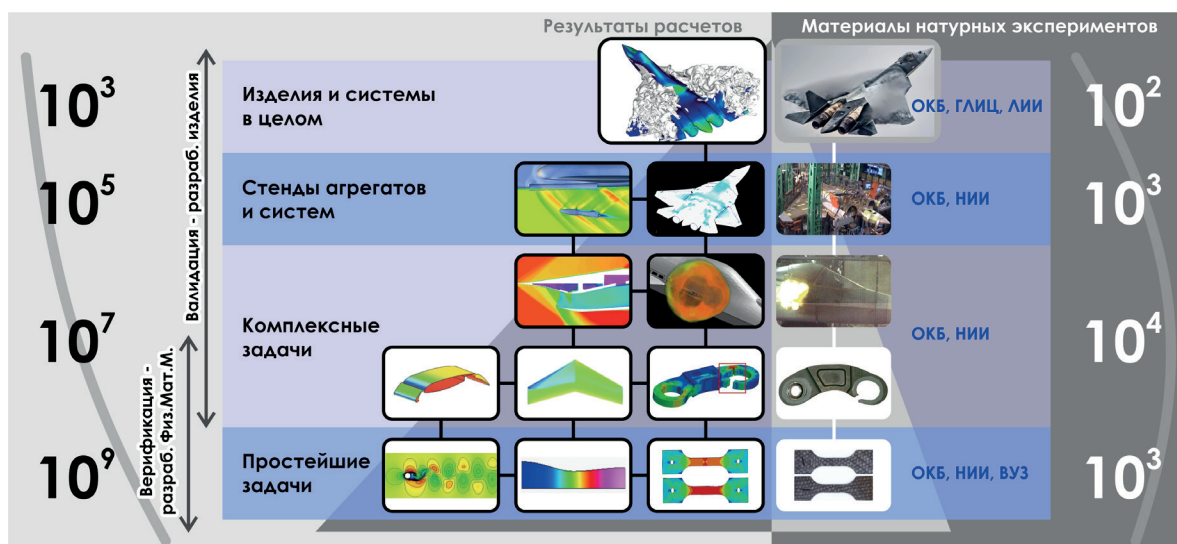
Р и с. 12. Инфраструктура разработки и применения цифровых двойников

Fig. 12. Infrastructure for the development and use of digital twins



Важнейшая функция, реализованная в ЕБД — структурированное хранение и повторное использование больших расчетных данных в совокупности с экспериментальными. Наполнение и применение ЕБД позволит унифицировано и оперативно управлять расчетно-экспериментальными данными (рисунок 13), выполнять верификацию физико-математических моделей, валидацию комплексных математических моделей, ВМФ и формировать достоверного функционального цифрового двойника. Расчетно-экспериментальные данные позволят объективно доказать применимость фЦД для сокращения/замены отдельных видов испытаний, демонстрируя уровень

достоверности математического моделирования в сравнении с ранее проведенными стендовыми и летными испытаниями, включая анализ критических и аварийных ситуаций. ЕБД представляет собой инструмент для проведения верификации и валидации программного обеспечения имитационного моделирования и формируется на основе типовых тестовых задач по газодинамике, аэродинамике, акустике, тепловому анализу, прочности, мультидисциплинарному анализу, оптимизации и генерации дискретных пространственных моделей. ЕБД представляет собой единый непротиворечивый коллективный источник информации.



Р и с. 13. Единая база данных верификации и валидации  
F i g. 13. Unified verification and validation database

## Заключение

В статье представлено описание текущей ситуации по внедрению отечественных суперкомпьютерных технологий в авиастроительную отрасль РФ. Представлены результаты решения типовых промышленно-ориентированных задач авиастроения с помощью отечественного программного обеспечения имитационного моделирования. Предложен подход внедрения суперкомпьютерных технологий в процесс проектирования изделий с изменением действующих нормативных требований. Представлена концепция проведения виртуальных испытаний в интересах проверки конструктивно-компоновочных решений, принимаемых для достижения оптимальных технико-экономических показателей и для подтверждения выполнимости требований.

