

**А.А. Медельцев, П.А. Шаповалов, М.В. Воронов, А.И. Полухина,  
П.Н. Сигалева, А.В. Фролов**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ВНУТРИ  
ГЕРМЕТИЧНОГО КОРПУСА БИНС В МУЛЬТИФИЗИЧНОЙ  
ПОСТАНОВКЕ В ANSYS CFX И SYSTEM COUPLING**

*В настоящей работе рассматривается численное моделирование нестационарного конвективно-кондуктивного теплообмена бесплатформенной инерциальной навигационной системы высокоманевренного летательного аппарата (БИНС ВЛА), разработанной в АО «ЦНИИАГ», с использованием расчётного комплекса ANSYS. Целью исследования является всесторонний анализ теплообменных процессов, характерных для функционирования прибора, в том числе взаимного пространственного влияния источников тепловых мощностей друг на друга, а также на блок чувствительных элементов. Моделирование теплообмена внутри герметичного корпуса прибора проведено для критических условий функционирования (в рассматриваемом случае обусловлены нагревом элементов прибора) в сильно и слабо сопряжённых постановках с последующим сравнением результатов применения обоих подходов. Для программной реализации каждого подхода были выбраны модули пакета прикладных программ ANSYS: Mechanical, CFX, System Coupling. Выбрана k-ε модель турбулентности воздуха с неявным учётом эффекта в пограничных слоях и корректировкой диффузии в сдвиговых течениях. Учтён внешний естественный теплообмен с окружающим воздухом посредством задания конвективных граничных условий на внешние поверхности прибора. Для получения численных значений коэффициентов теплоотдачи была принята во внимание ориентация каждой поверхности в пространстве благодаря использованию соответствующего коэффициента. С помощью расчёта термических сопротивлений были учтены потери мощности, возникающие ввиду наличия неровностей на поверхностях прибора в контактах между твердотельными компонентами с использованием термических сопротивлений фактического контакта и межконтактной прослойки. Графически представлены результаты моделирования деформированного состояния несущей системы прибора, возникающего вследствие действия несимметричного температурного поля в нагретом приборе. Проведён анализ полученных графиков. Определены показатели жёсткости несущей системы прибора – углы отклонения взаимной ортогональности чувствительных элементов, а именно акселерометров и датчиков угловой скорости (ВОГ – волоконно-оптических гироскопов), возникающие вследствие тепловых деформаций. Полученные результаты позволили оценить технические решения по качеству теплоотвода от элементов плат в обход чувствительных элементов прибора, принятых на этапе компоновки компонентов изделия.*

*Численное моделирование; метод конечных элементов; ANSYS; CFX; System Coupling; БИНС; естественная конвекция в герметичном объёме; сопряжённый теплообмен; охлаждение электронных компонентов.*

**A.A. Medel'tsev, P.A. Shapovalov, M.V. Voronov, A.I. Polukhina,  
P.N. Sigaleva, A.V. Frolov**

**MULTIPHYSICS SIMULATION IN ANSYS CFX AND SYSTEM COUPLING  
OF HEAT TRANSFER INSIDE HERMETIC CASE OF STRAPDOWN  
INERTIAL NAVIGATION SYSTEM**

*The article presents a numerical simulation of non-stationary convective-conductive heat transfer of the strapdown inertial navigation system (SINS), developed in the JSC «CNIAG». The numerical simulation is carried out in the ANSYS Mechanical. The aim of the study is a comprehensive analysis of heat exchange processes, which are characteristic to the device operation, including mutual spatial influence of thermal powers on each other, as well as on the block of sensitive elements. The simulation of heat transfer inside the hermetic case of the SINS is carried*

out for critical operating conditions in a strongly and weakly coupled consideration with a comparison of both approaches. ANSYS Mechanical, CFX and System Coupling simulation modules are chosen for program implementation of each approach. The  $k$ - $\epsilon$  model of air turbulence with implicit consideration of the effect in the boundary layers and diffusion correction in shear flows is chosen for this approach. External heat exchange with ambient air is considered by setting convective boundary conditions on the external surfaces of the SINS, considering their orientation. To obtain numerical values of the heat transfer coefficients, the orientation of each surface in space is taken into account by using the appropriate coefficient. The presence of irregularities on the surfaces of the SINS in the contacts between solid components is considered by using the calculation of thermal resistances of the actual contact and intercontact layer. The simulation results of deformed state of SINS structural system, resulting from the action of a non-symmetric thermal field, is presented. The analysis of the obtained graphs is carried out. Stiffness indicators of the SINS structural system is defined as angles of deviation of sensitivity axes caused by thermal deformations. The obtained results make it possible to evaluate the engineering solutions for the quality of heat removal from the elements of the PCBs, bypassing the sensitive elements of the device, adopted at the stage of product layout.

*Numerical simulation; finite-element method; ANSYS; CFX; Strapdown inertial navigation system (SINS); natural convection inside hermetic volume; conjugate heat transfer; cooling of electronic components, fluid-solid interaction.*

**Введение.** Современные конкурентоспособные бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) для высокоманевренных летательных аппаратов (ВЛА) являются технически сложными приборами, разработка и модернизация которых предполагает, в частности, увеличение точности выходных параметров БИНС. БИНС ВЛА [1–3] в процессе функционирования испытывают комплекс внешних воздействующих факторов (ВВФ), приводящих к отклонениям взаимной ортогональности чувствительных элементов (ЧЭ) друг относительно друга [4, 5], что ведёт к снижению точности навигационного комплекса в целом.

