

УДК 621.452.22

**В.В. Ветров, П.Д. Шилин**

Тульский государственный университет, Тула, Россия

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДРОССЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУХОЗАБОРНЫХ УСТРОЙСТВ**

Сейчас без преувеличения можно утверждать о существовании новой мощной альтернативы, пришедшей на замену физическому эксперименту. CFD методы позволяют решить большой перечень практических задач. Однако важным вопросом любого численного исследования является оценка адекватности полученных численных прогнозов. При проведении численного исследования нужно начинать с решения тестовой задачи, решение которой уже хорошо известно из более ранних и достоверных исследований (натурных или аналитических). При решении тестовой задачи проводится настройка и верификация математической модели. В связи с чем в данной работе приводятся результаты численного моделирования обтекания конфигураций кольцевых ВЗУ, располагаемых в межкалиберном пространстве, с различными геометрическими параметрами центрального тела, определяющие основные параметры, характеризующие их газодинамическое совершенство. Показана методика проведения вычислительного эксперимента по определению дроссельных характеристик. На основе сравнения расчетов с экспериментальными данными дается заключение о возможности применения программного комплекса ANSYS Fluent для дальнейшего использования при решении аналогичных задач.

**Ключевые слова:** воздухозаборное устройство, ВЗУ, численное моделирование, математическое моделирование, дроссельная характеристика, коэффициент восстановления давления, коэффициент расхода воздуха, вычислительная газовая динамика, верификация, уравнения Навье-Стокса, программные комплексы, ANSYS Fluent, CFD-пакеты, сверхзвуковые течения, неструктурированные сетки.

**Vetrov V.V., Shilin P.D.**

Tula State University, Tula, Russia

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF THROTTLE CHARACTERISTICS OF AIR INTAKE DEVICES**

Now, without exaggeration, it is possible to assert the existence of a new powerful alternative that has come to replace the physical experiment. CFD methods allow you to solve a large list of practical problems. However, an important issue of any numerical study is the assessment of the adequacy of the numerical forecasts obtained. When conducting a numerical study, you need to start with solving a test problem, the solution of which is already well known from earlier and reliable studies (in-situ or analytical). When solving a test problem, the mathematical model is configured and verified. In this connection, this paper presents the results of numerical simulation of the flow of configurations of annular air intake device located in the inter-caliber space with various geometric parameters of the central body, which determine the main parameters characterizing their gas-dynamic perfection. The method of conducting a computational experiment to determine throttle characteristics is shown. Based on a comparison of calculations with experimental data, a conclusion is made about the possibility of using the ANSYS Fluent software package for further use in solving similar problems.

**Keywords:** air intake device, numerical modeling, mathematical modeling, throttle response, pressure recovery coefficient, air flow coefficient, computational gas dynamics, verification, Navier-Stokes equations, software packages, ANSYS Fluent, CFD packages, supersonic flows, unstructured grids.

Появление численных методов – длительный, поступательный процесс развития технологий. Прогресс стал возможным благодаря созданию быстродействующих электронных вычислительных машин. Приблизительно

к середине двадцатого века сложились наиболее подходящие условия для решения целого спектра острых проблем. Именно с этого времени вычислительные методы развиваются по нарастающей экспоненте. Следует отметить

еще один важный факт – изменились условия и принципы проведения исследований в теоретической гидродинамике, что в свою очередь значительно повлияло на методы решения инженерных задач. Если в предыдущие годы применялся традиционный методический набор – аналитические и экспериментирование методы, то сейчас сформировался третий метод исследований – вычислительная газовая динамика (англ. computational fluid dynamics (CFD)).

На данный момент в мире существует ряд универсальных программных продуктов для решения задач вычислительной газовой динамики. Среди ведущих пакетов можно выделить «ANSYS Fluent», позволяющий проводить моделирование широкого класса физических процессов в научных и инженерных областях [1].

Активное становление и развитие вычислительной газовой динамики как научного направления прикладного характера, в частности, при решении современных задач освоения высоких скоростей в авиастроении, стимулирует установление строгих стандартов определения степени достоверности и области применимости создаваемых компьютерных моделей [2, 3].