## Список использованных источников

- [1] Внедрение суперкомпьютерных технологий в авиастроение России / М. А. Погосян, Е. П. Савельевских, Д. Ю. Стрелец [и др.] // *Авиационная промышленность*. — 2013. — № 2. — С. 3-9. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20607438> (дата обращения: 18.04.2021). — Рез. англ.
- [2] Использование отечественных суперкомпьютерных технологий при проектировании новых образцов авиационной техники / М. А. Погосян, Е. П. Савельевских, Д. Ю. Стрелец [и др.] // *Авиационная промышленность*. — 2013. — № 3. — С. 3-7. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21539388> (дата обращения: 18.04.2021). — Рез. англ.
- [3] Применение суперкомпьютерных технологий в российской авиационной промышленности / М. А. Погосян, Е. П. Савельевских [и др.] // *Международная энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение*; под ред. А. Г. Братухина. — М.: ОАО «НИЦ АСК», 2015. — С. 49-61.
- [4] Зонный RANS-LES-подход на основе алгебраической модели рейнольдсовых напряжений / А. С. Козелков, О. Л. Крутякова, А. А. Куркин, В. В. Курулин, Е. С. Тятюшкина // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. — 2015. — № 5. — С. 24-33. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24329699> (дата обращения: 18.04.2021). — Рез. англ.
- [5] Козелков, А. С. Численная схема для моделирования турбулентных течений несжимаемой жидкости с использованием вихреразрешающих подходов / А. С. Козелков, В. В. Курулин. — DOI 10.7868/S0044466915070091



- // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2015. — Т. 55, № 7. — С. 1255-1265. — Рез. англ.
- [6] Исследование потенциала суперкомпьютеров для масштабируемого численного моделирования задач гидродинамики в индустриальных приложениях / А. С. Козелков, В. В. Курулин, С. В. Лашкин [и др.]. — DOI 10.7868/S004446691608010X // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2016. — Т. 56, № 8. — С. 1524-1535. — Рез. англ.
- [7] Минимальный базис задач для валидации методов численного моделирования турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости / А. С. Козелков, Ю. Н. Дерюгин, Ю. А. Циберева [и др.] // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. — 2014. — № 4(106). — С. 21-69. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22835507> (дата обращения: 18.04.2021). — Рез. англ.
- [8] Минимальный базис задач валидации методов расчета течений со свободной поверхностью / А. С. Козелков, А. А. Куркин, И. Л. Шарипова [и др.] // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. — 2015. — № 2(109). — С. 49-69. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23894816> (дата обращения: 18.04.2021). — Рез. англ.
- [9] Simulation of Turbulent Convection at High Rayleigh Numbers / S. Dmitriev, A. Kozelkov, A. Kurkin [et al.]. — DOI 10.1155/2018/5781602 // Modelling and Simulation in Engineering. — 2018. — Vol. 2018. — Pp. 5781602.
- [10] Расчетные исследования аэродинамических характеристик сверхзвукового самолета на крейсерских режимах полета / А. С. Козелков, А. В. Корнев, А. Ю. Стрелец [и др.] // Полет. — 2017. — № 6. — С. 17-21. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29847276> (дата обращения: 18.04.2021). — Рез. англ.
- [11] Mathematical simulation of hydrogen-oxygen combustion in rocket engines using LOGOS code / V. B. Betelin, R. M. Shagaliev, S. V. Aksenov [et al.]. — DOI 10.1016/j.actaastro.2013.11.008 // Acta Astronautica. — 2014. — Vol. 96. — № 1. — Pp. 53-64.
- [12] Пакет программ «Логос». Учет контактного взаимодействия при решении нелинейных быстропотекающих задач механики деформируемого твердого тела / Д. Ю. Дьянов, А. В. Казанцев, С. В. Стародубов [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. — 2020. — № 2. — С. 45-59. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43110929> (дата обращения: 18.04.2021). — Рез. англ.
