

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF551800>

Проектирование турбомшины авиационной системы кондиционирования воздуха с электрокомпрессором и использованием парокompрессионного и водоиспарительного охлаждения

А.А. Жаров¹, В.П. Леонов¹, И.В. Тищенко^{1, 2}, И.А. Микеров^{1, 3}

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация;

² ПАО НПО «Наука», Москва, Российская Федерация;

³ АО «Туполев», Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Традиционно, для нужд авиационной системы кондиционирования воздуха (СКВ) воздух отбирается от компрессоров двигателей, поскольку воздух в окружающей среде разрежен, а в салонах требуется поддерживать более высокое давление, комфортное для пассажиров [1–3]. Такое решение энергозатратно, ввиду забора воздуха из компрессоров с ощутимо большим давлением, чтобы СКВ работала на всех высотах в течение полета.

Предлагается использовать СКВ без отбора воздуха от двигателей самолета, с автономным электрокомпрессором [5–7]. В качестве узла охлаждения предлагается использовать комбинированную схему, использующую, как традиционный воздушный цикл с турбохолодильником, так и парокompрессионную холодильную машину с возможностью работы в режиме теплового насоса и дополнительным водоиспарительным охлаждением.

Цель работы — рассчитать и обосновать энергоэффективность предложенной схемы СКВ самолета без отбора воздуха от маршевых двигателей и вспомогательной силовой установки, использующую электрокомпрессор, парокompрессионную холодильную машину с режимом теплового насоса и водоиспарительное охлаждение; спроектировать рабочее колесо турбокомпрессора при помощи традиционных методик и современных средств моделирования, сравнить эти методы и дать заключение об их перспективности.

Методы. Проведено расчетное сравнительное исследование традиционной и предлагаемой схем СКВ. Выполнен расчет проточной части компрессорного колеса традиционными методами и при помощи CFX моделирования.

Результаты. При использовании предложенной схемы уменьшается энергопотребление СКВ при стоянке летом на земле в 10 раз, в крейсерском полете в 16,6 раз. В результате сравнения расчетов турбоагрегата, выполненного по классической методике и с использованием CFX моделирования, было выявлено, что при одних и тех же исходных данных получается несколько отличная геометрия рабочего колеса. Это связано с тем, что моделирование учитывает реальные свойства рабочего газа и более точно учитывает внутренние перетечки.

Заключение. Предложенная схема СКВ обладает большой энергоэффективностью и требует дальнейших исследований по полноценному сравнительному анализу с традиционными решениями по всем показателям. В целом, 3D моделирование проточной части турбомшины показывает более реальную картину изменения параметров, но для приближенных и эскизных расчетов имеет смысл пользоваться 2D моделированием, т.к. оно достаточно точно решает задачу.

Ключевые слова: авиационная СКВ с электрокомпрессором; безотборная авиационная СКВ; парокompрессионное охлаждение в авиационной СКВ; водоиспарительное охлаждение в авиационной СКВ; CFX моделирование проточной части турбомшины.

Как цитировать:

Жаров А.А., Леонов В.П., Тищенко И.В., Микеров И.А. Проектирование турбомшины авиационной системы кондиционирования воздуха с электрокомпрессором и использованием парокompрессионного и водоиспарительного охлаждения // Холодильная техника. 2021. Т. 110, № 3. С. 163–170. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF551800>

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF551800>

Design of Aircraft Air Conditioning System Turbomachine with Electric Compressor and Use of Vapor Compression and Water Evaporation Cooling

Anton A. Zharov¹, Viktor P. Leonov¹, Igor V. Tishchenko^{1,2}, Ivan A. Mikerov^{1,3}

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;

² RPA "Nauka", Moscow, Russian Federation;

³ JSC "Tupolev", Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Traditionally, air is taken from engine compressors to address the needs of aviation air conditioning systems (ACSs) because the air in the environment is rarefied, and maintaining a high pressure that is comfortable for passengers is required in the cabins [1–3]. This solution consumes a considerable amount of energy because the air is extracted from compressors at significantly high pressure. Therefore, the ACS works at all flight altitudes.