Требования, предъявляемые к БИНС, необходимость учесть влияние комплекса ВВФ, а также предусмотреть решения, снижающие негативные воздействия внешних факторов, обуславливают использование комплексных оптимизационных методов проектирования конструкции и компоновки прибора в целом, основанных на имитационном моделировании процессов и откликов прибора на ВВФ; следование такому пути предполагает разработку сложных пространственных термомеханических численных моделей.

По оценкам, проведённым в работах [6, 7], один из наиболее существенных ВВФ с точки зрения влияния на отклонения осей чувствительности (ОЧ) – температурные деформации.

Настоящая работа посвящена разработке методики построения численных моделей нестационарного сложного теплообмена в приборе БИНС, определению на основе этих моделей температурных полей и отклонений углов ОЧ под влиянием асимметричных температурных распределений в приборе. Возможен термодинамический расчёт с использованием методов численного моделирования, в основе которых лежит решение дифференциальных уравнений течения жидкости и газа в конечно-объёмной модели газовой среды и теплопроводности в узлах конечно-элементной модели твердотельных объектов. Он позволяет учесть основные ВВФ и выявить нужные отклики.

В открытых источниках мало задач, посвящённых исследованию сложного теплообмена в герметичных объёмах со множеством независимых источников тепловыделений. Это делает настоящую работу актуальной в части компьютерного моделирования указанных процессов.

Подготовка и решение рассматриваемой задачи являются трудоёмкими вследствие наличия большого количества элементов внутри прибора, сложной геометрии и мультифизичности процесса. В определённых зонах можно наблю-

дать как турбулентный режим течения воздуха, так и ламинарный. Распределение температурных полей становится неравномерным из-за различных значений рассеиваемых мощностей, исходящих от элементов, а также перемешивания воздушных масс с различными температурами с течением времени. Для задания корректных граничных условий необходимо построить геометрию жидкостной и твердотельной зоны.

Были рассмотрены два подхода к исследованию процесса естественной конвекции в герметичном объёме с помощью численного моделирования: методом конечных объёмов (сильно сопряжённая постановка) и сочетанием методов конечных объёмов и конечных элементов (слабо сопряжённая постановка); оба подхода позволили добиться адекватных результатов, сокращения затрат на исследование и производство опытных экземпляров и уменьшения времени разработки навигационной системы в целом.

Газодинамический подход реализован в модуле ANSYS CFX. Его достоинствами являются высокая гибкость настроек, точность и возможность расширенной визуализации результатов. К недостаткам можно отнести трудоёмкость постановки задачи на нестационарный расчёт, высокие требования к ресурсоёмкости рабочей станции.

Второй подход, Fluid-Solid Interaction (FSI), подразумевает моделирование теплообмена в твёрдых телах (ANSYS Mechanical, модуль Transient Thermal) и отдельное моделирование течения (CFX), омывающего исследуемые твёрдые тела среды. Передача значений параметров теплообмена на сопряжённых поверхностях производится с помощью модуля System Coupling.

Результаты моделирования посредством обоих подходов для настоящей задачи близки. Преимущество такого разделения заключается в возможности подготовки модели в среде Mechanical для последующих расчётов напряжённо-деформированного состояния, имеющего значение на этапах оценки жёсткости и прочности в виде откликов на комплекс ВВФ. Так, цикл оптимального проектирования прибора требует включения в анализ расчётов, проводимых методами вычислительной газодинамики, лишь опционально. Кроме того, модуль System Coupling позволяет сопрягать нестационарную и стационарную постановки в рамках одной расчётной модели. Это актуально для данной работы вследствие низкой интенсивности процессов теплообмена внутри прибора.

Программная реализация моделей выполнена в трёхмерной постановке в программном модуле ANSYS CFX 2021R1 [8, 15] и CAE-комплексе Ansys Mechanical [9] с использованием модуля Transient Thermal и System Coupling 2021R1, а также Python3 [10]. Подготовка расчётной геометрической модели для расчёта проводилась в программе SolidWorks и модуле Ansys SpaceClaim 2021R1.

Особая часть работы по настройке нестационарных численных моделей связана с подготовкой начальных условий в виде рассеиваемых электронными компонентами тепловых мощностей. Данные получены в виде зависимостей рассеиваемых мощностей от времени экспериментально на базе исследований АО «ЦНИИАГ». Подробно-сти экспериментальных исследований лежат за рамками настоящей работы.

В модуле Ansys CFX естественная конвекция воздуха учитывалась следующими факторами: ускорение свободного падения, теплообмен между твердотельными телами и воздухом, вязкостный нагрев (влияние критерия Бринкмана) и свойство плавучести воздуха. Учитывался процесс теплообмена, напрямую зависящий от входных параметров, таких как коэффициент теплоотдачи (по соотношению Михеева), рассчитанный для каждой теплоотдающей поверхности на крышке и корпусе прибора.

Результатами численного моделирования для обоих подходов явились температурные поля внутри прибора, позволившие оценить технические решения по качеству теплоотвода от элементов плат в обход ЧЭ прибора, принятые на этапе компоновки компонентов изделия.

