

Научная статья

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-10-23>

УДК 621.81:075.8



## 3d-моделирование конструкции системы кондиционирования самолета

**Арсений Федорович Боев<sup>1</sup>, Иван Викторович Карпов<sup>2</sup>, Вера Борисовна Распопина<sup>3✉</sup>**<sup>1-3</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия<sup>1</sup> [Niganiga1234niga@gmail.com](mailto:Niganiga1234niga@gmail.com)<sup>2</sup> [karpovivann@mail.ru](mailto:karpovivann@mail.ru)<sup>3</sup> [vbr2604@mail.ru](mailto:vbr2604@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8960-5644>

**Резюме.** Цель – формирование 3d-модели конструкции системы кондиционирования самолета для выполнения численного эксперимента в автоматизированной среде инженерного анализа. Полнота данной модели обусловлена требуемым результатом численного эксперимента. Суть эксперимента сводится к воссозданию условий протекания аэродинамических процессов в окрестности жалюзийной решетки, интегрированной в обшивку фюзеляжа в месте сообщения системы кондиционирования с внешней средой. Поэтому интерес представляет та часть конструкции системы кондиционирования, работа которой непосредственно влияет на параметры состояния прочности жалюзийной решетки. Для формирования цифровой копии оригинала была использована система автоматизированного проектирования Siemens NX. Ее инструментарий обладает возможностями построения высокоточных геометрических моделей. Результатом проделанной работы стала 3d-модель, которая позволит в цифровой среде инженерных расчетов получить модели процесса внешней и внутренней аэродинамики, позволяющие оценить параметры состояния прочности исследуемой детали. Показано, что данная модель представляет собой сочетание геометрических объектов, образованных совокупностью сборочных единиц. В частности, рассмотрены элементы системы кондиционирования: турбоохладитель, радиатор, клапан. Для воссоздания сложной геометрии оригиналов сборочных единиц этих агрегатов был разработан и оптимизирован алгоритм выбора и последовательности выполнения типовых операций системы Siemens NX таким образом, чтобы построить корректные 3d-модели. Построенная 3d-модель системы кондиционирования самолета позволит в цифровой среде инженерных расчетов смоделировать процессы внешней и внутренней аэродинамики, влияющие на параметры состояния прочности жалюзийной решетки. С помощью предложенной модели пользователь получает возможность изучить устройство системы кондиционирования самолета.

**Ключевые слова:** численный эксперимент, 3d-модель, CAD-программы, конструкция системы кондиционирования, полнотелая модель, тонкостенное тело

**Для цитирования:** Боев А. Ф., Карпов И. В., Распопина В. Б. 3d-моделирование конструкции системы кондиционирования самолета // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 10–23. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-10-23>.

### MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original article

## 3D modeling of the aircraft air conditioning system

**Arseniy F. Boev<sup>1</sup>, Ivan V. Karpov<sup>2</sup>, Vera B. Raspopina<sup>3✉</sup>**<sup>1-3</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia<sup>1</sup> [Niganiga1234niga@gmail.com](mailto:Niganiga1234niga@gmail.com)<sup>2</sup> [karpovivann@mail.ru](mailto:karpovivann@mail.ru)<sup>3</sup> [vbr2604@mail.ru](mailto:vbr2604@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8960-5644>

**Abstract.** The study aim was to develop a 3D model representing the aircraft air conditioning system with the purpose of performing a numerical experiment in an automated environment of engineering analysis. The completeness of this model was associated with the required result of the numerical experiment. During the experiment, we simulated

conditions for the flow of aerodynamic processes in the vicinity of the louvre integrated into the fuselage skin at the point of communication between the air conditioning system and the external environment. Of particular interest was that part of the air conditioning system, which directly affects the louvre strength. The Siemens NX computer-aided design system was used to form a digital copy of the original. The toolkit of this system allows high-precision geometric models to be designed. As a result, a 3D-model was obtained applicable to simulate external and internal aerodynamical processes in the digital environment of engineering calculations for evaluating the strength parameters of the studied part. This model is a combination of geometric objects formed by a set of assembly units. In particular, such elements of the air conditioning system as the cooling turbine, radiator, and valve, are considered. In order to recreate the complex geometry of the original assembly parts of these units, an algorithm for selecting and performing typical operations of the Siemens NX system was developed and optimized for constructing correct 3D models. The constructed 3D model of the aircraft air conditioning system can be used when simulating external and internal aerodynamical processes affecting the louvre strength in the digital environment of engineering calculations. The proposed model allows users to study the structure of aircraft air conditioning systems.

**Keywords:** numerical experiment, 3d model, CAD programs, air conditioning system design, full-bodied model, thin-walled body

**For citation:** Boev A. F., Karpov I. V., Raspopina V. B. 3D modeling of the aircraft air conditioning system. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):10-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-10-23>.

## ВВЕДЕНИЕ

Создание конструктивных элементов с заданными механическими характеристиками возможно только в том случае, если будут учтены все факторы, влияющие на него в процессе эксплуатации. В частности, это актуально при проектировании самолета. С одной стороны, конструкция самолета при наименьшем весе должна удовлетворять требованиям прочностной надежности, с другой – для этого необходимо учесть все факторы влияния, обуславливающие качественную и количественную картины параметров напряженно-деформированного состояния элемента при разных режимах эксплуатации самолета. Возможности информационных технологий по большей части позволяют достигнуть положительного результата при решении данной проблемы на этапе проектно-конструкторских работ [1–5]. Однако многофакторность условий нагружения, как конструкции самолета в целом, так и каждого элемента конструкции в частности, обуславливает невозможность заранее учесть все вариации силовых потоков по конструкции. Как следствие, у некоторых деталей выявляются отклонения параметров прочности от регламентированного уровня на следующих этапах жизненного цикла. Это требует оперативного определения причин отклонения с последующим их устранением.

В этом случае необходим детальный анализ всех факторов, влияющих на параметры напряженно-деформированного состояния

детали [6–9]. А именно: ее геометрия, материал, технология изготовления, назначение, воздействие соседних деталей и окружающей среды и т.д. Корректная математическая модель, сформированная в автоматизированной среде системы проектирования, позволяет получить цифровую копию реального процесса работы детали, достаточную для выявления причин ее разрушения и их устранения [10–13]. Причем возможности цифровых технологий позволяют построить модели, учитывающие разные факторы реального процесса, как по отдельности, так и в сочетании [14–18].

В частности, для исследования параметров напряженно-деформированного состояния конструктивного элемента, интегрированного в обшивку маневренного самолета, планируется использовать данную концепцию. Элемент представляет собой цельнометаллическую жалюзийную решетку. Наличие такого элемента конструкции обусловлено работой системы кондиционирования самолета. Следовательно, наряду с прочими факторами, влиять на параметры состояния прочности решетки будут внутренние и внешние воздушные потоки.

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки влияния на параметры состояния прочности решетки было принято решение провести численный эксперимент, целью которого является выявление силового воздействия воздушных потоков на конструктивный элемент типа цельнометаллической жа-

люзийной решетки. Интерес представляет полетный расчетный случай. Поэтому элемент испытывает на себе воздействие двух воздушных потоков. Один поток действует на элемент изнутри, то есть обусловлен работой системы кондиционирования, второй – снаружи, со стороны внешней воздушной среды. Проведение численного эксперимента планируется в автоматизированной среде специализированного программного продукта, позволяющего как воссоздать поток, так и оценить его воздействие, фиксируя значения аэродинамических параметров<sup>4</sup> [19].