- [13] Smagin, D. I. Methods for the Design of Modern On-Board Systems of Advanced Aircraft / D. I. Smagin, R. S. Savelev, A. A. Satin. — DOI 10.1109/ICMAE.2019.8880986 // 2019 IEEE 10th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE). — Brussels, Belgium: IEEE Press, 2019. — Pp. 97-101.
- [14] Napreenko, K. Improving the Quality of Calculation of Air Parameters in the Passenger Areas of the Aircraft Through the Interaction of One-Dimensional and Three-Dimensional Software Systems / K. S. Napreenko, A. V. Lamtyugina, D. I. Smagin. — DOI 10.1109/NTAD51447.2020.9379120 // 2020 New Trends in Aviation Development (NTAD). — Starý Smokovec, Slovakia: IEEE Press, 2020. — Pp. 183-186.
- [15] Liu, J. Dynamic Modeling and Active Disturbance Rejection Control of Parallel Aerial Manipulator System / J. Liu, Z. Li, Y. Tian, W. Zheng. — DOI 10.1007/978-981-15-8155-7\_274 // Advances in Guidance, Navigation and Control. Lecture Notes in Electrical Engineering; ed. by L. Yan, H. Duan, X. Yu. — 2022. — Vol. 644. — Pp. 3281-3293. — Springer, Singapore.
- [16] Tikhonov, A. I. Features of Application of the Technology of Digital Counterparts in Aviation Equipment / A. I. Tikhonov, A. A. Sazonov. — DOI 10.15405/epsbs.2020.04.63 // Problems of Enterprise Development: Theory and Practice; ed. by V. V. Mantulenko. — European Proceedings of Social and Behavioural Sciences. — Vol. 82. — European Publisher, 2020. — Pp. 485-491.
- [17] Tikhonov, A. I. Digital Aviation Industry in Russia / A. I. Tikhonov, A. A. Sazonov, S. V. Novikov. — DOI 10.3103/S1068798X19040178 // Russian Engineering Research. — 2019. — Vol. 39, issue 4. — Pp. 349-353.
- [18] Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК / А. И. Боровков, Ю. А. Рябов, К. В. Кукушкин [и др.] // Вестник Восточно-Сибирской открытой академии. — 2019. — № 32. — С. 1-38. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37180048> (дата обращения: 18.04.2021). — Рез. англ.
- [19] Borovkov, A. I. Digital twins: definition, approaches and methods of development / A. I. Borovkov, Y. A. Ryabov. — DOI 10.18720/IEP/2019.3/25 // Proceedings of Scientific-Practical Conference "Digital Transformation of the Economy and Industry"; ed. by A. V. Babkin. — St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2019. — Pp. 234-245.
- [20] Betelin, V. B. Supercomputer technologies in Russia: Status and problems of development / V. B. Betelin. — DOI 10.1134/S1019331615060027 // Herald of the Russian Academy of Sciences. — 2015. — Vol. 85, issue 6. — Pp. 484-494.
- [21] Концепция создания комплексной математической модели летательного аппарата, включающей основные бортовые системы / Д. И. Смагин, А. А. Сатин, Р. С. Савельев [и др.] // Качество и жизнь. — 2018. — № 4(20). — С. 397-403. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37072542> (дата обращения: 18.04.2021). — Рез. англ.
- [22] Горобец, А. В. Параллельная технология численного моделирования задач газовой динамики алгоритмами повышенной точности / А. В. Горобец. — DOI 10.7868/S0044466915040067 // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2015. — Т. 55, № 4. — С. 641-652. — Рез. англ.
- [23] Параллельный программный комплекс NOISEtte для крупномасштабных расчетов задач аэродинамики и аэроакустики / И. В. Абалакин, П. А. Бахвалов, А. В. Горобец [и др.] // Вычислительные методы и программирование. — 2012. — Т. 13, № 3. — С. 110-125. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18228944> (дата обращения: 18.04.2021). — Рез. англ.