CFD-методы переживают время бурного развития. Область их применения неуклонно расширяется, а результативность моделирования увеличивается, но применение указанных методов не всегда может оправдать ожидания пользователя и причин этому несколько. Одна из них – отсутствие методологической основы для проведения численных экспериментов. Для получения достоверных результатов необходима концептуально разработанная методика. Использование CFD-методов без четко разработанной методики приводят к получению недостоверных результатов [4]. Именно этим объясняется ограниченное применение численных методов и недоверие к ним, например, на предприятиях реального сектора экономики. Исходя из этого, в рамках проводимого исследования рассматривается методика проведения численного моделирования течений в воздухозаборных устройствах (ВЗУ).

Верификация, проводимая в данной работе, представляет собой совокупность исследова-

ний по оценке адекватности выбранной математической модели реально существующим рабочим процессам, протекающим в объекте исследования [5].

После решения тестовой задачи и успешной верификации математической модели можно с определенной степенью достоверности применить данную модель для решения новых аналогичных задач [6].

Целью данной работы является анализ вычислительной эффективности широко известного комплекса ANSYS Fluent, проблемно-ориентированного на исследование основных рабочих характеристик ВЗУ. При этом верификация будет проводиться на основе сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными.

Объектами исследования являлись кольцевые ВЗУ с различной конфигурацией центрального тела перед его входом, что в свою очередь позволяет создать различную предысторию потока. Отобранные для моделирования варианты (рис. 1) из большого многообразия, представленного в [7], обладали наибольшим количеством отличительных признаков. Для вариантов 1 и 2 подобие заключается в обнижении перед входом в ВЗУ, однако при этом отличительными признаками от других моделей являлось различное удлинение центрального тела и его поперечный диаметр. Варианты 3 и 4 наоборот не имели обнижения, при этом длина центрального тела малого диаметра изменялась в несколько раз относительно друг друга и других моделей.

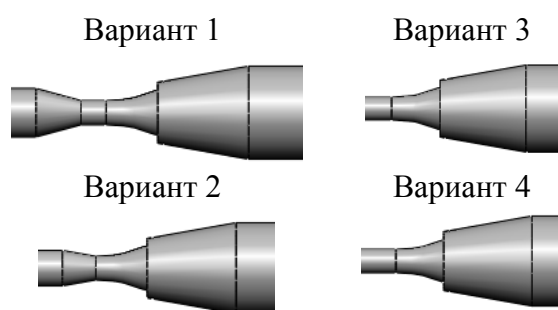


Рис. 1. Конфигурации объекта исследования

Характерной особенностью штатных испытаний ВЗУ является определение основных параметров, характеризующих газодина-

мическое совершенство. Оно оценивается значениями дроссельной характеристики  $\sigma(\varphi)$ , т.е. зависимостью коэффициента восстановления полного давления ВЗУ  $\sigma$  от коэффициента расхода воздуха  $\varphi$ . Дроссельная характеристика, представляет собой совокупность экспериментальных точек, полученных при дросселировании ВЗУ, для постоянных параметрах набегающего потока и геометрии воздушного тракта.

Характеристики ВЗУ часто имеют обратно-пропорциональную зависимость, что затрудняет их исследование. При проектировании важно учитывать, что увеличение коэффициента восстановления полного давления сопровождается повышением коэффициента дополнительного аэродинамического сопротивления. В то же время повышение коэффициента расхода на нерасчетных режимах может негативно сказаться на коэффициенте восстановления полного давления в области расчетных чисел Маха. [8, 9] В силу такой зависимости характеристик друг от друга и от геометрии исследуемого ВЗУ существует необходимость численного моделирования каждого варианта конструкции.

Коэффициент восстановления полного давления  $\sigma$  определяется выражением:

$$\sigma = \frac{P_{oB}}{P_{0\infty}}, \quad (1)$$

где  $P_{oB}$  – полное давление в канале ВЗУ;  $P_{0\infty}$  – давление торможения невозмущенного потока;

Коэффициент расхода воздуха  $\varphi$ , находится по формуле:

$$\varphi = \frac{F_B}{F_\infty}, \quad (2)$$

где  $F_B$  – площадь поперечного сечения струи набегающего потока, захватываемой ВЗУ;  $F_\infty$  – площадь входа ВЗУ.