The use of ACS without air extraction from airplane engines with an autonomous electric compressor is proposed [5–7]. As a cooling unit, the utilization of a combined scheme using a traditional air cycle with a turbo cooler and a vapor compression refrigeration machine with the possibility of operation in heat pump mode and additional water evaporative cooling is proposed. This work aims to calculate and justify the energy efficiency of the proposed scheme of aircraft ACS without air extraction from the marching engines and auxiliary propulsion system using an electric compressor, a steam compression refrigeration machine with heat pump mode, and water vapor cooling. The paper also aims to design and compare the turbo compressor impeller using traditional methods and modern modeling tools to conclude its prospects.

METHODS: Computational comparative study of traditional and proposed schemes of ACS. Calculation of compressor wheel flow part using traditional methods and CFX modeling.

RESULTS: A reduction in power consumption of ACS during summer parking on the ground by 10 times and that in cruising flight by 16.6 times is observed when using the proposed scheme. The comparison result of calculations of the turbine unit using the classical method and CFX modeling revealed that the same initial data yielded a slightly different geometry of the impeller. This difference is due to modeling, which considers the reality of the properties of the working gas and internal overflows.

CONCLUSION: The proposed scheme of ACS has considerable energy efficiency. Thus, conducting a comprehensive comparative analysis with traditional solutions on all indicators is reasonable. Overall, 3D modeling of the turbomachine flow part shows a real illustration of parameter changes. However, using 2D modeling for approximate and preliminary calculations is reasonable because it solves the problem quite accurately.

Keywords: aviation ACS with electric compressor; nonsampling aviation ACS; vapor compression cooling in aviation ACS; water evaporative cooling in aviation ACS; CFX modeling of turbomachinery flow part.

To cite this article:

Zharov AA, Leonov VP, Tishchenko IV, Mikerov IA. Design of Aircraft Air Conditioning System Turbomachine with Electric Compressor and Use of Vapor Compression and Water Evaporation Cooling. *Refrigeration Technology*. 2021;110(3):163–170. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF551800>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается долгожданный рост заказов отечественной авиационной техники. Очевидно, что при ее проектировании необходимо использовать прогрессивные технические решения, повышающие энергоэффективность, надежность, точность получения требуемых характеристик изделий.

Обычно, исследования в области проектирования заключаются в анализе применяемых вариантов, их просчете, сравнении между собой и выборе наиболее оптимального набора отработанных серийных решений для применения в условиях поставленной задачи.

Однако, помимо вышеприведенного вариантов, существуют различные программные комплексы, которые, во-первых, облегчают расчеты всевозможных вариантов, и, во-вторых, основываясь на данных многочисленных исследований в области газо- и термодинамики реальных сред, позволяют получить результаты наиболее близкие к реальным процессам, происходящим в агрегатах.

Настоящая работа посвящена обзору предлагаемого авторского решения турбоагрегата системы кондиционирования воздуха и применению вышеупомянутых вариантов для его проектирования.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель работы — рассчитать и обосновать энергоэффективность предложенной схемы СКВ самолета без отбора воздуха от маршевых двигателей и вспомогательной силовой установки, использующую электрокомпрессор, пароконденсационную холодильную машину с режимом теплового насоса и водоиспарительное охлаждение; спроектировать рабочее колесо турбокомпрессора при помощи традиционных методик и современных средств моделирования, сравнить эти методы и дать заключение об их перспективности.

МЕТОДЫ

Обычно, в самолетах для нужд системы кондиционирования воздуха (СКВ) сжатый воздух отбирается от компрессоров двигателей, по трубопроводам подается в узел охлаждения СКВ, где подготавливается для подачи на вентиляцию салона и охлаждение аппаратуры [1–3]. Давление воздуха на отборе от двигателя достигает значений порядка 7 бар. Воздух, прошедший через салон, выбрасывается при этом в атмосферу. Зная параметры воздуха на входе в компрессор двигателя, необходимый расход воздуха, отбираемый от компрессора, и задавшись КПД сжатия компрессором

двигателя по формулам [4] можно оценить мощность, затрачиваемую двигателями в крейсерском полете для нужд СКВ:

$$N_k = \frac{G \cdot C_p \cdot T_1 \cdot \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)}{\eta_k} = \frac{3500/3600 \cdot 1004 \cdot 248 \left(\left(\frac{7}{0.2} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1 \right)}{0.85} = 500 \text{ кВт} \quad (1)$$