- [24] Gorobets, A. Heterogeneous CPU+GPU parallelization for high-accuracy scale-resolving simulations of compressible turbulent flows on hybrid supercomputers / A. Gorobets, P. Bakhvalov. — DOI 10.1016/j.cpc.2021.108231 // *Computer Physics Communications*. — 2022. — Vol. 271. — Pp. 108231.
- [25] Программный пакет для расчета аэродинамических характеристик летательных аппаратов / В. Н. Котеров, В. М. Кривцов, В. И. Зубов. — DOI 10.15514/ISPRAS-2017-29(6)-17 // *Труды ИСП РАН*. — 2017. — Т. 29, № 6. — С. 271-288. — Рез. англ.

Поступила 18.04.2021; одобрена после рецензирования  
03.06.2021; принята к публикации 15.06.2021.

#### Об авторах:

**Корнев Александр Владимирович**, главный конструктор суперкомпьютерных технологий ОАО «ОКБ Сухого» (филиал компании «Сухой»), научно-исследовательский центр суперкомпьютерных технологий, Акционерное общество «Авиационная холдинговая компания «Сухой» (125284, Российская Федерация, г. Москва, ул. Поликарпова, д. 23 Б), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4056-8448>**, [avkorn@okb.sukhoi.org](mailto:avkorn@okb.sukhoi.org)

**Козелков Андрей Сергеевич**, начальник отдела вычислительной гидро-, аэродинамики и теплопереноса, ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (607188, Российская Федерация, Нижегородская область, г. Саров, пр. Мира, д. 37), доктор физико-математических наук, профессор, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3247-0835>**, [askozelkov@mail.ru](mailto:askozelkov@mail.ru)

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## References

- [1] Pogosyan M.A., Savelievskih E.P., Strelets D.Yu., Kornev A.V., Shagaliev R.M., Kozelkov A.S. Introduction of Supercomputer Technology into the Aircraft Industry of Russia. *Aviation Industry*. 2013; (2):3-9. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20607438> (accessed 18.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [2] Pogosyan M.A., Savelievskih E.P., Strelets D.Yu., Kornev A.V., Shagaliev R.M., Kozelkov A.S. The use of domestic supercomputer technologies in designing new samples of the aircraft equipment. *Aviation Industry*. 2013; (3):3-7. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21539388> (accessed 18.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [3] Pogosyan M.A., Savelievskih E.P., et al. *Primenenie superkomp'yuternykh tekhnologiy v rossijskoj aviacionnoj promyshlennosti* [Application of supercomputer technologies in the Russian aviation industry]. In: Ed. by A. G. Bratukhin. International Encyclopedia CALS. Aerospace engineering. JSC "SRC ASD", Moscow; 2015. p. 49-61. (In Russ.)
- [4] Kozelkov A.S., Krutyakova O.L., Kurkin A.A., Kurulin V.V., Tyatyushkina E.S. Zonal RANS-LES approach based on an algebraic reynolds stress model. *Fluid Dynamics*. 2015; 50(5):621-628. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S0015462815050038>
- [5] Kozelkov A.S., Kurulin V.V. Eddy-resolving numerical scheme for simulation of turbulent incompressible flows. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2015; 55(7):1232-1241. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S096554251507009X>
- [6] Kozelkov A.S., Kurulin V.V., Lashkin S.V., Shagaliev R.M., Yalozo A.V. Investigation of supercomputer capabilities for the scalable numerical simulation of computational fluid dynamics problems in industrial applications. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2016; 56(8):1506-1516. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965542516080091>
- [7] Kozelkov A.S., Deryugin Yu.N., Tsibereva Yu.A., et al. Minimal basis tasks for validation of methods of numerical simulation of turbulent flows of incompressible viscous fluids. *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*. 2014; (4):21-69. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22835507> (accessed 18.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [8] Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Sharipova I.L., et al. Minimal basis tasks for validation of methods of calculation of flows with free surfaces. *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*. 2015; (2):49-69. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23894816> (accessed 18.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [9] Dmitriev S.M., Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Legchanov M.A., Tarasova N.V., Kurulin V.V., Efremov V.R., Shamin R. Simulation of Turbulent Convection at High Rayleigh Numbers. *Modelling and Simulation in Engineering*. 2018; 2018:5781602. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/5781602>
- [10] Kozelkov A.S., Kornev A.V., Strelets D.Yu., Tannenber I.D., Ostanko D.A. Computational Research of Aerodynamic Characteristics for Supersonic Plane on Cruising Regime. *Polyot = Flight*. 2017; (6):17-21. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29847276> (accessed 18.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [11] Betelin V.B., Shagaliev R.M., Aksenov S.V., Belyakov I.M., Deryugin Yu.N., Kozelkov A.S., Korchazhkin D.A., Nikitin V.F., Sarazov A.V., Zelenskiy D.K. Mathematical simulation of hydrogen-oxygen combustion in rocket engines using LOGOS code. *Acta Astronautica*. 2014; 96(1):53-64. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.11.008>
- [12] Dyanov D.Yu., Kazantsev A.V., Starodubov S.V., Tsiberev K.V., Chelakov A.A. LOGOS software package: Solution of nonlinear transient problems of deformable solid mechanics with regard to contact interactions. *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Series Mathematical Modeling of Physical Processes*. 2020; (2):45-59. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43110929> (accessed 18.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [13] Smagin, D.I., Savelev R.S., Satin A.A. Methods for the Design of Modern On-Board Systems of Advanced Aircraft. *2019 IEEE 10th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE)*. IEEE Press, Brussels, Belgium; 2019. p. 97-101. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMAE.2019.8880986>