Для решения задач пространственного обтекания широко применяются осредненные по Рейнольдсу системы уравнений Навье-Стокса, а для замыкания используются дифференциальные модели турбулентности. Все эти модели содержат различное число эмпи-

рических констант, которые справедливы лишь для определенных условий. За более чем полувековой период развития моделей турбулентности, опыт их применения при решении различных задач показал, что та или иная модель, как правило, позволяет получить приемлемые результаты только для ограниченного класса течений. В качестве примера можно привести популярные  $k-\omega$  и  $k-\varepsilon$  модели турбулентности в своих классических реализациях. Если первая модель корректно работает при описании пристеночной области, то вторая демонстрирует хорошие результаты при расчете свободных сдвиговых течений в отсутствии влияния стенок.[3]

В связи с этим в данных исследованиях использована  $k-\omega$  SST-модель, являющаяся комбинацией  $k-\varepsilon$  и  $k-\omega$  моделей турбулентности. Это низкорейнольдсовая модель стала своего рода стандартом для инженерных приложений. Требования к плотности сетки здесь те же, что и у  $k-\omega$  модели и  $k-\varepsilon$  модели, однако эта модель лишена некоторых недостатков [10, 11].

Моделирование трехмерного поля течения около представленных конфигураций проводилось с использованием конечно-элементных неструктурированных полиэдрических сеток, построенных в сеточном генераторе ANSYS Fluent Meshing. Для повышения точности расчетов сетка измельчена в области граней с максимальным размером  $10^{-4}$  м. Для лучшего решения в области пограничного слоя на твердых стенках модели построены структурированные призматические слои в количестве 10 с начальной толщиной  $10^{-6}$  м и коэффициентом роста 1,2. На рис. 2 (а, б) представлены различные фрагменты неструктурированной расчетной сетки, применявшейся для моделирования внешнего обтекания. Рис. 2 (а) дает представление о структуре сетки вблизи поверхности в центральном осевом сечении, а рис. 2 (б) показывает расчетную сетку на поверхности модели со сгущениями вблизи острых кромок.

Из рисунка хорошо видна степень сгущения ее узлов к обтекаемой поверхности и в области граней. Применявшиеся в расчетах сетки имели примерно 4,0...4,5 млн ячеек. Расстояние от первой расчетной точки до

стенки обеспечивало подходящий для используемой модели турбулентности диапазон значений нормированного расстояния  $y^+$  от 0,5 до 1,5 и являлось достаточно малым для определения местных аэродинамических характеристик у поверхности [12].

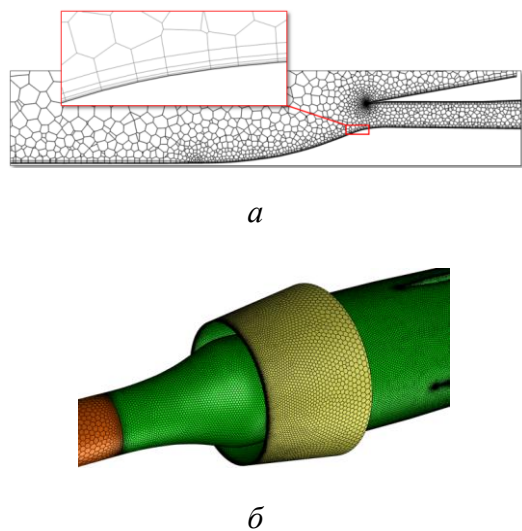


Рис. 2. Конечно-элементная сетка модели

Размеры области, в которой размещается модель, выбраны относительно большими – на всех границах расчетной области возмущения, вносимые в поток моделью, должны дис-

сипировать [13]. Входная граница задается условием входа сжимаемого потока по числу Маха (pressure far field). На выходной – условие свободного выхода и равенства нулю избыточного давления (pressure outlet), а поверхность задана твердой стеной без проскальзывания (wall).

Для расчета использовался решатель Pressure-Based с неявными параметрами. Для совместного решения уравнений движения и неразрывности использовался метод Coupled. Для расчета градиентов применялась схема Green-Gauss cell based (GGCB). Для оценки давления применялась схема второго порядка. Уравнение движения и уравнения для турбулентных характеристик решались с использованием противопоточной схемы второго порядка [14, 15].

В рамках выполняемой работы рассматриваются три режима скоростей потока: дозвуковой, трансзвуковой и сверхзвуковой. Результаты приведенных расчетов в сравнении с экспериментальными данными [7] представлены на рисунках 4–7. Для каждого из режимов исследовалось по две конфигурации планеров с различным центральным телом (цилиндрическое и цилиндрическое с обнижением).