В качестве прототипа принята типовая система кондиционирования легкого маневренного самолета [20], рис. 1.

Важным этапом подготовки эксперимента является формирование 3d-модели той части конструкции системы кондиционирования самолета, которая позволит достоверно воссоздать условия протекания процесса обдувки решетки.

## ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Построение 3d-модели прежде всего требует однозначного понимания конструктивного решения оригинала. Как правило, конструктивное решение систем кондиционирования воздуха самолетов представляет собой функционально увязанную совокупность

следующих конструктивных элементов:

- корпусных деталей, внешние обводы которых образованы плоскостями и криволинейными поверхностями;

- деталей, которые можно классифицировать как массивы, пластины, оболочки (замкнутые и не замкнутые), брусья разных форм и габаритов (полые и сплошные).

Наглядным примером сложности и многокомпонентности неповторяемых деталей такой конструкции служит часть конструкции систем кондиционирования самолетов Boeing 787 и SSJ 100, рис. 2.

Для формирования 3d-модели важно понять, какова степень ее детализации. А это зависит от того, какие задачи должны быть решены с помощью формируемой модели, и какой параметр является исследуемым в рамках численного эксперимента.

Поскольку в данном случае целью эксперимента является исследование влияния воздушного потока, обусловленного работой системы кондиционирования воздуха, на параметры напряженно-деформированного состояния конкретной детали, то и модель должна адекватно отобразить ту часть геометрии конструкции, которая непосредственно влияет на параметры аэродинамического воздействия на исследуемый объект.

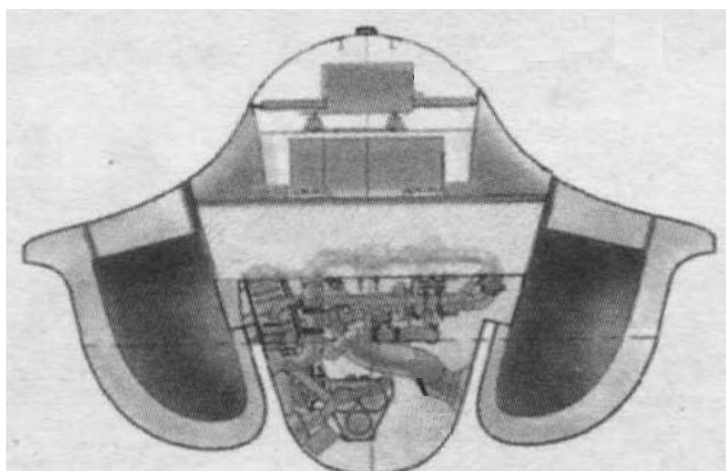
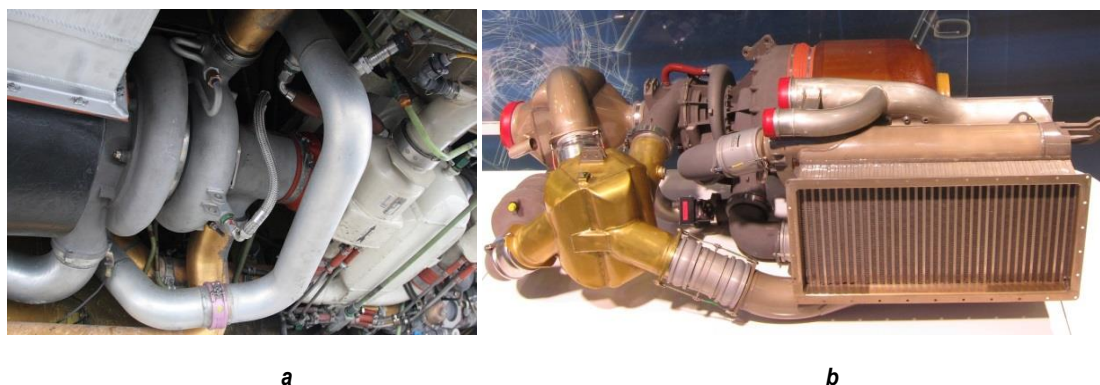


Рис. 1. Вид системы кондиционирования воздуха с выходом на обшивку фюзеляжа  
Fig. 1. View of the aircraft air conditioning system with an access to the fuselage skin

<sup>4</sup>Микеладзе В. Г., Титов В. М. Основные геометрические и аэродинамические характеристики самолетов и ракет: справочник. 2-е изд., доп. М.: Изд-во «Машиностроение», 1990. 144 с.



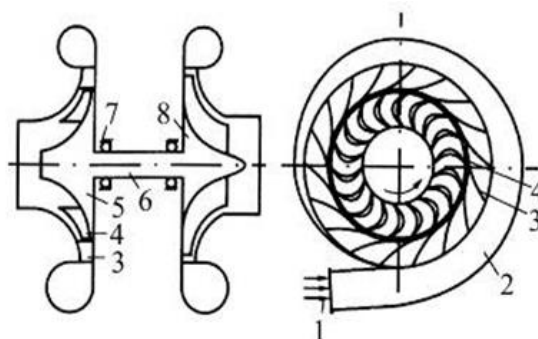
**Рис. 2. Часть системы кондиционирования: а – Boeing 787; б – SSJ 100**  
**Fig. 2. Part of the air conditioning system: a – Boeing 787; b – SSJ 100**

Анализ исследуемой системы кондиционирования с учетом данного критерия позволил выявить часть конструкции, которая актуальна для эксперимента. В частности, формирование 3d-модели предусматривает построение геометрических моделей следующих агрегатов системы: турбохолодильника, клапана, радиатора, части трубопровода.

Геометрия данных объектов весьма неоднозначна и не проста (см. рис. 2). Следует обратить внимание на тот факт, что целью данной работы не является изложение процесса исследования системы кондиционирования воздуха маневренного самолета в части ее конструкции и принципа функционирования. Этому будет посвящена следующая статья о численном эксперименте, для которого описываемая 3d-модель формируется. Ее формирование в своей основе содержит

трансформацию сложной многомерной геометрии прототипов в адекватные модели путем задействования математического аппарата, зашитого в инструментарий специализированной CAD-системы. Многогранность геометрии моделируемых объектов в сочетании с критериями их детализации требует однозначного, глубокого понимания математики, реализуемой тем или иным функционалом CAD-системы. Только тогда возможно корректно ассоциировать геометрическую особенность с математическим приемом. Соответственно, чем сложнее геометрия объекта моделирования, тем сложнее и чувствительнее должен быть задействованный математический аппарат системы.

Принципиальная схема турбохолодильника<sup>5</sup> (рис. 3) является бесспорным подтверждением вышесказанного.



**Рис. 3. Принципиальная схема турбохолодильника (1 – патрубок, 2 – «улитка», 3 – сопловой аппарат, 4 – лопасти рабочего колеса, 5 – рабочее колесо турбины, 6 – вал, 7 – подшипник, 8 – рабочее колесо вентилятора)**  
**Fig. 3. Schematic diagram of a cooling turbine (1 – exhaust pipe, 2 – 'snail', 3 – nozzle unit, 4 – impeller blades, 5 – turbine impeller; 6 – shaft, 7 – bearing, 8 – fan impeller)**

<sup>5</sup> Антонова Н. В., Дубровин Л. Д., Егоров Е. Е., Каллиоппин А. К., Петров Ю. М., Ружицкая В. В. [и др.]. Проектирование авиационных систем кондиционирования воздуха: учеб. пособ. М.: Изд-во «Машиностроение», 2006. 384 с.