Затрачиваемую мощность для кондиционирования воздуха на земле летом (воздух отбирается от бортовой вспомогательной силовой установки) при стандартных условиях можно вычислить как:

$$N_k = \frac{G \cdot C_p \cdot T_1 \cdot \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)}{\eta_k} = \frac{3444/3600 \cdot 1006 \cdot 313 \left(\left(\frac{6}{1} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1 \right)}{0.8} = 250 \text{ кВт} \quad (2)$$

где N — затрачиваемая мощность сжатия компрессора, кВт; G — потребляемый расход воздуха СКВ, кг/ч; C_p — удельная теплоемкость воздуха при условиях на входе, Дж/кг·К; T_1 — температура воздуха на входе в компрессор, К; p_1 — давление воздуха на входе в компрессор, бар; p_2 — давление воздуха, отбираемого от компрессора, бар; k — показатель адиабаты воздуха; η_k — принимаемый КПД компрессора.

Предлагается использовать СКВ без отбора воздуха от двигателей самолета [5–7], в которой давление воздуха от заборного до салонного будет подниматься за счет автономного турбокомпрессора, а для минимизации затрат мощности предлагается на втором конце вала турбомашин разместить турбину (рис. 1).

В качестве узла охлаждения предлагается использовать комбинированную схему. Для охлаждения воздуха летом и нагрева воздуха зимой при стоянке на земле или маловысотном полете предлагается применить пароконденсационную холодильную машину с возможностью работы в режиме теплового насоса. Для подготовки воздуха в полете, как показали расчеты, воздух, достаточно сжатый до салонного давления, и при этом нагретый в процессе сжатия, необходимо увлажнять водой, охлаждая его до необходимой температуры.

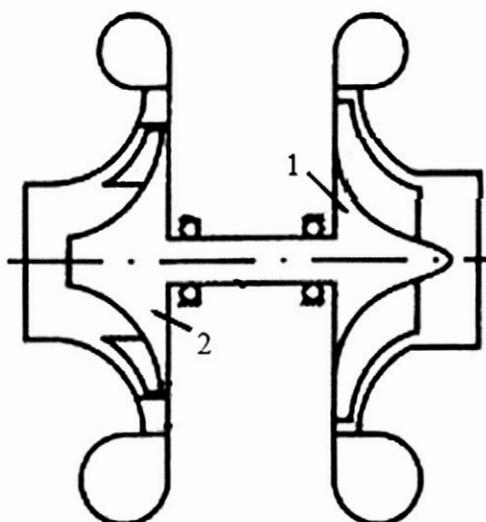


Рис. 1. Схема предлагаемого турбоагрегата СКВ. 1 — компрессор, 2 — турбина.

Fig. 1. Schematic of the proposed ACS turbine unit. 1 — compressor, 2 — turbine.

В таком случае, затрачиваемая в крейсерском полете мощность на нужды СКВ рассчитывается согласно формуле:

$$N = \frac{N_{\text{УКВ.КП}}}{\eta_{\text{эд}} \cdot \eta_{\text{эл}} \cdot \eta_{\text{Г}} \cdot \eta_{\text{КП}} \cdot \eta_{\text{к}}} = \frac{9}{0.8 \cdot 0.9 \cdot 0.8 \cdot 0.8 \cdot 0.7} = 28 \text{ кВт} \quad (3)$$

Затрачиваемая мощность на кондиционирование летом на земле (работа холодильной машины) рассчитывается по следующей зависимости:

$$N = \frac{N_{\text{УКВ.ЛЗ}}}{\eta_{\text{эд}} \cdot \eta_{\text{эл}} \cdot \eta_{\text{Г}} \cdot \eta_{\text{КП}} \cdot \eta_{\text{к}}} = \frac{8}{0.8 \cdot 0.9 \cdot 0.8 \cdot 0.8 \cdot 0.7} = 25 \text{ кВт} \quad (4)$$

где N — затрачиваемая мощность для СКВ, кВт; $N_{\text{УКВ.КП}}$ — затрачиваемая мощность на узел кондиционирования воздуха (УКВ) в крейсерском полете, кВт; $N_{\text{УКВ.ЛЗ}}$ — затрачиваемая мощность на УКВ при стоянке на земле летом, кВт; $\eta_{\text{эд}}$ — КПД электродвигателя компрессора (турбомашины или холодильного); $\eta_{\text{эл}}$ — КПД частотного преобразователя; $\eta_{\text{Г}}$ — КПД генератора бортовой сети; $\eta_{\text{КП}}$ — КПД коробки передач от двигателя к генератору; $\eta_{\text{к}}$ — КПД компрессора двигателя.