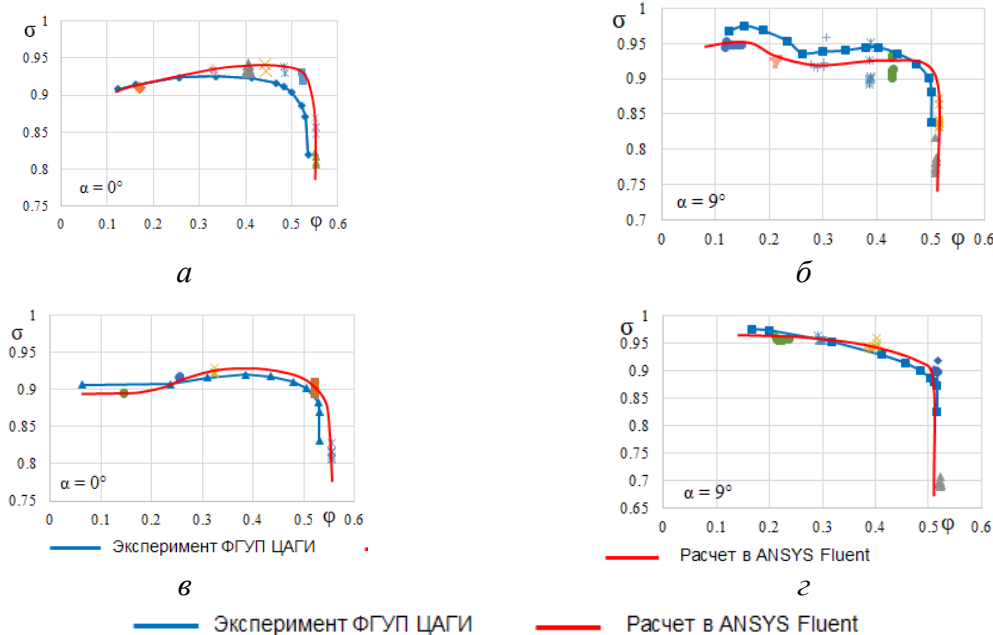


Рис. 4. Дроссельные характеристики при числе Маха  $M = 0,66$  для геометрии Варианта 1: а)  $\alpha = 0^\circ$ ; б)  $\alpha = 9^\circ$ ; и для геометрии Варианта 3: в)  $\alpha = 0^\circ$ ; г)  $\alpha = 9^\circ$