**Особенности задачи.** Общими для обоих подходов являются задача моделирования течения однофазной среды в герметичном корпусе прибора БИНС и моделирование процесса естественной конвекции методом конечных объёмов. Теплопередача между твердотельными элементами: деталями, узлами конструкции прибора, основными электронными компонентами моделировалась по-разному.

В части вычислительной газодинамики задача была рассмотрена для следующих условий: газ сжимаемый, течение турбулентное, рассматриваемое в присутствии теплообмена между газом и стенками корпуса, а также между твердотельными частями конструкции, рабочее вещество – идеальный газ.

В случае сложного температурного распределения при необходимости учесть зависимость температуры стенки от координат и от времени необходимо решать сопряжённую задачу теплообмена, то есть совместно решать уравнения распространения теплоты в воздухе и твёрдом теле и уравнения движения. На границе твёрдого тела и воздуха температуры и тепловые потоки считаются равными. Вследствие этого учитывается взаимное тепловое влияние воздуха и тела, что определяет зависимость теплообмена теплофизических, геометрических и прочих свойств тела.

Относительный перепад температуры является функцией локального значения безразмерного числа Брюна, описанного в [11] и являющегося критерием сопряженности задачи.

В задаче присутствуют как ламинарный, так и турбулентный режимы течения, разделить которые в части моделирования крайне затруднительно. Для обоих этих режимов были построены оценки числа Брюна, показавшие, что лишь в малой окрестности интенсивного теплообмена имеет место превышение числом Брюна критического значения. В дальнейшем рассмотрены оба описанных подхода.

**Объект исследования.** Объектом исследования в настоящей работе является БИНС для ВЛА, применяющийся в бортовых приборах с целью определения параметров движения ВЛА и непосредственно влияющий на их точность.

Как правило, БИНС строятся на базе следующих ЧЭ: акселерометров и датчиков угловой скорости, обладающих рядом погрешностей (смещением нулевых сигналов, отклонением масштабных коэффициентов и отклонением ОЧ от базового направления).

Основным достоинством БИНС является автономность функционирования, а недостатком – накапливающиеся с течением времени и в процессе совершения интенсивных манёвров ошибки, причинами возникновения которых являются как наличие инструментальных погрешностей ЧЭ БИНС, так и нестабильность несущей конструкции БИНС от времени, температурных (климатических, аэродинамических, внутренних – от электронных компонентов) и механических воздействий (перегрузки, вибрации, удары).

Исследования, проведенные в АО «ЦНИИАГ» в рамках многих НИОКР, показали, что на текущий момент наиболее эффективным способом существенного повышения точности БИНС ВЛА является обеспечение стабильно высокого значения жёсткости несущей системы, которая позволит уменьшить отклонение ЧЭ БИНС с соблюдением массогабаритных ограничений. Вопросам разработки оптимальных несущих систем БИНС были посвящены работы [5–7].

Рассматриваемый прибор БИНС показан на рис. 1 с полупрозрачными корпусом и крышкой.

Внутри корпуса размещаются три акселерометра, вычислительная и питающая электроника, рассеивающая значительное количество тепловой мощности. Рассеиваемая тепловая мощность поступает в корпус с внешних поверхностей от трёх датчиков угловой скорости (ВОГ – волоконно-оптических гироскопов).

Размещение значительно нагревающейся электроники и блока ЧЭ в герметичном объёме определило необходимость предусмотреть элементы конструкции, интенсивно отводящие вредные для ЧЭ тепловые потоки в обход акселерометров: алюминиевые радиаторы, гелиевые прокладки вблизи наиболее «горячих» элементов, оребрения на внешней поверхности крышки.

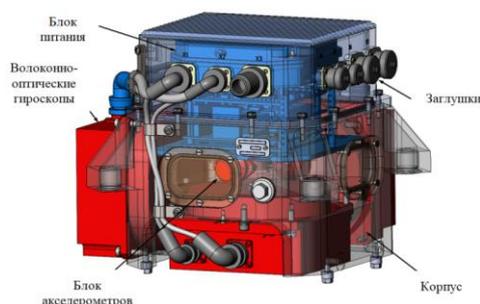


Рис. 1. БИНС АО «ЦНИИАГ»: конструкторский вариант прибора

Прибор содержит детали, состоящие из конструкционных алюминиевых сплавов, фольгированного стеклотекстолита, пластика ABS-M30, латунного сплава. Для интенсификации теплоотвода наиболее теплонагруженных элементов в опасных зонах использованы прокладки из КПДТ-2/3.

**Подготовка численных моделей.** Начальный этап подготовки расчётных моделей – идеализация геометрии узлов прибора. Исключены: геометрические объекты, значительно не влияющие на отклик системы (фаски и рёбра, часть крепёжных элементов, внешние жгуты и кабели, разъёмы), датчики угловых скоростей (ЧЭ), размещаемые вне герметичного корпуса с заменой рассеиваемых от них мощностей на эквивалентные граничные условия (ГУ) на внешних поверхностях корпуса. Оребрение на верхней поверхности крышки прибора заменено гладкой поверхностью и эквивалентным значением конвективного ГУ.