Значения мощностей, затрачиваемых на узел кондиционирования получены путем расчетов для соответствующих режимов.

Таким образом, при использовании предлагаемой схемы появляется выигрыш в потребляемой мощности

в 16,6 раз в режиме крейсерского полета и в 10 раз в режиме стоянки летом на земле.

Стоит отметить, что современные тепловые насосы, обычно, способны работать лишь при температурах окружающего воздуха не ниже минус 25 °С. Поэтому, при более низких температурах в предлагаемой системе предусмотрен теплообменник-калорифер, нагревающий проходящий через него воздух за счет электричества. В этом случае, потребляемая мощность калорифера примерно равна потребляемой мощности при питании СКВ от бортовой вспомогательной силовой установки.

Перечисленные выше энергетические выгоды от использования предлагаемой системы позволят сократить затраты топлива на нужды СКВ, повысить максимальную дальность полета или повысить грузоподъемность самолета.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТУБОАГРЕГАТА

Критерии Сравнения

Первый вариант расчета для проектирования предусматривает использование классических методик, основанных на уравнениях газо- и термодинамики. Для того, чтобы применить наиболее выгодное решение проводится их сравнительный анализ.

В турбоагрегате важнейшим компонентом является рабочее колесо. Для компрессорной части существует три типа рабочих колес: радиальное, осевое и осерадиальное [8–10]. Для расширительной (турбинной или детандерной) части — радиальное, осевое и радиально-осевое [11].

Применение турбоагрегата в системе кондиционирования воздуха самолета накладывает ограничение как по массе, так и по габаритам турбомашины. Поэтому критериями сравнения машин с различным типом рабочих колес, помимо энергетической эффективности, будут являться массо-габаритные характеристики.

Исходные данные

Исходными данными для расчета являются параметры воздуха на входе в турбоагрегат (компрессор и турбину), давление воздуха на выходе из турбоагрегата и расход воздуха через агрегат.

При расчете компрессорной части стоит учитывать, что воздух на входе имеет практически нулевую абсолютную скорость, поэтому следует принимать условия на входе при параметрах торможения воздуха. Поэтому дополнительным исходным данным является крейсерская скорость полета.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для расчета описываемого турбоагрегата применялась методика, изложенная в книге [4].

В результате, проведенные расчеты показали, что:

- для компрессорной части наиболее оптимальным вариантом является использование осерадиального рабочего колеса, т.к. при этом затрачивается меньшая мощность и требуются меньшие размеры проточной части по сравнению с радиальным колесом;
- целесообразным является выбор лопаточного диффузора компрессора, позволяющего уменьшить радиальные размеры агрегата;
- для турбинной части выбрано радиально-осевое рабочее колесо, т.к. осевое и радиальное менее эффективны.

Помимо упомянутого выше расчета, также выполнялся расчет с использованием моделирования процессов в проточной части компрессора.

В качестве исходных данных принимались те же параметры. Была построена геометрия проточной части, изображенная на рис. 2.

Результаты 2D моделирования со следующими картинками распределения параметров газа по проточной части представлены на рис. 3.

Для расчета проточной части компрессора применялись методы CFX моделирования. Полученные следующие результаты (рис. 4):

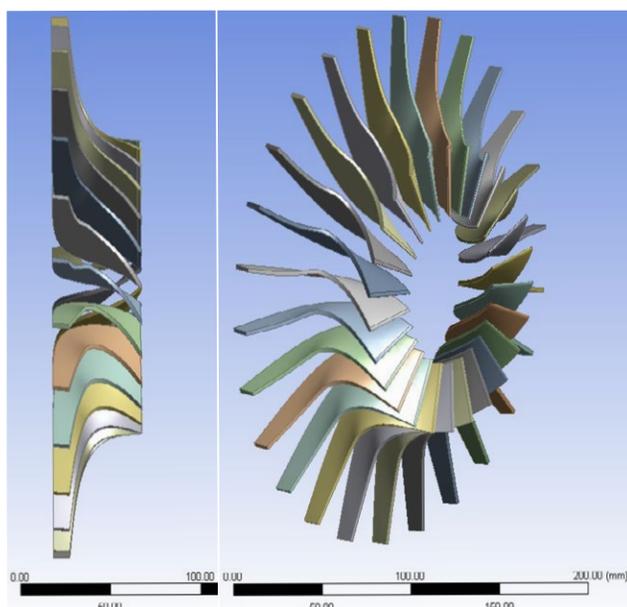


Рис. 2. Геометрия проточной части, построенной для моделирования.