Для более тщательного решения задачи 3d-моделирования следует выбрать автоматизированную среду 3d-моделирования, обладающую надлежащим инструментарием.

### ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ МОДЕЛИ

Для моделирования конструкции системы кондиционирования была использована система автоматизированного проектирования Siemens NX [21].

Построению геометрической модели предшествовали:

- детальный анализ возможностей автоматизированной среды в части CAD-программы;
- выявление операций, реализующих соответствующие возможности программы;
- просмотр инструментов среды, позволяющих выполнить конкретную операцию.

Владение таким системным видением функционала CAD-программы позволило построить геометрическую модель объекта путем выполнения требуемого ряда операций, выбор и хронология которых обусловлены причинно-следственной зависимостью заданной геометрии и имеющегося инструментария в арсенале системы автоматизированного проектирования NX.

**Моделирование «турбохолодильника».** Важной частью системы кондиционирования самолета является турбохолодильник. Эффект охлаждения в нем основан на преобразовании тепловой энергии воздуха в механическую работу. Геометрия турбохолодильника представляет собой сложную двухконтурную структуру. Во многом сложность моделирования турбохолодильника обусловлена неоднозначностью геометрии «улиток». Поэтапное формирование геометрической модели турбохолодильника заключается в выполнении логически увязанных специальных операций CAD-среды.

Используя панель инструментов, был создан эскиз тела вращения с последующей активацией операции вращения вдоль оси Oz. Соответствующее диалоговое окно представлено на рис. 4.

Переход из полнотелой модели в тонкостенную происходит при использовании функции NX «тонкостенное тело» (рис. 5). В диалоговом окне осуществляются требуемые настройки, позволяющие выбрать плоскости, относительно которых будет производиться удаление части модели. В исходном случае это верхняя и нижняя окружности. Указывается толщина требуемой детали.

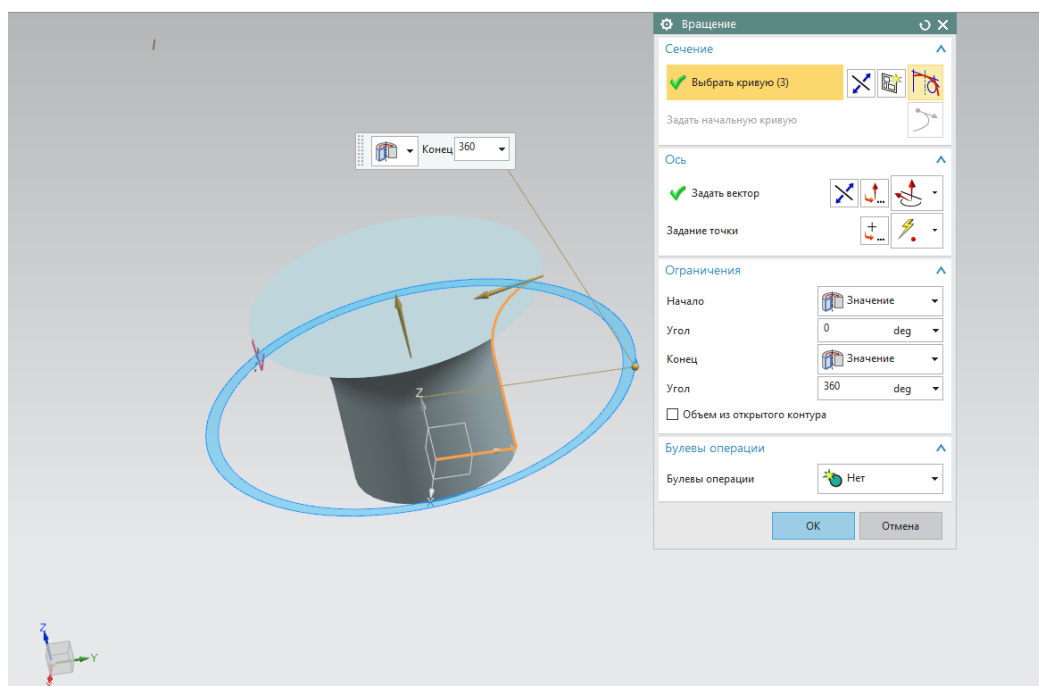
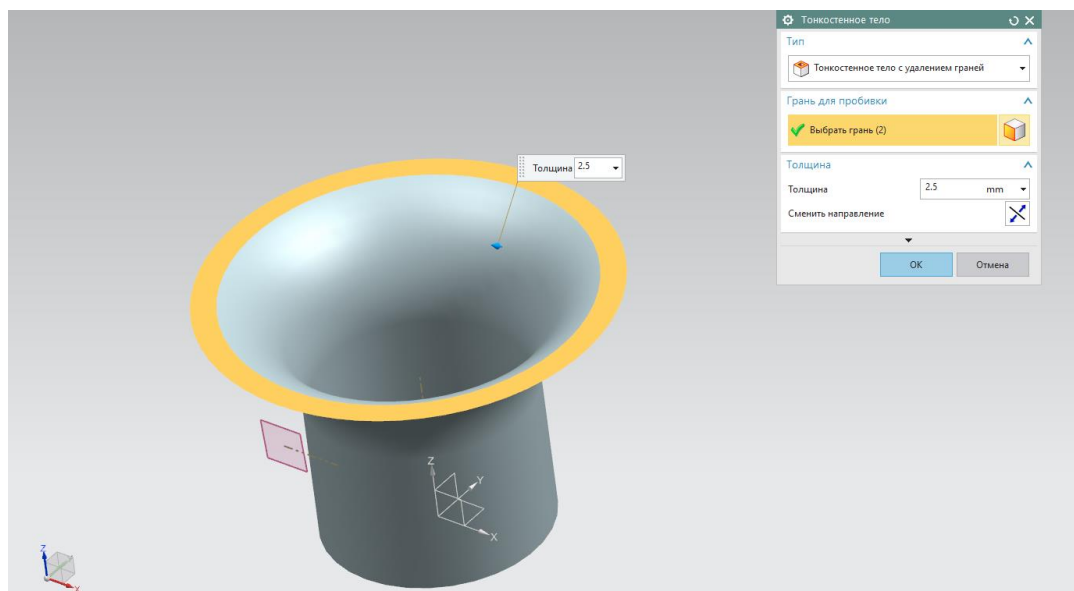


Рис. 4. Моделирование входа турбохолодильника: операция «Вращение»  
Fig. 4. Simulation of the cooling turbine inlet: 'Rotation' operation