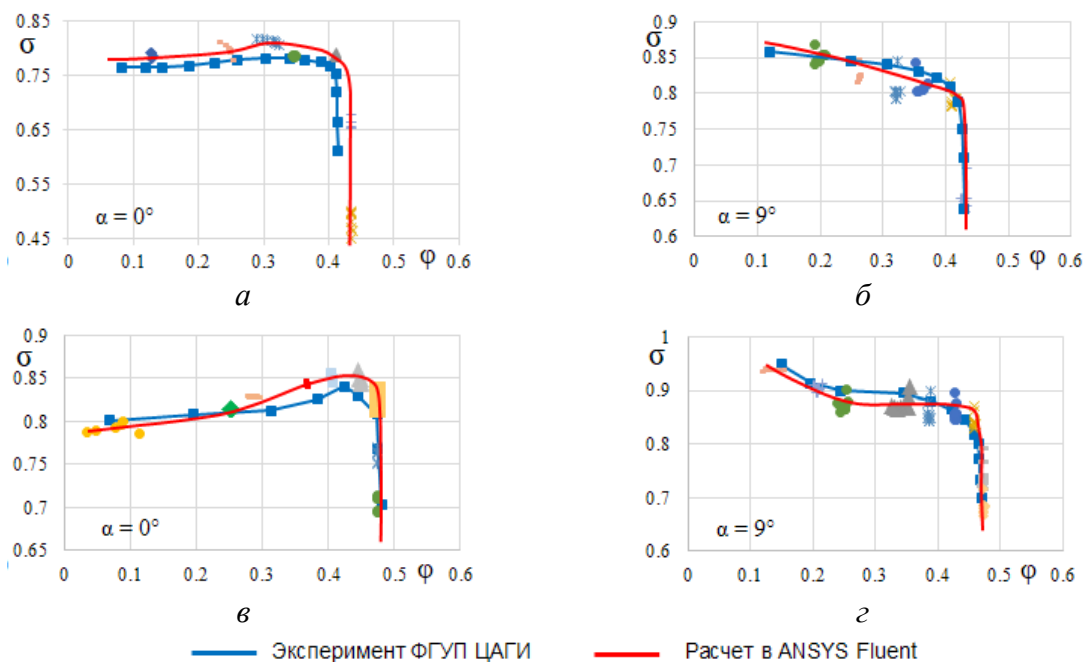


Рис. 5. Дроссельные характеристики при числе Маха  $M = 1,1$  для геометрии Варианта 1: а)  $\alpha = 0^\circ$ ; б)  $\alpha = 9^\circ$ ; и для геометрии Варианта 3: в)  $\alpha = 0^\circ$ ; г)  $\alpha = 9^\circ$

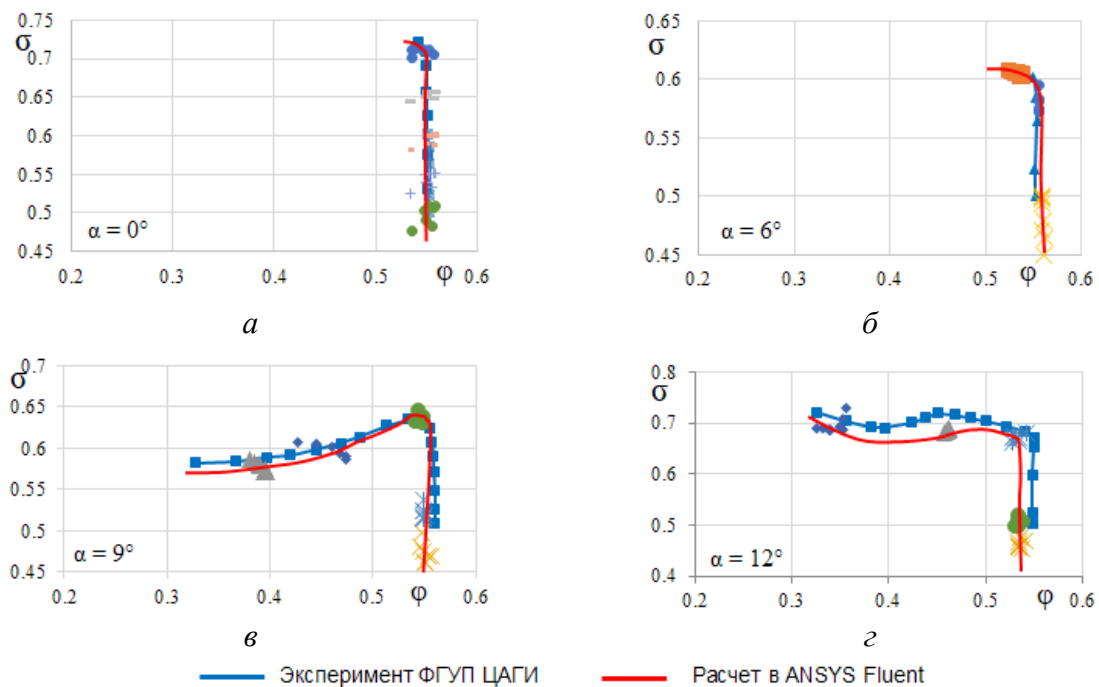


Рис. 6. Дроссельные характеристики при числе Маха  $M = 1,78$  геометрии Варианта 2 для: а)  $\alpha = 0^\circ$ ; б)  $\alpha = 6^\circ$ ; в)  $\alpha = 9^\circ$ ; г)  $\alpha = 12^\circ$ .