Идеализированная геометрия, содержащая около 50 твердотельных компонентов, представлена на рис. 2.

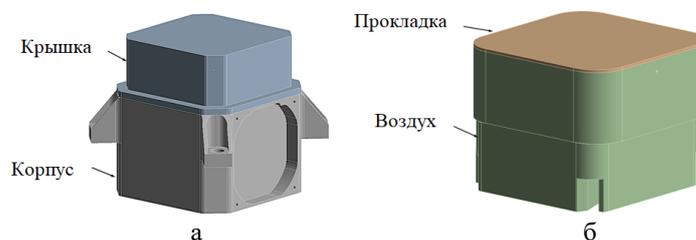


Рис. 2. Идеализированная геометрическая модель: а – внешний вид корпуса и крышки БИНС; б – внутренность прибора под его оболочкой

Средствами SolidWorks и ANSYS SpaceClaim была проведена подготовка 5 независимых внутренних воздушных доменов, имитирующих омывающий твердотельные элементы воздух.

На рис. 3 показаны три воздушных домена, омывающих элементы, находящиеся внутри радиаторов плат питания.

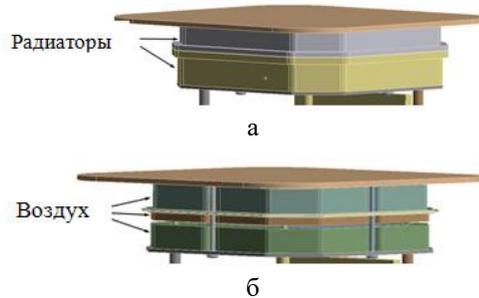


Рис. 3. Внешний вид радиаторов БИНС: а – внешний вид радиаторов БИНС; б – внутренний воздух в радиаторах

Оставшиеся два домена обтекают открытые платы и их компоненты, а также блок акселерометров.

На рис. 4 показан пакет электронных плат прибора без корпуса, крышки и радиаторов.

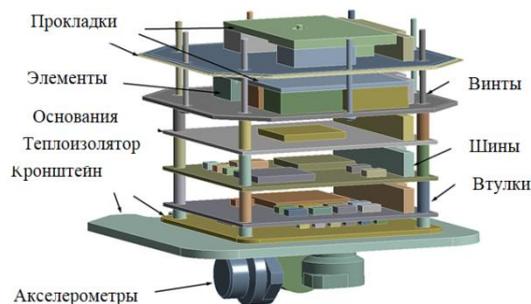


Рис. 4. Общий вид внутренней части прибора БИНС

В текущей задаче, как правило, выбирались комбинации контактов связанного типа и без трения, за исключением верхней прокладки над радиатором, на которой был задан контакт трением.

Для определения деформированного состояния системы прибор фиксировался с помощью комбинации неразделимого недеформируемого ограничения по четырём отверстиям в корпусе, а также контакта без трения, ограничивающего деформации плоских поверхностей на проушинах корпуса.

**Дискретизация.** Подготовка сеточных моделей проведена в сеточном процессоре ANSYS Meshing [12].

Для решения газодинамической задачи построена преимущественно тетраэдрическая сетка, содержащая около 30 миллионов расчётных узлов и около 17 миллионов объёмных элементов высокого порядка с послойными сгущениями сетки в окрестностях поверхностей перехода мультифизического взаимодействия твёрдых тел и газа (по 7 пограничных слоёв на сторону).

Для решения сопряжённой задачи методом System Coupling также применён преимущественно тетраэдрический метод дискретизации. Суммарно модель включает около 9 миллионов расчётных узлов и около 13 миллионов объёмных элементов второго порядка.

Сеточные модели прибора, используемые в чисто газодинамической постановке, представлены на рис. 5.

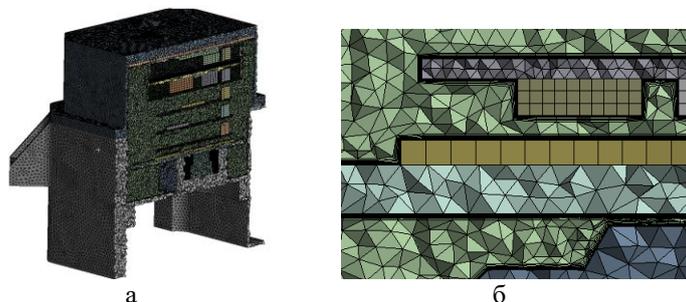


Рис. 5. Вид расчётной сетки конструкции в разрезе:  
а – общий вид расчётной сетки; б – увеличенный вид пограничных слоёв

**Задание краевых условий.** Начальная температура всей системы задана  $50^{\circ}\text{C}$ . Постоянная температура внешнего воздуха была задана как часть конвективного ГУ.

Выбрана k-ε модель турбулентности воздуха, содержащая уравнения, ориентированные на диффузионные задачи и корректирующая диффузию при сдвиговых течениях. Эффект в пограничных слоях учтён неявно.

В модуле Ansys CFX внутренняя естественная конвекция воздуха учитывалась посредством следующих параметров: гравитационная сила, плавучесть воздуха, теплообмен между твердотельными телами и воздухом, вязкостный нагрев (число Бринкмана).