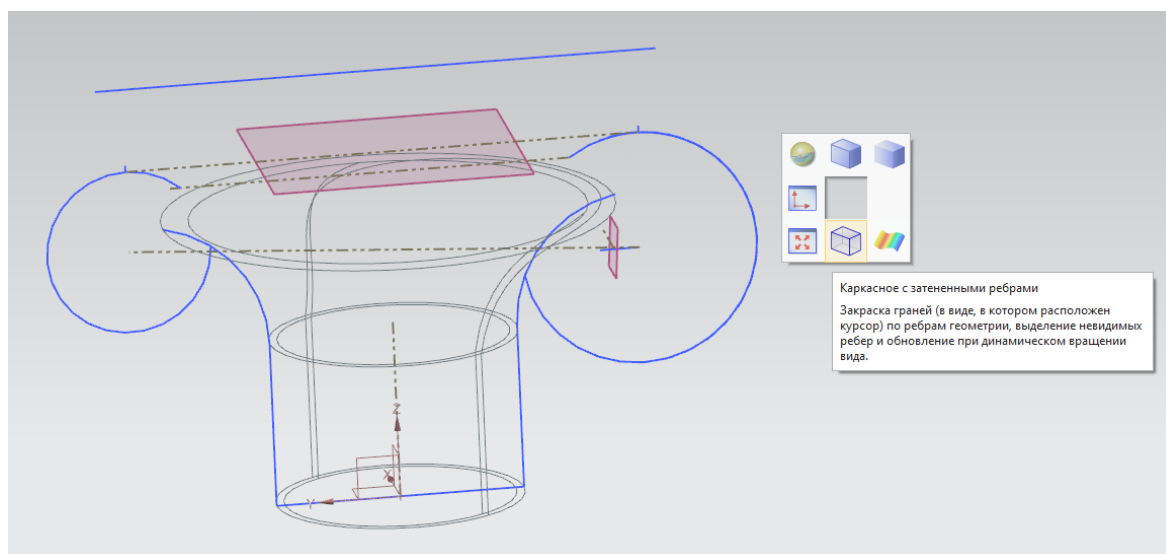


**Рис. 5. Моделирование прохода для воздушного потока**  
**Fig. 5. Simulation of a passage for air flow**

Далее был использован инструментальный каскадного изображения модели. Для этого в свободной части рабочего стола зажимается правая кнопка мыши и выбирается необходимый вид представленной модели. Такой способ позволяет сосредоточиться только на построении эскиза для будущей «улитки». Интерфейс инструментария продемонстрирован на рис. 6.

Простота использования вспомогательных поверхностей облегчает построение эс-

кизов под углом. При создании эскиза «улитки» создается также вспомогательная линия с требуемым углом отклонения относительно оси Оу. Любую построенную линию можно преобразовать во вспомогательную (без потери ее полного функционала). Для этого в окне построения эскиза была выбрана необходимая линия, щелчком правой кнопки мыши открыто выпадающее меню работы с эскизом, затем выбрана функция «преобразование во вспомогательный» (рис. 7).



**Рис. 6. Моделирование «улитки» с помощью каскадного изображения**  
**Fig. 6. Simulation of a 'snail' using cascade image**

Использование таких линий позволяет быстро ориентироваться в постройке любой сложной конфигурации переходных форм модели.

Переменный диаметр не позволяет сделать вращение по направляющей, поэтому использовалась функция «заметание», она позволяет создавать поверхность различной формы вдоль кривой. Необходимо использовать ленточный *проводник NX*. В диалоговом

окне, представленном на рис. 8, данный функционал реализован.

Такой подход позволяет NX распознать имеющиеся сечения как общее целое, а не как набор различных линий. В теме ниже была выбрана опция «направляющая линия», в результате получили поверхность разной диаметральной формы. Для построения симметричной части использована функция «зеркальная геометрия», рис. 9.

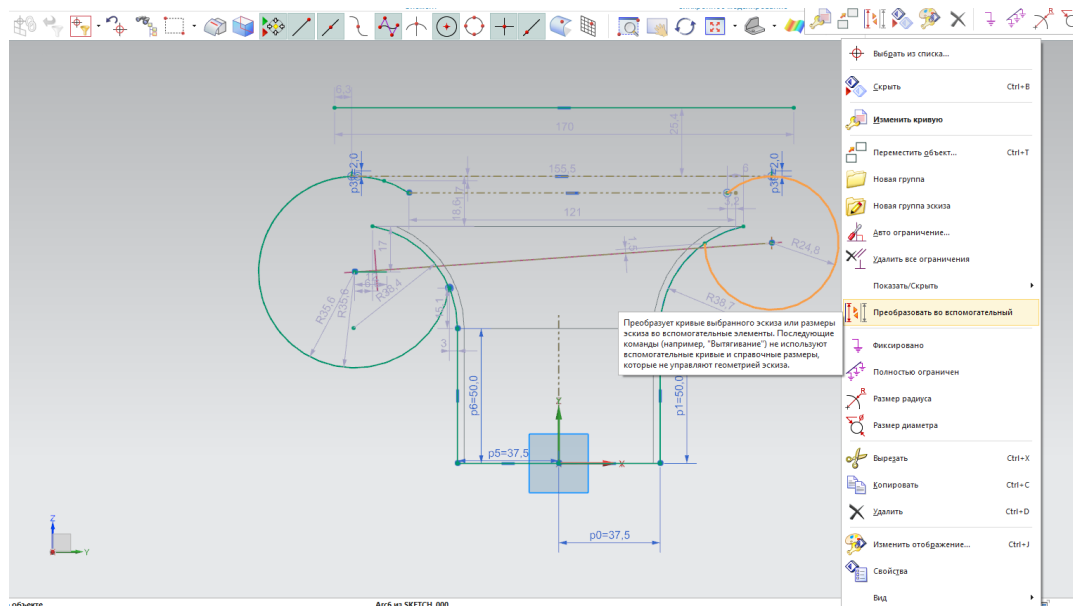


Рис. 7. Построение модели «улитки»: вспомогательные построения  
Fig. 7. Designing of a 'snail' model: auxiliary constructions