- [14] Napreenko K.S., Lamtyugina A.V., Smagin D.I. Improving the Quality of Calculation of Air Parameters in the Passenger Areas of the Aircraft Through the Interaction of One-Dimensional and Three-Dimensional Software Systems. *2020 New Trends in Aviation Development (NTAD)*. IEEE Press, Starý Smokovec, Slovakia; 2020. p. 183-186. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/NTAD51447.2020.9379120>
- [15] Liu J., Li Z., Tian Y., Zheng W. Dynamic Modeling and Active Disturbance Rejection Control of Parallel Aerial Manipulator System. In: Ed. by L. Yan, H. Duan, X. Yu. *Advances in Guidance, Navigation and Control. Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2022; 644:3281-3293. Springer, Singapore. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-8155-7\\_274](https://doi.org/10.1007/978-981-15-8155-7_274)
- [16] Tikhonov A.I., Sazonov A.A. Features of Application of the Technology of Digital Counterparts in Aviation Equipment. In: Ed. by V. V. Mantulenko. *Problems of Enterprise Development: Theory and Practice*, vol. 82. *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences*. European Publisher; 2020. p. 485-491. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15405/epsbs.2020.04.63>
- [17] Tikhonov A.I., Sazonov A.A., Novikov S.V. Digital Aviation Industry in Russia. *Russian Engineering Research*. 2019; 39(4):349-353. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19040178>
- [18] Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Kukushkin K.V., Maruseva V.M., Kulemin V.Yu. Digital twins and digital transformation of defense industry companies. *Vestnik VostochnoSibirskoy otkrytoy akademii* = Bulletin of East-Siberian Open Academy. 2019; (32):1-38. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37180048> (accessed 18.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [19] Borovkov A.I., Ryabov Y.A. Digital twins: definition, approaches and methods of development. In: Ed. by A. V. Babkin. *Proceedings of Scientific-Practical Conference "Digital Transformation of the Economy and Industry"*. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg; 2019. p. 234-245. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18720/IEP/2019.3/25>
- [20] Betelin V.B. Supercomputer Technologies in Russia: Status and Problems of Development. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2015; 85(6):484-494. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S1019331615060027>
- [21] Smagin D.I., Satin A.A., Savelyev R.S., et al. *Koncepciya sozdaniya kompleksnoi matematicheskoi modeli letatel'nogo apparata vkluchayushei osnovnie bortovie sistemi* [The Concept of Creating a Complex Mathematical Model of the Aircraft Including the Main Onboard Systems]. *Kachestvo i zhizn'* = Quality and Life. 2018; 20(4):397-403. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37072542> (accessed 18.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [22] Gorobets A.V. Parallel technology for numerical modeling of fluid dynamics problems by high-accuracy algorithms. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2015; 55(4):638-649. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965542515040065>
- [23] Abalakin I.V., Bakhvalov P.A., Gorobets A.V., Duben A.P., Kozubskaya T.K. Parallel Research Code NOISEtte for large-scale CFD and CAA simulations. *Numerical Methods and Programming*. 2012; 13(3):110-125. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18228944> (accessed 18.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [24] Gorobets A., Bakhvalov P. Heterogeneous CPU+GPU parallelization for high-accuracy scale-resolving simulations of compressible turbulent flows on hybrid supercomputers. *Computer Physics Communications*. 2022. 271:108231. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2021.108231>
- [25] Koterov V.N., Krivtsov V.M., Zubov V.I. Software package to calculate the aerodynamic characteristics of aircrafts. *Trudy ISP RAN* = Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS. 2017; 29(6):271-288. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2017-29\(6\)-17](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2017-29(6)-17)

Submitted 18.04.2021; approved after reviewing 03.06.2021;  
accepted for publication 15.06.2021.

#### About the authors:

**Alexander V. Kornev**, Chief Designer of Supercomputer Technologies of the JSC Sukhoi Design Bureau (subsidiary of the JSC Sukhoi Company), Supercomputer Technology Research Center, JSC "Aviation Holding Company "Sukhoi" (23B Polikarpov St., Moscow 125284, Russian Federation), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4056-8448>**, [avkorn@okb.sukhoi.org](mailto:avkorn@okb.sukhoi.org)

**Andrey S. Kozelkov**, Head of Computational Hydro-, Aerodynamics and Heat Transfer, Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics (37 Mira Ave., Sarov 607188, Nizhny Novgorod region, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3247-0835>**, [askozelkov@mail.ru](mailto:askozelkov@mail.ru)

All authors have read and approved the final manuscript.