Fig. 2. Geometry of the flow path built for modeling.

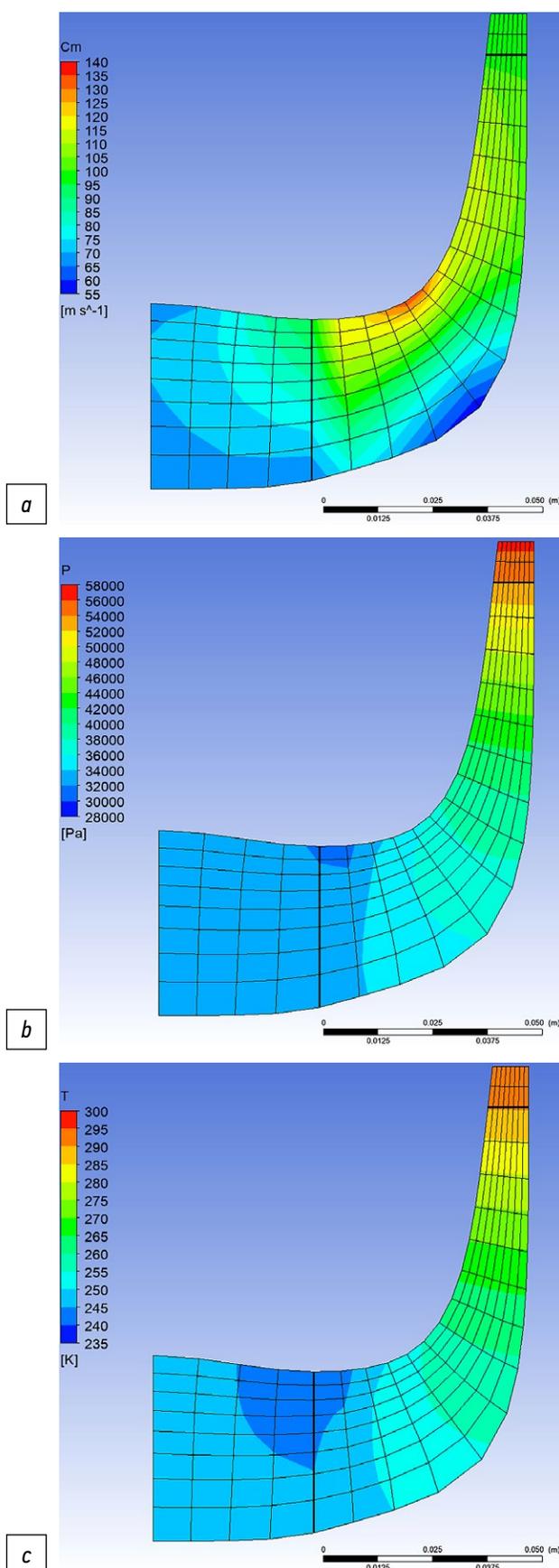


Рис. 3. Картина изменения *a)* абсолютной скорости, *b)* статического давления, *c)* температуры газа в проточной части.

Fig. 3. Picture of changes in *a)* absolute velocity, *b)* static pressure, *c)* gas temperature in the flow section.