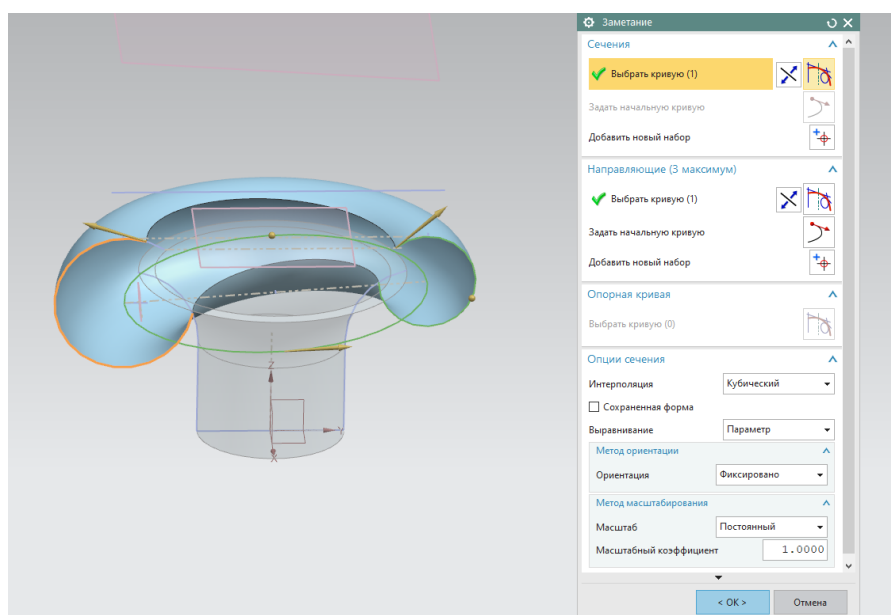
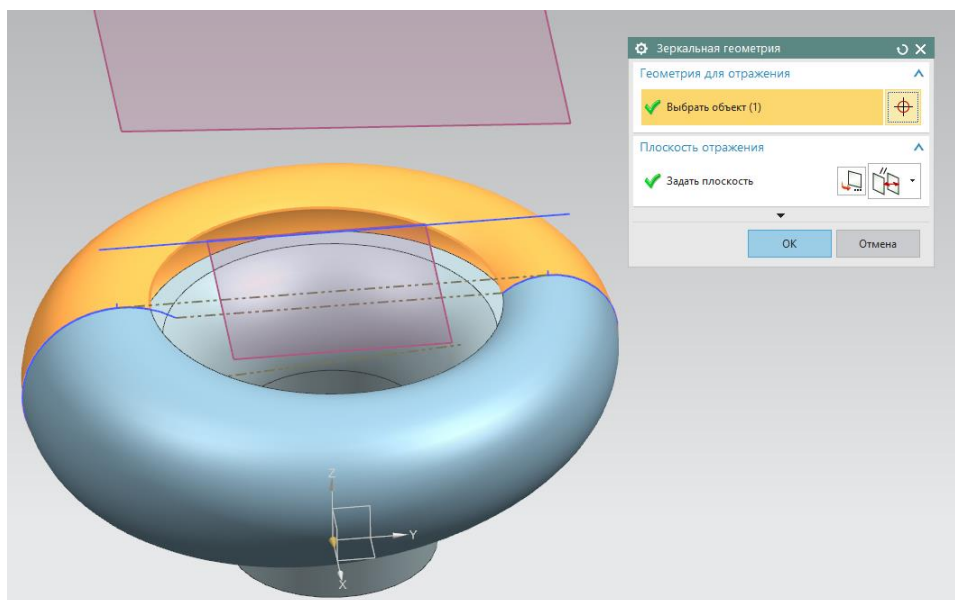


Рис. 8. Проектирование «улитки»  
Fig. 8. Designing a 'snail'



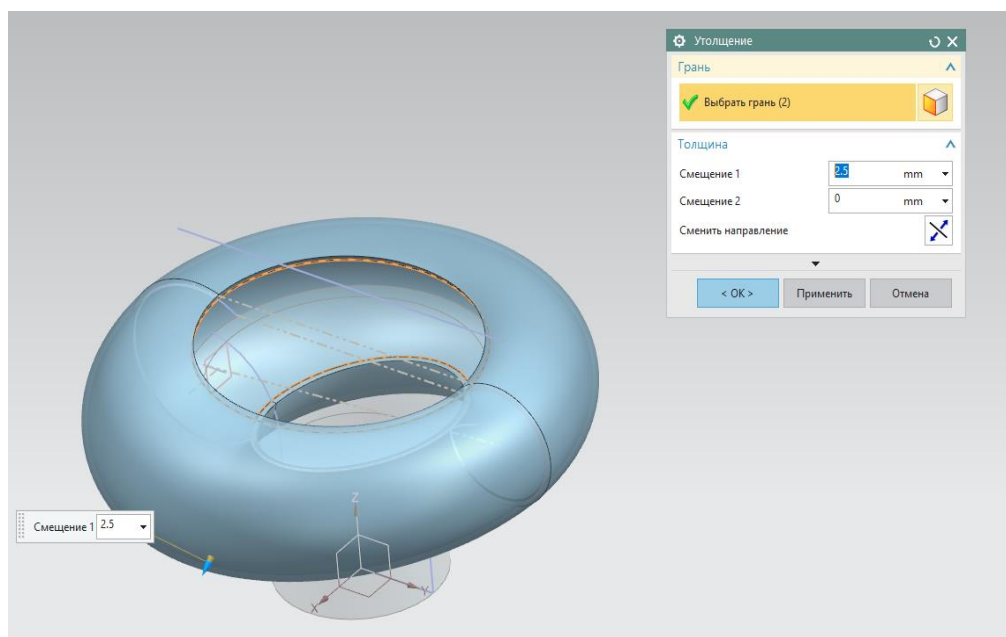
**Рис. 9. Моделирование «улитки»**  
**Fig. 9. 'Snail' simulation**

Созданные поверхности являются вспомогательными, для придания им толщины была использована функция «утолщение», рис. 10. Выделение соответствующих плоскостей «улитки» позволяет NX построить необходимое твердое тело с соответствующей толщиной.

Моделирование корпуса турбохолодильника выполнено с помощью функции «выдавливание». Из заданного диаметра окруж-

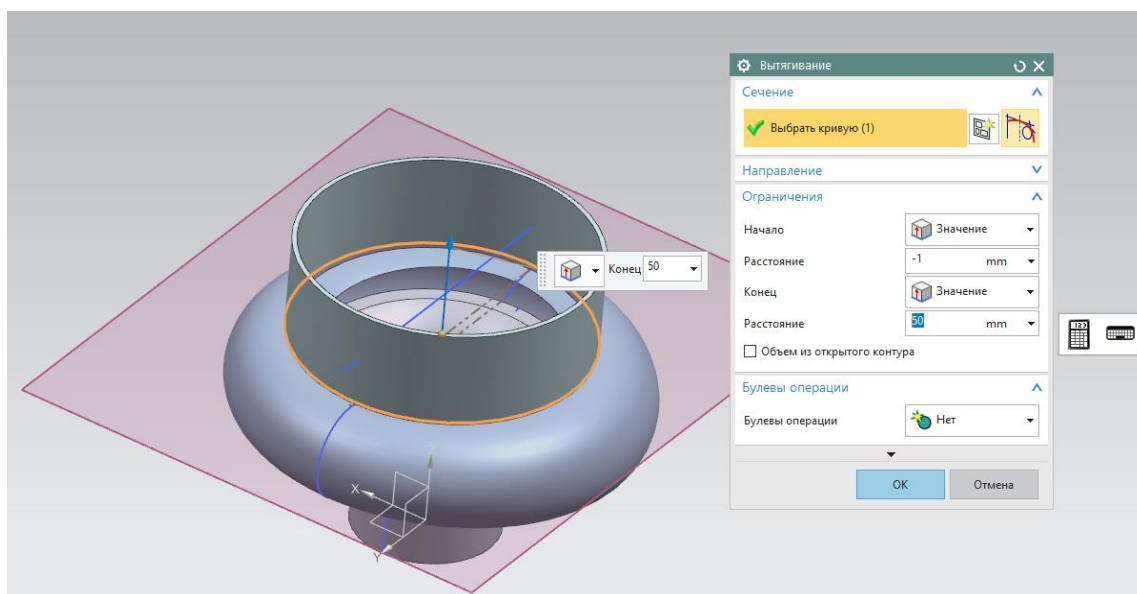
ности корпуса выдавливается полнотелый объект заданной длины. Для создания пустотелой модели была использована функция «тонкостенное тело». В результате получили модель, представленную на рис. 11.

Следующая часть геометрии турбохолодильника также представляет собой тело вращения. Поэтому для его построения была использована функция «вращение», описанная выше.