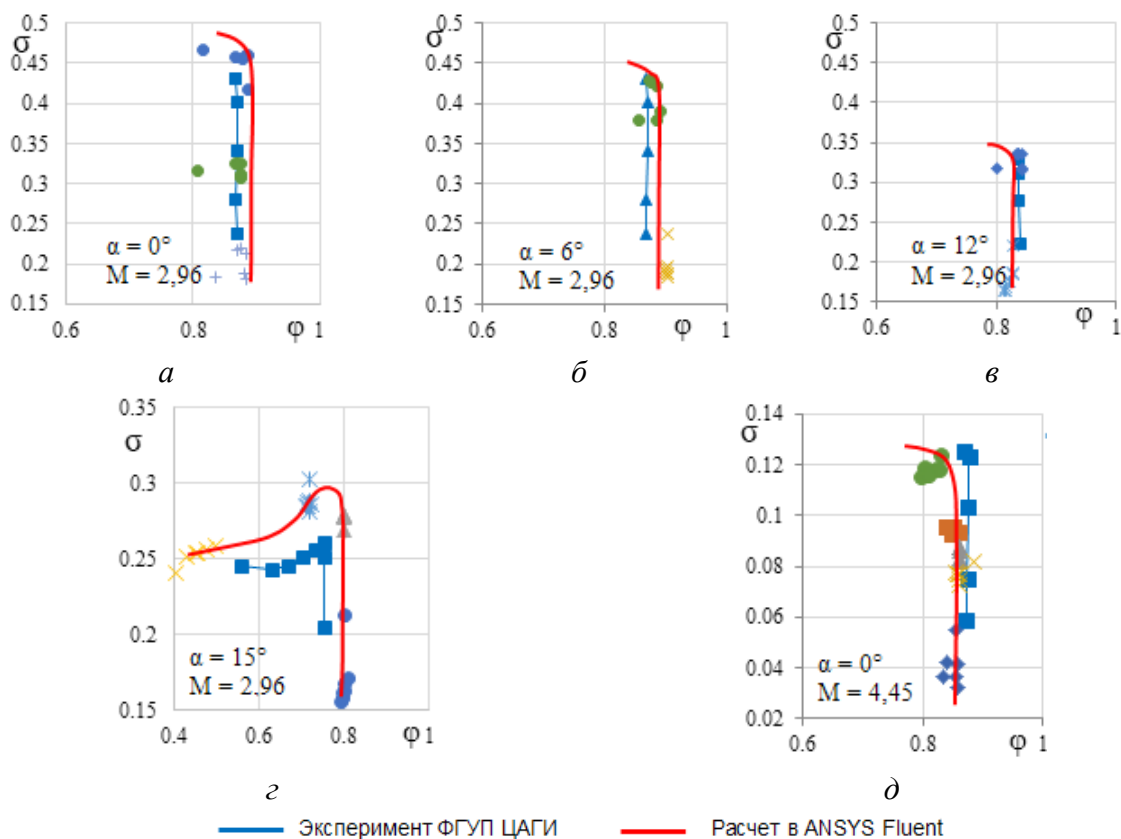


Рис. 7. Дроссельные характеристики геометрии Варианта 4 для: а)  $\alpha = 0^\circ$ ,  $M = 2,96$ ; б)  $\alpha = 6^\circ$ ,  $M = 2,96$ ; в)  $\alpha = 12^\circ$ ,  $M = 2,96$ ; г)  $\alpha = 15^\circ$ ,  $M = 2,96$ ; д)  $\alpha = 0^\circ$ ,  $M = 4,45$

В целом, как это следует из представленных результатов численного и физического экспериментов, имеет место весьма схожий характер изменения всех дроссельных характеристик. Результаты расчётов практически совпадают между собой. Основные расхождения наблюдаются у моделей с обнижением, а также у тех конфигураций, которые исследовались под углами атаки. Это объясняется достаточно грубой расчетной сеткой вне границ твердого тела, что позволяет сохранить приемлемые затраты времени на вычисления, а также можно сказать, что эти отклонения незначительны и находятся в пределах погрешности методов.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы: 1. Классический инженерный подход и современные вычислительные технологии (в комплексе) позволяют на каждом этапе разработки перспективного изделия значительно улучшить его конструктивные особенности – при заметном снижении всех возможных рисков.

2. Оптимизация конструкций и выбор геометрических характеристик воздухозаборных устройств на этапе предэскизного проектирования изделия с формированием его технического облика может производиться с использованием численных методов, в связи с чем виртуальные прототипы, в ряде случаев успешно заменяют «живые» модели, а по результатам их исследования решаются большинство проектных задач в области авиационной промышленности.