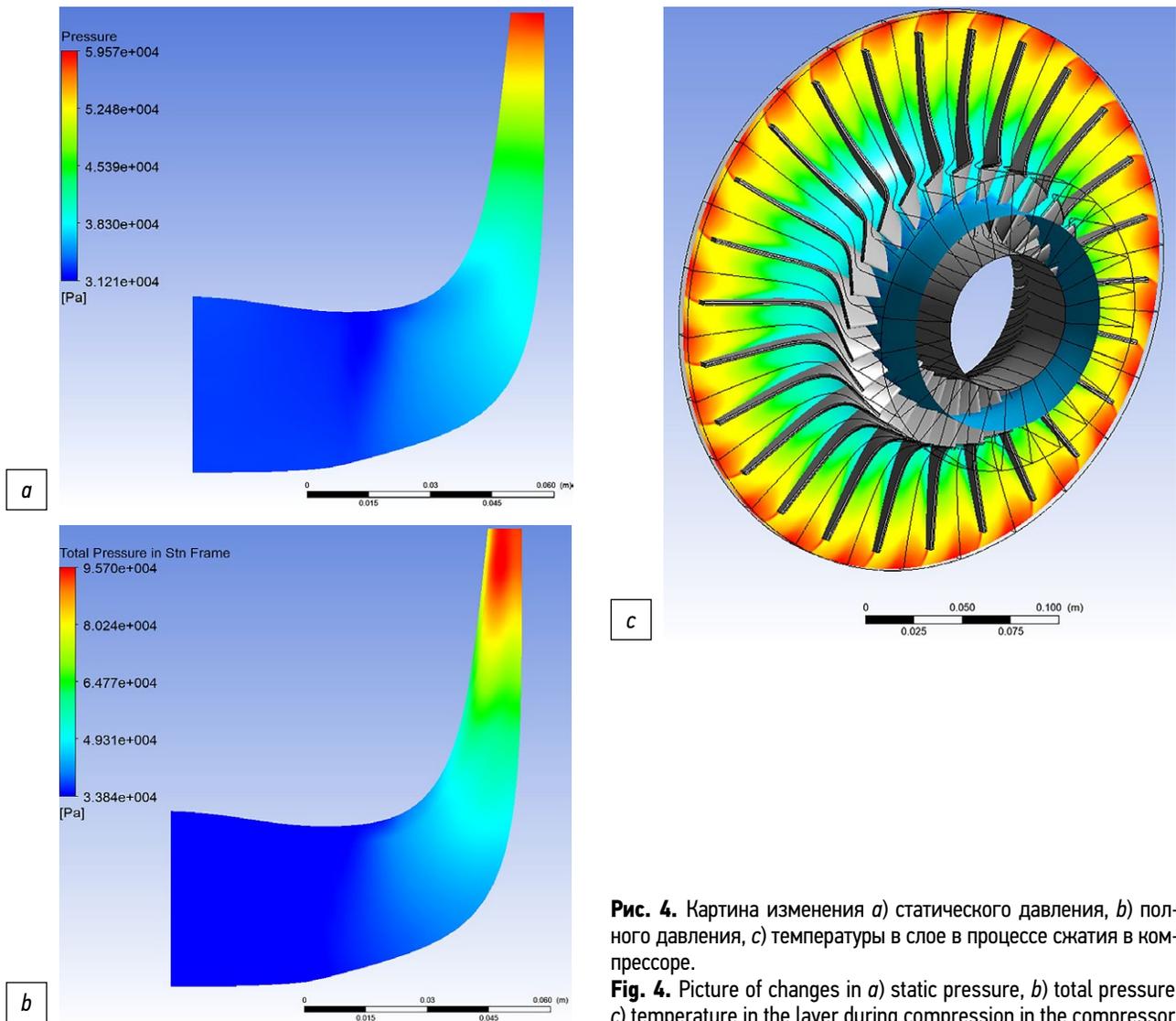


Рис. 4. Картина изменения *a)* статического давления, *b)* полного давления, *c)* температуры в слое в процессе сжатия в компрессоре.

Fig. 4. Picture of changes in *a)* static pressure, *b)* total pressure, *c)* temperature in the layer during compression in the compressor.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании предложенной схемы теоретически:

1. уменьшается энергопотребление на нужды системы кондиционирования воздуха при стоянке летом на земле в 10 раз;
2. уменьшается энергопотребление на нужды системы кондиционирования воздуха в крейсерском полете в 16,6 раз;
3. энергопотребление на нужды системы кондиционирования воздуха при стоянке на земле зимой не изменяются.

В дальнейшем необходимо провести полноценный сравнительный анализ предлагаемой схемы СКВ с традиционными решениями по всем показателям и дать итоговое заключение о ее перспективности.