**Рис. 10. Придание толщины «улитке»**  
**Fig. 10. Thickening the 'snail'**





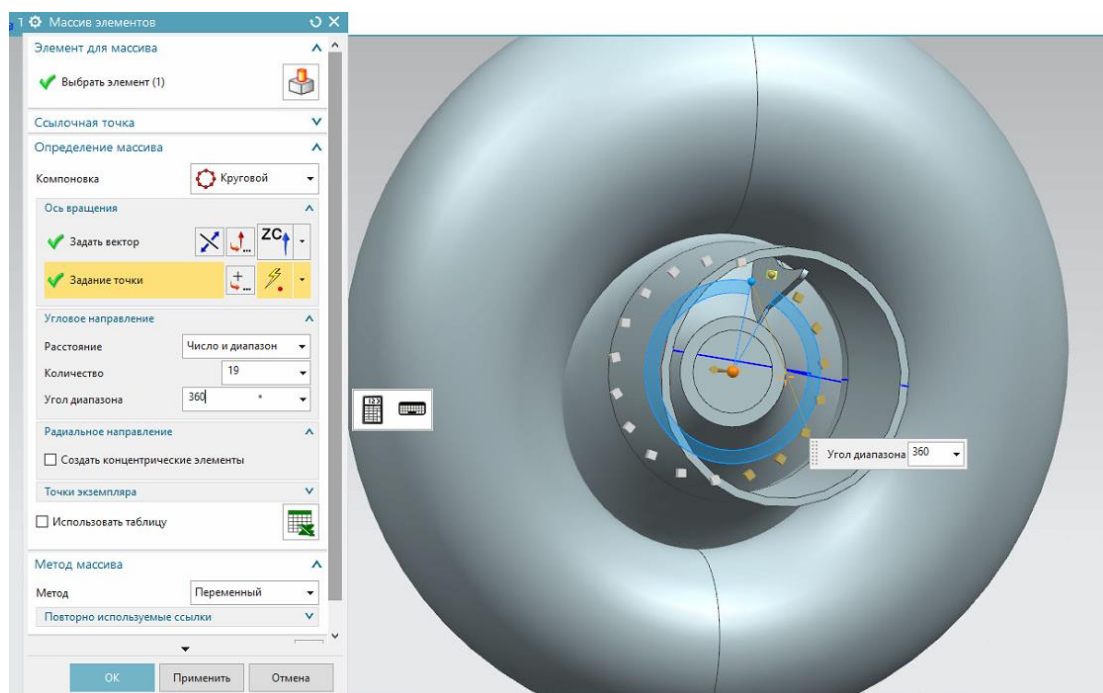
**Рис. 11. Создание корпуса турбохолодильника**  
**Fig. 11. Designing a cooling turbine housing**

Конструкция турбохолодильника включает в себя лопасти. Создание лопастей выполнялось в два этапа:

- моделирование одной лопасти с помощью выдавливания;
- построение всех лопастей путем вращения первой лопасти вдоль вспомогательной линии или оси Oz.

Для выполнения второго этапа нужно непременно задать количество лопастей вентилятора. Данный параметр указывается в диалоговом окне «массив элементов», рис. 12.

Аналогично была построена вторая часть турбохолодильника с учетом отличия в габаритных размерах. Построенный турбохолодильник представлен на рис. 13.



**Рис. 12. Создание лопастей вентилятора**  
**Fig. 12. Designing fan blades**



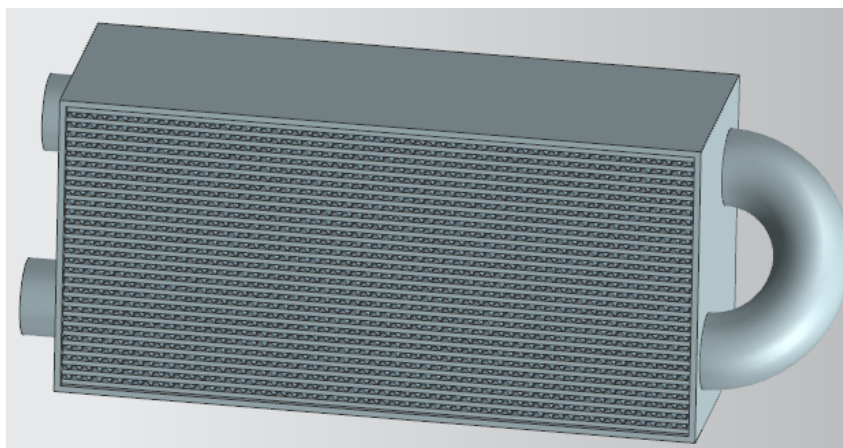
**Рис. 13. Модель турбоохладителя с каркасным выделением невидимых элементов**  
**Fig. 13. Model of a cooling turbine with the frame selection of invisible elements**

**Моделирование «радиатора».** Радиатор служит для охлаждения потока, поступающего от двигателей и от вспомогательной силовой установки. Горячий поток проходит через трубу в радиаторе и охлаждается.

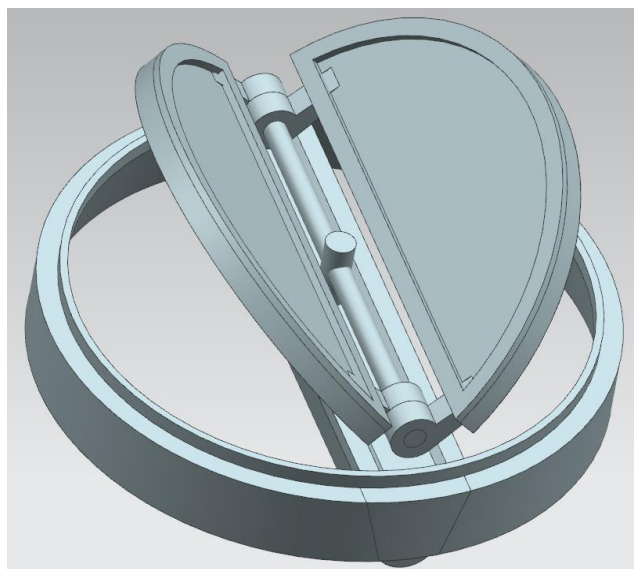
Для начала был смоделирован корпус радиатора, после чего – вертикальные пластины, и затем размножены операцией «массив». Следующим шагом стало моделирова-

ние трубы. Готовая модель представлена на рис. 14.

**Моделирование «клапана».** Клапан в системе кондиционирования регулирует циркуляцию воздушного потока. Для моделирования клапана были в соответствующей очередности использованы вышеописанные операции. Полученная модель представлена на рис. 15.