**Расчёт коэффициентов теплоотдачи.** Для моделирования взаимодействия теплоотдающих поверхностей прибора с окружающим воздухом для каждой поверхности корпуса прибора БИНС были рассчитаны коэффициенты теплоотдачи на основании работ [11, 13, 14, 20].

Воспользовавшись общей формулой числа Нуссельта, выраженного при помощи критериального уравнения, можно выразить коэффициент теплоотдачи, учитывая ориентацию поверхности в пространстве с помощью  $K_{op}$ , описанного в работе [20] – коэффициента ориентации, принимающего значения в диапазоне от 0,85 до 1,3.

**Определение термомеханических параметров.** Средняя удельная мощность на каждом элементе прибора рассчитывалась как отношение рассеиваемой элементом мощности к объёму элемента.

Ввиду наличия неровностей на поверхностях прибора в контактах между твердотельными компонентами присутствуют потери мощности, которые были учтены при помощи расчёта термических сопротивлений.

Полное термическое сопротивление контакта вычислялось с учётом термических сопротивлений фактического контакта и межконтактной прослойки методом, описанным в [16–19].

**Результаты и анализ моделирования.** Расчёт выполнен в трёхмерной нестационарной постановке с общим временем 600 секунд.

В результате моделирования процесса естественной конвекции в модуле Ansys CFX удобно рассмотреть графические зависимости осреднённой температуры воздуха от времени по каждому воздушному домену, представленные на рис. 6.

На рис. 6 видно, что в целом средняя температура воздуха увеличилась на 3–4 градуса. Незначительное изменение температуры воздуха, обтекающего всю внутреннюю электронику за исключением внутренней части радиаторов, отображено

синей линией. Значительный рост температуры воздуха приходится на внутреннюю часть радиаторов. Как показано на красном графике, второй радиатор греется сильнее других за счёт наибольшей мощности, исходящей от одного из элементов и отсутствия охлаждения.

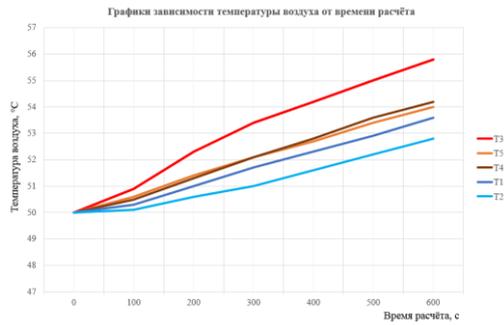


Рис. 6. Графики зависимости температуры воздуха от времени расчёта

Принадлежности доменам температур, графики которых показаны на рис. 6, в соответствии с устройством прибора БИНС показаны на рис. 7 виде условных наименований.

Температура воздуха между акселерометрами изменилась на 4°C за 10 минут функционирования прибора.

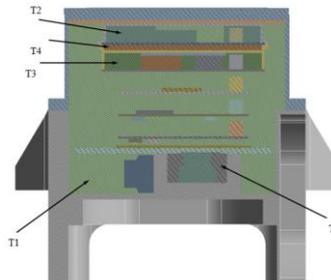


Рис. 7. Общий вид распределения воздуха внутри прибора БИНС

Поле температур представлено в виде объёмного рендеринга на рис. 8.

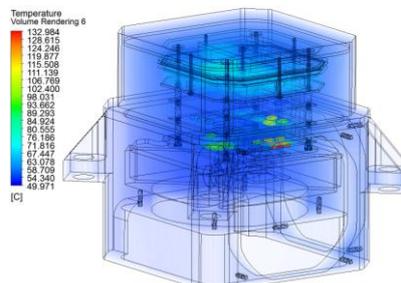


Рис. 8. Визуализация объёмного распределения температуры внутри корпуса БИНС

За 10 минут наиболее интенсивно нагреваются элементы открытых плат, для которых не предусмотрены теплоотводящие пластины и радиаторы.

Аналогичное распределение температур, определённое в рамках FSI-подхода, представлено средствами интерфейса ANSYS Mechanical на рис. 9.

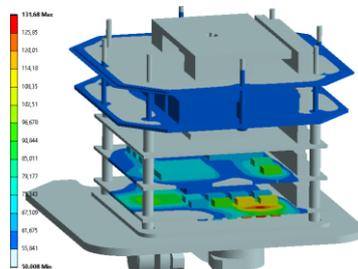


Рис. 9. Визуализация объёмного распределения температуры внутри корпуса БИНС при FSI-моделировании

На рис. 10 представлены пространственная визуализация векторного поля скоростей тепловых потоков по объёму основного воздушного домена внутри прибора и поле температур на внешних поверхностях корпуса и крышки через 10 минут работы прибора.

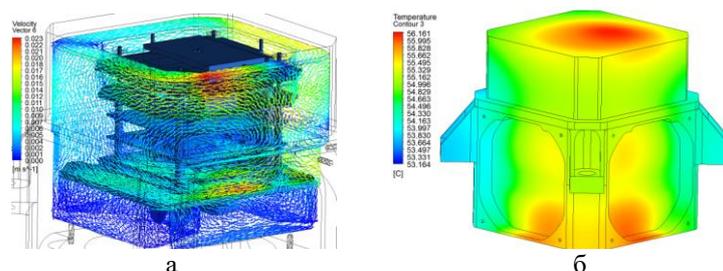


Рис. 10. Визуализация результатов через 10 минут работы прибора:  
а – распределение векторов скоростей воздуха с отображением узлов БИНС;  
б – температурное поле на внешних поверхностях несущей системы БИНС

На рис. 11 представлено деформированное состояние несущей системы прибора, возникающее вследствие действия несимметричного температурного поля в нагретом приборе.