3. Для верификации использовались экспериментальные данные, полученные в аэродинамических трубах. Результаты численного моделирования сравнивались с имеющимися экспериментальными данными по значению коэффициента расхода воздуха и восстановления полного давления. Проведенная верификация показала хорошее согласование численного эксперимента с аэродинамическими продувками.

4. По итогам сопоставительного анализа расчетных и экспериментальных данных можно рекомендовать использованный вы-

числительный комплекс ANSYS Fluent в качестве инструментария для проведения численных экспериментов по изучению газодинамических процессов в ВЗУ для течений в широком диапазоне скоростей и определяющих параметров (геометрия центрального тела и тракта ВЗУ, толщина турбулентного пограничного слоя и др.).

5. Описанная методика проверена при решении тестовых задач. Ее преимущества – достоверная результативность, точность определения требуемых параметров, а также приемлемые затраты вычислительных и временных ресурсов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90136\20.

#### Библиографический список

1. Платонов Д.В., Минаков А.В., Дектерев А.А., Харламов Е.Б. Сравнительный анализ CFD-пакетов SIGMAFLOW и ANSYS Fluent на примере решения ламинарных тестовых задач // Вестник Томского государственного университета. Вып. 1 (21), 2013
2. Харитонов А.М. О верификации и валидации моделей и методов численного моделирования пространственных течений // Материалы Международной конференции «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика», Новосибирск, 30 мая – 4 июня, 2011.
3. Железнякова А.Л. Технологии верификации и валидации в численном газодинамическом моделировании // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2018. Т.19, вып. 2.
4. Белова О.В., Волков В.Ю., Скибин А.П., Николаева А.В., Крутиков А.А., Чернышев А.В. Методологические основы CFD-расчетов для поддержки проектирования пневмогидравлических систем. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 5. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/763.html>
5. Сухарев К.В., Дияров К.А., Насырова М.И., Бердин В.К., Еникеева А.А. Верификация математической модели экспериментальной установки для исследования эффекта Ранка-Хилша // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2018. №2
6. Зиганшин А.М. Вычислительная гидродинамика. Постановка и решение задач в процессоре Fluent. Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.- строит. ун-та, 2013. 79 с.
7. Затолока В.В., Александрович Е.В., Семенов А.А., Трифонов А.К. Кольцевые и секторные воздухозаборники с сужением фюзеляжа перед входом и эффективность их использования на ракетах с ПВРД // Труды ЦАГИ, 1968
8. Ветров В.В., Морозов В.В., Чулков Н.С., Шилин П.Д., Оськин А.С., Федоров А.С. Основные конструктивные и проектно-функциональные требования к воздухозаборным устройствам // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 11. Тула: Изд-во ТулГУ, 2020
9. Ветров В.В., Дикшев А.И., Костяной Е.М., Федоров А.С. Выбор рациональной конфигурации воздухозаборного устройства бикалиберной ракеты с ракетно-прямоточным двигателем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 12. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014
10. Гарбарук А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур – СПб: Изд-во Политехн. унта, 2012. – 88 с.
11. Лубина А.С., Седов А.А. Верификация CFD-моделей ANSYS FLUENT для однофазных течений в каналах простой формы // 10 МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, Россия 16-19 мая 2017 г.
12. Железнякова А.Л., Суржиков С.Т. Численное моделирование гиперзвукового обтекания модели летательного аппарата Х-43 // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2010. № 1
13. Тарасов А.Л. Исследование аэродинамических характеристик профиля крыла вблизи поверхности земли с помощью программного комплекса ANSYS Fluent// Научный Вестник МГТУ ГА 2015, № 216
14. Котов Е.В. Численное моделирование обтекания крыловых профилей при малых и умеренных углах атаки: выпускная квалификационная работа (диссертация магистра прикладной математики и физики). – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016. – 34 с.
15. Еникеев Г.Г., Бикмеев А.Т., Соловьев А.А., Касаткин А.А., Юлмухаметов К.Р. Особенности моделирования движения многофазного потока в воздухозаборнике газотурбинного двигателя // Вестник УГАТУ, Т.15, №4(44). С. 18–24, 2011 г.