**Рис. 14. Модель радиатора**  
**Fig. 14. Radiator model**



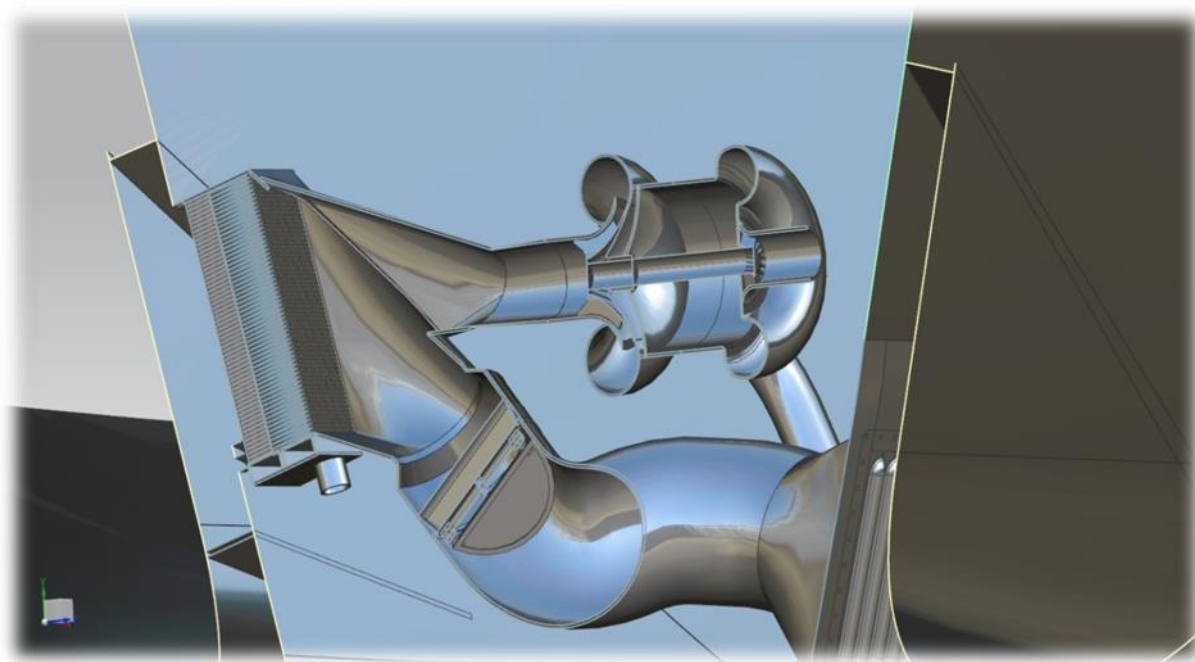
*Рис. 15. Клапан обратный*  
*Fig. 15. Check valve*

Моделирование других компонентов конструкции системы кондиционирования не представляет особенной сложности, поскольку в основе своей это «трубопроводные тела». Их построение с помощью инструментария системы NX выполняется с помощью типовых операций.

**Итоговая модель.** Готовая модель актуальной части конструкции системы кондиционирования для численного эксперимента

представлена на рис. 16.

Эта модель представляет собой тоже сборку, поскольку описанные выше модели агрегатов являются ее компонентами. Соответственно, для формирования этой комплексной модели был также задействован арсенал операций по созданию сборок, позиционированию компонентов и наложению сборочных связей.



*Рис. 16. Готовая 3d-модель с разрезом*  
*Fig. 16. Finished 3d model with a section*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы построена 3d-модель системы кондиционирования самолета, которая позволит в цифровой среде инженерных расчетов смоделировать процессы внешней и внутренней аэродинамики, влияющие на параметры состояния прочности жалюзийной решетки.

Помимо этого, построенная модель поз-

воляет пользователю получить наглядную картину конструкции оригинала. Инструментарий управления видами модели в CAD-программе дает возможность оценить особенности геометрии построенного объекта, как в общем виде, так и изучить детально его элементы. Особенный интерес представляет возможность визуализации внутренних полостей элементов конструкции.

## Список источников

1. Еловенко Д. А., Мироненко В. В. Рациональные методы редактирования CAD-моделей на этапе их подготовки к анализу в CAE-системах // Вестник Байкальского союза стипендиатов DAAD. 2013. № 1. С. 26–34.
2. Стрекоз А. В., Сидоренко В. В., Ледовских И. В. Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) элерона из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с применением метода конечных элементов (МКЭ) // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2019. № 6. С. 122–133. <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2019-6-122-133>.
3. Пронин А. И., Щелкунов Е. Б., Султангареева А. С., Латышев К. А., Иваненко А. А. Исследование и разработка конструкции детали кронштейна с использованием CAD/CAE систем // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Серия: Науки о природе и технике. 2017. № 1-1(29). С. 27–32. [https://doi.org/10.17084/2017.1-1\(29\)](https://doi.org/10.17084/2017.1-1(29)).
4. Protasov A. V., Nikolaychuk O. A. Applying the finite-element method for evaluating the reliability of mechanical systems // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2011. Vol. 40. No. 1. P. 27–30. <https://doi.org/10.3103/S105261881101016X>.
5. Klochkov Y. V., Nikolaev A. P., Vakhnina O. V., Kiseleva T. A. Stress-strain analysis of a thin-shell part of fuselage using a triangular finite element with Lagrange multipliers // Russian Aeronautics. 2016. Vol. 59. No. 3. P. 316–323. <https://doi.org/10.3103/S1068799816030041>.
6. Рыжиков И. Н., Нгуен Тьен Куэт. Использование пружинно-массово-демпферных моделей при анализе колебаний и долговечности рабочих колес турбомашин с расстройкой параметров // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 4. С. 756–767. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-756-767>.
7. Иващенко А. П. Исследование статической прочности шестерни, входящей в состав вала-шестерни // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 11-1. С. 31–36. <https://doi.org/10.17513/snt.38334>.
8. Лашков В. А., Калимуллин Ф. А., Каратаев О. Р., Усманов Р. А. Трехмерное проектирование и инженерный анализ элементов конического редуктора в системе Autodesk Inventor // Вестник Казанского технологического университета. 2020. Т. 23. № 5. С. 94–97.
9. Zenkov E. V. Update of the equations of the limit state of the structural material with the realization of their deformation // Journal of Physics Conference Series. 2017. Vol. 944. Iss. 1. P. 012128. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012128>.
10. Распопина В. Б., Бодров Е. А., Ковалёв А. А. Оценка параметров прочности шатуна ДВС в автоматизированной среде модуля APM Structure 3D системы APM WinMachine // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2011. № 01. С. 125–137.
11. Марков С. П., Распопина В. Б. Система Femap with NX Nastran как инструмент для оценки достоверности результатов численного эксперимента в среде программы APM FEM в КОМПАС-3D // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. статей XIV Междунар. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 22 декабря 2020 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2020. С. 45–52.
12. Жильцов Ю. В., Ёлшин В. В. Использование программного комплекса ANSYS CFX при разработке модели комбинированного котла // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 3. С. 81–90. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-81-90>.
13. Leonovich D. S., Zhuravlev D. A., Karlina Yu. I., Gorkov A. S. Automated assessment of the low-rigid composite parts influence on the product assimilability in the GePARD system // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 760. Iss. 1. P. 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/760/1/012038>.
14. Dizon J. R. C., Espera A. H., Chen Qiyi, Advincula R. C. Mechanical characterization of 3D-printed polymers // Additive Manufacturing. 2017. Vol. 20. P. 44–67. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>.
15. Novikov A. D., Reznik S. V., Denisov O. V. An experimental study to determine mechanical and thermophysical characteristics of thin-walled carbon plastic antenna reflectors // BMSTU Journal of Mechanical Engineering. 2020. No. 3. P. 84–91. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-3-84-91>.
16. Гайдаржи Ю., Коляда Е. Цифровой подход для подготовки к сертификации авиационной техники // САПР и графика. 2021. № 1. С. 12–15.
17. Глушков Т. Д. Исследования компактных вентиляторных установок с переменной циркуляцией по длине лопаток рабочего колеса // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 1. С. 30–42. <https://doi.org/10.34759/vst-2020-1-30-42>.