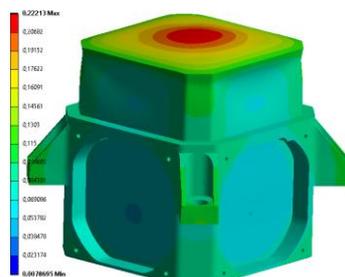


Рис. 11. Деформированное состояние несущей системы БИНС

Визуальный анализ полученных распределений показал, что в области интерфейсов отсутствуют резкие скачки параметров теплообмена. Результаты моделирования с помощью модуля Ansys CFx являются приемлемыми и близкими к реальной картине.

Деформированное состояние корпуса прибора в окрестностях установки ЧЭ представлено на рис. 12.

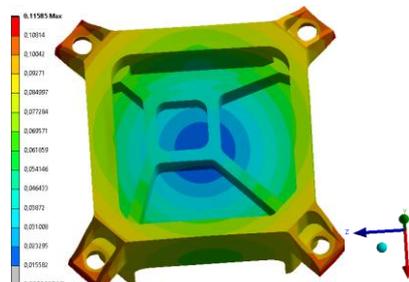


Рис. 12. Деформированное состояние корпуса БИНС

Определены отклонения площадок установки ЧЭ (акселерометров) в результате действия температурных деформаций; значения отклонений для трёх взаимно ортогональных осей представлены в табл. 4.

Таблица 4

Отклонения измерительных осей ЧЭ

	Ось X	Ось Y	Ось Z
Отклонение оси, угл. сек	3	16	5

Отклонения измерительных осей определялись с помощью встраиваемого в ANSYS Mechanical Python-приложения, реализующего метод многомерной регрессии, аппроксимирующей облако деформированных узлов искомым граней.

**Заключение.** Реализовано численное моделирование сложного теплообмена внутри герметичного корпуса БИНС, позволившее всесторонне исследовать теплообменные процессы, характерные для функционирования прибора, в том числе взаимное пространственное влияние источников тепловых мощностей друг на друга, а также на блок ЧЭ в критических условиях функционирования.

Получено представление о работе прибора в части тепловыделений, позволяющее определить пути снижения негативных факторов, возникающих при работе прибора, в отсутствие подробных экспериментов.

Разработаны численные модели сильно и слабо сопряжённого теплообмена в рамках гидродинамического подхода в ANSYS CFX, а также совместного решения задачи теплообмена с помощью System Coupling (постановка Fluid-Solid Interaction).

Расчёты, проведённые в рамках обоих подходов, приводят к качественно и количественно сходным результатам. Моделирование удовлетворительно сходится с экспериментальными данными проведённых в АО «ЦНИИАГ» испытаний по нагреву печатных плат и электронных компонентов.

Моделирование теплообмена в БИНС позволило провести проверочные расчёты критических условий нагрева для элементов прибора, но главным образом, данные модели рассматриваются в качестве части комплексной оптимизационной модели прибора. В этом отношении FSI-постановка оценивается более перспективной для будущих исследований теплообмена с похожими краевыми условиями. Во-первых, такой подход позволяет совмещать стационарную постановку с нестационарной для расчётов течений и процессов в твёрдых телах; он менее требователен к сеточным моделям. Во-вторых, благодаря простоте настройки расчётных моделей в интерфейсе ANSYS Mechanical поддерживается модульный подход к разработке и анализу сложных моделей.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гурский Б.Г., Люшанов Э.П., Спирин Э.П.* Основы теории систем управления высокоточных ракетных комплексов Сухопутных войск. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
2. *Бромберг П.В.* Теория инерциальных навигационных систем. – М.: Наука, 1979. – 296 с.
3. *Липтон А.* Выставка инерциальных систем на подвижном основании. – М.: Наука, 1971.
4. *Salychev O.S.* Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions. – М.: BMSTU Press, 2004.
5. *Медельцев А.А., Фролов А.В., Смирнов С.В.* Численное моделирование жёсткости и прочности несущих конструкций перспективной БИНС под действием комплекса термомеханических факторов // Сб. научных трудов «Наука и технологии»: Матер. XLI Всероссийской конференции, посвящённой 60-летию полёта Ю.А. Гагарина в космос. – М.: РАН, 2021.
6. *Медельцев А.А., Савватеев Д.О., Тутков Е.И. и др.* Опыт оптимизации конструкции самоприцеливающейся БИНС высокоманевренного летательного аппарата // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – Вып. 1
7. *Фролов А.В., Смирнов С.В., Попов Е.А.* Исследования влияния теплоты на стабильность осей несущей системы блока акселерометров БИНС // XXVII Санкт-петербургская международная конференция по интегрированным системам. – 2020.
8. ANSYS CFX 2021 R1 User Guide. August 2021. ANSYS Inc.
9. ANSYS Mechanical 2021 R1 User Guide. August 2021. ANSYS Inc.
10. *Лутц М.* Изучаем Python, многотом. – 5-е изд.: пер. с англ. – СПб.: ООО «Диалектика», 2019.
11. *Лыков А.В.* Тепломассообмен (Справочник). – 2-е изд. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
12. ANSYS Meshing 2021 R1 User Guide. August 2021. ANSYS Inc.
13. *Кухтин А.С.* Определение коэффициента теплоотдачи образцов для экспериментальных исследований условий теплового самовозгорания // Пожаровзрывобезопасность. Сер. Процессы горения. – 2004. – № 2.
14. *Исаев С.И., Кожин И.А., Кофанов В.И. и др.* Теория тепломассообмена: учебник для технических университетов и вузов / под ред. А.И. Леонтьева. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 683 с.
15. ANSYS CFX 2021 R1 Theory Guide. August 2021. ANSYS Inc.
16. *Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В.* Методы расчёта теплового режима приборов. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.
17. *Попов В.М.* Теплообмен в зоне контакта разъёмных и неразъёмных соединений. – М.: Энергия, 1971. – 216 с.
18. *Мадера А.Г.* Математическое моделирование конвективного теплопереноса в электронных устройствах // Программные продукты и системы. – 2011.
19. *Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е.* Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио, 1976.
20. *Воловиков В.В., Дектерев М.Л., Кофанов Ю.Н. и др.* Исследование тепловых характеристик РЭА с применением программного комплекса ТРИАНА: монография. – М.: Изд-во «ДМК Пресс», 2014.