### References

1. Platonov D.V., Minakov A.V., Dekterev A.A., Kharlamov E.B. Comparative analysis of SIGMAFLOW and ANSYS Fluent CFD packages on the example of solving laminar test problems// Bulletin of Tomsk State University. Issue 1 (21), 2013
2. Kharitonov A.M. On verification and validation of models and methods of numerical modeling of spatial flows // Proceedings of the International Conference "Modern problems of Applied Mathematics and Mechanics: theory, experiment and practice", Novosibirsk, May 30 - June 4, 2011.
3. Zheleznyakova A.L. Verification and validation technologies in numerical gas-dynamic modeling // Physico-chemical kinetics in gas dynamics. 2018. Vol.19, issue 2.
4. Belova O.V., Volkov V.Yu., Skibin A.P., Nikolaeva A.V., Krutikov A.A., Chernyshev A.V. Methodological foundations of CFD calculations to support the design of pneumohydraulic systems. Engineering Journal: Science and Innovation, 2013, issue 5. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/763.html>
5. Sukharev K.V., Diyarov K.A., Nasyrova M.I., Berdin V.K., Enikeeva A.A. Verification of a mathematical model of an experimental setup for the study of the Rank-Hilsch effect// Online publication "Oil and gas business". 2018. No. 2
6. Ziganshin A.M. Computational fluid dynamics. Setting and solving problems in the Fluent processor. Kazan: Publishing house of Kazan State Architect.- builds. un-ta, 2013. 79 p.
7. Zatuloka V.V., Alexandrovich E.V., Semenov A.A., Trifonov A.K. Ring and sector air intakes with a narrowing of the fuselage before the entrance and the effectiveness of their use on RAMJET missiles// Proceedings of TsAGI, 1968
8. Vetrov V.V., Morozov V.V., Chulkov N.S., Shilin P.D., Oskin A.S., Fedorov A.S. Basic design and design-functional requirements for air intake devices// Proceedings of Tula State University. Technical sciences. Issue 11. Tula: TulSU Publishing House, 2020
9. Vetrov V.V., Dikshev A.I., Kostyanoy E.M., Fedorov A.S. Choosing a rational configuration of the air intake device of a bicalibre rocket with a ramjet engine// Izvestiya Tula State University. Technical sciences. Vol. 12. Part 2. Tula: TulSU Publishing House, 2014
10. Garbaruk A.V. Turbulence modeling in calculations of complex flows: textbook / A.V. Garbaruk, M.H. Strelets, M.L. Shur - SPb: Publishing House of the Polytechnic University. unta, 2012. - 88 p.
11. Lubina A.S., Sedov A.A. Verification of ANSYS FLUENT CFD models for single-phase flows in simple-form channels // 10 ISTK "Ensuring the safety of nuclear power plants with VVER" OKB "GIDROPRESS", Podolsk, Russia May 16-19, 2017
12. Zheleznyakova A. L., Surzhikov S. T. Numerical modeling of hypersonic flow around the model of the X-43 aircraft// Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. "Mechanical Engineering". 2010. № 1
13. Tarasov A.L. Investigation of the aerodynamic characteristics of the wing profile near the earth's surface using the ANSYS Fluent software package// Scientific Bulletin of MGTU GA 2015, No. 216
14. Kotov E.V. Numerical simulation of the flow of wing profiles at small and moderate angles of attack: final qualifying work (thesis of the Master of Applied Mathematics and Physics). - St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2016. - 34 p.
15. Enikeev G. G., Bikmeev A. T., Soloviev A. A., Kasatkin A. A., Yulmukhametov K. R. Features of modeling the movement of a multiphase flow in the air intake of a gas turbine engine //UGATU Bulletin, vol.15, No. 4(44). pp. 18-24, 2011.

### Об авторах

**Ветров Вячеслав Васильевич** (Тула, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетное вооружение», Тульский государственный университет (300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, e-mail: vvvetr@mail.ru).

**Шилин Павел Дмитриевич** (Тула, Россия) – аспирант кафедры «Ракетное вооружение», Тульский государственный университет (300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, e-mail: pvl.shilin@yandex.ru).

### About the authors

**Vetrov Vyacheslav Vasilievich** (Tula, Russia) - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Missile Weapons Department, Tula State University (300012, Tula, Lenin Ave., 92, e-mail: vvvetr@mail.ru).



**Shilin Pavel Dmitrievich** (Tula, Russia) - post-graduate student of the Department of Missile Weapons, Tula State University (300012, Tula, Lenin Ave., 92, e-mail: pvl.shilin@yandex.ru).

Получено 23.06.2021