18. Leggett J., Priebe S., Shabbir A., Michelassi V., Sandberg R., Richardson E. Loss prediction in an axial compressor cascade at off-design incidences with free stream disturbances using large eddy simulation // *Journal of Turbomachinery*. 2018. Vol. 140. No. 7. P. 071005. <https://doi.org/10.1115/1.4039807>.

19. Рыжиков И. Н. Использование пружинно-массово-демпферных моделей при анализе колебаний рабочих колес энергетических турбомашин с расстройкой па-

раметров // *Системы. Методы. Технологии*. 2020. № 4. С. 20–25. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2020-4-20-25>.

20. Юргенсон А. А. Учебно-боевой самолет Як-130 // Приложение журнала «Моделист-конструктор». 2006. № 9. 32 с.

21. Данилов Ю., Артамонов И. Практическое использование NX. М.: ДМК Пресс, 2011. 332 с.

## References

1. Elovenko D. A., Mironenko V. V. Rational methods for CAD models editing at the stage of their preparation for the analysis in CAE systems. *Vestnik Bajkal'skogo soyuza stipendiatov DAAD = Letter der DAAD - Stipendiaten*. 2013;1:26-34. (In Russ.).
2. Strekoz A. V., Sidorenko V. V., Ledovskih I. V. Analysis of the stress-strain state (SSS) of ailerons from polymer composite materials (PCM) using the finite element method (FEM). *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2019;6:122-133. (In Russ.). <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2019-6-122-133>.
3. Pronin A. I., Shchelkunov Ye. B., Sultangareeva A. Ye., Latyshev K. A., Ivanenko A. A. Research and working out of the bracket part with CAD/CAE systems. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nauki o prirode i tekhnike = Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University*. 2017;1-1(29):27-32. (In Russ.). [https://doi.org/10.17084/2017.1-1\(29\)](https://doi.org/10.17084/2017.1-1(29)).
4. Protasov A. V., Nikolaychuk O. A. Applying the finite-element method for evaluating the reliability of mechanical systems. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2011;40(1):27-30. <https://doi.org/10.3103/S105261881101016X>.
5. Klochkov Y. V., Nikolaev A. P., Vakhnina O. V., Kiseleva T. A. Stress-strain analysis of a thin-shell part of fuselage using a triangular finite element with Lagrange multipliers. *Russian Aeronautics*. 2016;59(3):316-323. <https://doi.org/10.3103/S1068799816030041>.
6. Ryzhikov I. N., Nguyen Tien Q. The use of the spring-mass-damping model for the analysis of vibrations of the mistuned power turbomachines impeller. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(4):756-767. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-756-767>.
7. Ivaschenko A. P. Research of the static strength of a pinion which is part in a pinion-shaft. *Sovremennii naukoemkie tekhnologii = Modern high technologies*. 2020;11-1:31-36. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/snt.38334>.
8. Lashkov V. A., Kalimullin F. A., Karataev O. R., Usmanov R. A. Three-dimensional design and engineering analysis of elements of a conic reducer in the Autodesk inventor system. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2020;23(5):94-97. (In Russ.).
9. Zenkov E. V. Update of the equations of the limit state of the structural material with the realization of their deformation. *Journal of Physics Conference Series*. 2017;944(1):012128. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012128>.
10. Raspopina V. B., Bodrov E. A., Kovalyov A. A. Assessment of strength parameters in regard of a DBC connecting rod in the automated surroundings of an APM structure 3D component cell pertaining to an APM Win Machine system. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2011;1:125-137. (In Russ.).
11. Markov S. P., Raspopina V. B. Femap with NX Nas-tran system as a reliability assessment tool of numerical experiment results in the environment of the APM FEM program in COMPASS-3D. *Aviamashinostroyeniye i transport Sibiri: sbornik statej XIV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Aircraft Engineering and Transport of Siberia: collected articles of the 14th International Scientific and Practical Conference*. 22 December, 2020. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2020, 45-52. (In Russ.).
12. Zhiltsov Yu. V., Elshin V. V. Use of ANSYS CFX software for combined boiler model development. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(3):81-90. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-81-90>. (In Russ.).
13. Leonovich D. S., Zhuravlev D. A., Karlina Yu. I., Govorkov A. S. Automated assessment of the low-rigid composite parts influence on the product assimilability in the GePARD system. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;760(1):012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/760/1/012038>.
14. Dizon J. R. C., Espera A. H., Chen Qiyi, Advincula R. C. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*. 2017;20:44-67. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>.
15. Novikov A. D., Reznik S. V., Denisov O. V. An experimental study to determine mechanical and thermophysical characteristics of thin-walled carbon plastic antenna reflectors. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2020;3:84-91. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-3-84-91>.
16. Gaidargi U., Kolada E. Digital approach for preparation for aviation equipment certification. *SAPR i grafika*. 2021;1:12-15. (In Russ.).
17. Glushkov T. D. The study of compact fan installations with variable circulation distribution along blade



length. *Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta = Aerospace MAI Journal*. 2020;27(1):30-42. <https://doi.org/10.34759/vst-2020-1-30-42>. (In Russ.).  
18. Leggett J., Priebe S., Shabbir A., Michelassi V., Sandberg R., Richardson E. Loss prediction in an axial compressor cascade at off-design incidences with free stream disturbances using large eddy simulation. *Journal of Turbomachinery*. 2018;140(7):071005. <https://doi.org/10.1115/1.4039807>.  
19. Ryzhikov I. N. The use of the spring-mass-damping

model for the analysis of vibrations of the mistuned power turbomachines impeller. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*. 2020;4:20-25. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2020-4-20-25>. (In Russ.).  
20. Yurgenson A. A. Combat training aircraft Yak-130. *Prilozhenie zhurnala "Modelist-konstruktor"*. 2006;9:32 p. (In Russ.).  
21. Danilov Yu., Artamonov I. *Practical use of NX*. Moscow: DMK Press; 2011, 332 p. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Боев Арсений Федорович**,  
студент,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

**Карпов Иван Викторович**,  
студент,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

**Распопина Вера Борисовна**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры самолетостроения и эксплуатации  
авиационной техники,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

## Вклад авторов

Боев А. Ф., Карпов И. В. изучали принцип функционирования и анализировали конструкцию типовой системы кондиционирования самолета, формировали 3D-модель системы, описывали операции построения моделей;  
Распопина В. Б. руководила проектом, систематизировала полученный материал и подготовила рукопись данной статьи.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Информация о статье

Статья поступила в редакцию 13.09.2021; одобрена после рецензирования 18.01.2022 принята к публикации 23.03.2022.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Arseniy F. Boev**,  
Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

**Ivan V. Karpov**,  
Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

**Vera B. Raspopina**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Aircraft  
Engineering and Operation of Aviation Equipment,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

## Contribution of the authors

Boev A. F., Karpov I. V. studied the operation principle and analyzed the design of a standard aircraft air conditioning system, formed a 3D model of the system, described the model building operations.  
Raspopina V. B. supervised the project, systemized the received material and wrote the article.

## Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

## Information about the article

The article was submitted 13.09.2021; approved after reviewing 18.01.2022; accepted for publication 23.03.2022.