## REFERENCES

1. *Gurskiy B.G., Lyushanov E.P., Spirin E.P.* Osnovy teorii sistem upravleniya vysokotochnykh raketnykh kompleksov Sukhoputnykh voysk [Fundamentals of the theory of control systems of high-precision missile systems of the Ground Forces]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2001.
2. *Bromberg P.V.* Teoriya inertzial'nykh navigatsionnykh sistem [Theory of inertial navigation systems]. Moscow: Nauka, 1979, 296 p.
3. *Lipton A.* Vystavka inertzial'nykh sistem na podvizhnom osnovanii [Exhibition of inertial systems on a movable base]. Moscow: Nauka, 1971.
4. *Salychev O.S.* Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions. Moscow: BMSTU Press, 2004.
5. *Medel'tsev A.A., Frolov A.V., Smirnov S.V.* Chislennoe modelirovanie zhestkosti i prochnosti nesushchikh konstruksiy perspektivnoy BINS pod deystviem kompleksa termomekhanicheskikh faktorov [Numerical modeling of stiffness and strength of load-bearing structures of promising BINS under the action of a complex of thermomechanical factors], *Sb.*

- nauchnykh trudov «Nauka i tekhnologii»: Mater. XLI Vserossiyskoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu poleta Yu.A. Gagarina v kosmos* [Collection of scientific papers "Science and Technology": Mater. XLI All-Russian Conference dedicated to the 60th anniversary of Yuri Gagarin's flight into space]. Moscow: RAN, 2021.
6. Medel'tsev A.A., Savvateev D.O., Titkov E.I. i dr. Opyt optimizatsii konstruksii samoprishelivayushchey BINS vysokomanevrennogo letatel'nogo apparata [Experience in optimizing the design of a self-aiming BINC of a highly maneuverable aircraft], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences], 2021, Issue 1
  7. Frolov A.V., Smirnov S.V., Popov E.A. Issledovaniya vliyaniya teploty na stabil'nost' osey nesushchey sistemy bloka akselerometrov BINS [Studies of the influence of heat on the stability of the axes of the carrier system of the BINS accelerometer block], *XXVII Sankt-peterburgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym sistemam* [XXVII St. Petersburg International Conference on Integrated Systems], 2020.
  8. ANSYS CFX 2021 R1 User Guide. August 2021. ANSYS Inc.
  9. ANSYS Mechanical 2021 R1 User Guide. August 2021. ANSYS Inc.
  10. Lutts M. *Izuchaem Python, mnogotom* [Learning Python, multi-volume]. 5 ed.: transl. from engl. Saint Petersburg: OOO «Dialektika», 2019.
  11. Lykov A.V. *Teplomassoobmen (Spravochnik)* [Heat and mass transfer (Directory)]. 2 ed. Moscow: Energiya, 1978, 480 p.
  12. ANSYS Meshing 2021 R1 User Guide. August 2021. ANSYS Inc.
  13. Kukhtin A.S. *Opreделение koeffitsienta teplootdachi obraztsov dlya eksperimental'nykh issledovaniy usloviy teplovogo samovozgoraniya* [Determination of the heat transfer coefficient of samples for experimental studies of thermal spontaneous combustion conditions], *Pozharovzryvobezopasnost'. Ser. Protsessy goreniya* [Fire and explosion safety. Ser. Gorenje processes], 2004, No. 2.
  14. Isaev S.I., Kozhinov I.A., Kofanov V.I. i dr. *Teoriya teplomassoobmena: uchebnyk dlya tekhnicheskikh universitetov i vuzov* [Theory of heat and mass transfer: textbook for technical universities and universities], ed. by A.I. Leont'eva. 2 ed. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 1997, 683 p.
  15. ANSYS CFX 2021 R1 Theory Guide. August 2021. ANSYS Inc.
  16. Dul'nev G.N., Parfenov V.G., Sigalov A.V. *Metody rascheta teplovogo rezhima priborov* [Methods of calculating the thermal regime of devices]. Moscow: Radio i svyaz', 1990, 312 p.
  17. Popov V.M. *Teploobmen v zone kontakta raz'emnykh i neraz'emnykh soedineniy* [Heat exchange in the contact zone of detachable and non-removable joints]. Moscow: Energiya, 1971, 216 p.
  18. Madera A.G. *Matematicheskoe modelirovanie konvektivnogo teploperenosa v elektronnykh ustroystvakh* [Mathematical modeling of convective heat transfer in electronic devices], *Programmye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2011.
  19. Rotkop L.L., Spokoynyu Yu.E. *Obespechenie teplovykh rezhimov pri konstruirovanii radioelektronnoy apparatury* [Provision of thermal modes in the design of radio-electronic equipment]. Moscow: Sov. radio, 1976.
  20. Volovikov V.V., Dekterev M.L., Kofanov Yu.N. i dr. *Issledovanie teplovykh kharakteristik REA s primeneniem programmnoho kompleksa TRiANA: monografiya* [Investigation of thermal characteristics of REA using the TRiANA software package: monograph]. Moscow: Izd-vo «DMK Press», 2014.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. Ю.В. Михайлов.

**Медельцев Антон Александрович** – АО «ЦНИИАГ»; e-mail: medeltsev@hotmail.com; г. Москва, Россия; тел.: 89017737331; инженер-конструктор 2 категории.

**Шаповалов Петр Анатольевич** – e-mail: kinik.keni@yandex.ru; тел.: 89267101927; начальник лаборатории.

**Воронов Максим Владимирович** – e-mail: duality696@mail.ru; тел.: 89177687590; инженер 1 категории.

**Полухина Анастасия Игоревна** – e-mail: loading1221@yandex.ru; тел.: 89162794097; инженер.

**Сигалева Полина Николаевна** – e-mail: polina@sigaleva.ru; тел.: 89153280920; инженер.

**Фролов Александр Владимирович** – e-mail: frolov@frolov.moscow; тел.: 89037867374; к.т.н.; начальник отдела.

**Medeltsev Anton Aleksandrovich** – JSC «СНИАГ»; e-mail: medeltsev@hotmail.com; Moscow, Russia; phone: +79017737331; CAE-engineer.

**Shapovalov Petr Anatolievich** – e-mail: kinik.keni@yandex.ru; phone: +79267101927; head of laboratory.

**Voronov Maksim Vladimirovich** – e-mail: duality696@mail.ru; phone: +79177687590; CAE-engineer.

**Polukhina Anastasia Igorevna** – e-mail: loading1221@yandex.ru; phone: +79162794097; engineer.

**Sigaleva Polina Nikolaevna** – e-mail: polina@sigaleva.ru; phone: +79153280920; engineer.

**Frolov Aleksandr Vladimirovich** – e-mail: frolov@frolov.moscow; phone: +79037867374; cand. of eng. sc.; head of division.

УДК 621.865.8

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-152-162

**Д.И. Малышев, Л.А. Рыбак, А.С. Писаренко, В.В. Черкасов**

### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СИНГУЛЯРНОСТЕЙ НА РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ И ГЕОМЕТРИЮ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ПЛАТФОРМЫ ГОФА-СТЮАРТА\***

*Одним из обязательных требований при проектировании механизмов параллельной структуры является исключение из рабочей области особых положений, в которых механизм теряет свою управляемость и могут возникнуть сбои в работе. Анализ рабочей области механизмов параллельной структуры сложнее аналогичного для механизмов последовательной структуры, особенно если механизм имеет более трех степеней свободы. В статье рассмотрена задача анализа влияния особых положений на решение прямой задачи кинематики и геометрию рабочего пространства 3/6 платформы Гофа-Стюарта (коммерческое название - «Гексапод»). Разработан численный алгоритм решения прямой задачи о положениях платформы. Он основан на непосредственном использовании системы уравнений кинематических связей платформы. Аппроксимация множества решений системы уравнений выполнена на основе детерминированных методов глобальной оптимизации. Выполнен анализ изменения количества решений прямой задачи кинематики вблизи зоны особого положения. Анализ состоит из двух этапов. Первый этап заключается в решении обратной задачи кинематики для положения и ориентации платформы, при котором возникает особое положение. Второй этап заключается в решении прямой задачи кинематики для случая особого положения и случая вблизи особого положения. В результате решения прямой задачи кинематики выявлено различное количество решений прямой задачи кинематики для различных случаев. Синтезирован алгоритм, позволяющий определить рабочее пространство, свободное от особых положений, для заданных диапазонов изменения углов ориентации платформы, заданных углами Эйлера. Проведён анализ зависимости изменения объёма рабочей области в зависимости от диапазона изменения углов ориентации платформы. Алгоритмы реализованы программно на языке программирования C++. Моделирование выполнено с использованием параллельных вычислений и реализацией экспорта трёхмерных моделей положений платформы и рабочей области в универсальный формат трёхмерных моделей STL.*

*Особые положения; платформа Гофа-Стюарта; прямая задача кинематики; рабочая область; обратная задача кинематики.*

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01614.