В результате сравнения расчетов турбоагрегата, выполненного по классической методике и выполненного при моделировании, было выявлено следующее:

1. При использовании одних и тех же исходных данных получается различная геометрия рабочего колеса. Это может быть связано с различными основными базами, заложенными в расчеты. Моделирование учитывает реальные свойства рабочего газа.
2. На картине полного давления (рис. 4*b*) видна зона пониженного давления в зазоре между рабочим колесом и воронкой, обусловленная перетечкой газа из области повышенного давления в область пониженного.
3. По картинам изменения давления в процессе сжатия, полученным при 2D (рис. 3*b*) и при 3D (рис. 4*a*) моделировании можно заметить, что итоговые давления не критично отличаются. В целом, 3D моделирование показывает более реальную картину изменения параметров, но для приближенных и эскизных расчетов имеет смысл пользоваться 2D моделированием, т.к. оно достаточно точно решает задачу.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с подготовкой и публикацией статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contributions. All authors made a substantial contribution to the conceptual development and preparation of this article and read and approved the final version before publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hamamoto M. inventor; The Boeing Company, assignee. Multimode cabin air conditioning system. United States patent US 4261416. 1981 Apr 14. [дата обращения: 16.07.2023] Режим доступа: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/4261416>
2. John K. inventor; The Garrett Corporation, assignee. All-purpose power and air conditioning system. United States patent US 2777301. 1957 Jan 15. [дата обращения: 16.07.2023] Режим доступа: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/2777301>
3. Klimpel F., Schmidt S.A., Beier J. inventor; Airbus Operations GmbH, assignee. Aircraft air conditioning system comprising a separate refrigeration cycle. United States patent US 9487300. 2016 Feb 19. [дата обращения: 16.07.2023] Режим доступа: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/9487300>
4. Епифанова В. И. Компрессорные и расширительные турбомашин радиального типа. М.: МГТУ им. НЭ Баумана. 1998.
5. Sarlioglu B., Morris C.T. More electric aircraft: Review, challenges, and opportunities for commercial transport aircraft // *IEEE transactions on Transportation Electrification*. 2015. Vol. 1, N. 1. P. 54–64.
6. Wheeler P. Technology for the more and all electric aircraft of the future // *IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)*. IEEE, 2016. P. 1–5.

7. Wheeler P., Bozhko S. The more electric aircraft: Technology and challenges // *IEEE Electrification Magazine*. 2014. Vol. 2, N 4. P. 6–12.
8. Joco F.M. inventor; The Garrett Corporation, assignee. Compressor wheel assembly for turbochargers. United States patent US 4705463. 1987 Oct 11. [дата обращения: 16.07.2023] Режим доступа: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/4705463>
9. Pankratz A.W., Matysek B.J., Mendelson R.A. inventor; Allied-Signal Inc., assignee. Composite compressor wheel for turbochargers. United States patent US 4850802. 1989 Jul 25. [дата обращения: 16.07.2023] Режим доступа: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/4850802>
10. Decker D., Roby S.I. inventor; BorgWarner, Inc., assignee. Turbocharger including cast titanium compressor wheel. United States patent US 8702394. 2014 Apr 22. [дата обращения: 16.07.2023] Режим доступа: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/8702394>
11. Tiefenbacher E. inventor; Daimler-Benz Aktiengesellschaft, assignee. Radial turbine wheel for a gas turbine. United States patent US 4125344. 1978 Jun 17. [дата обращения: 16.07.2023] Режим доступа: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/4125344>

REFERENCES

1. Hamamoto M. inventor; The Boeing Company, assignee. Multimode cabin air conditioning system. United States patent US 4261416. 1981 Apr 14. Accessed: 16.07.2023. Available from: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/4261416>
2. John K. inventor; The Garrett Corporation, assignee. All-purpose power and air conditioning system. United States patent US 2777301. 1957 Jan 15. Accessed: 16.07.2023. Available from: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/2777301>
3. Klimpel F, Schmidt SA, Beier J. inventor; Airbus Operations GmbH, assignee. Aircraft air conditioning system comprising a separate refrigeration cycle. United States patent US 9487300. 2016 Feb 19. Accessed: 16.07.2023. Available from: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/9487300>
4. Epifanova VI. *Compressor and expansion turbomachines of radial type*. Moscow: MG TU im. NE Bauman. 1998. (In Russ).
5. Sarlioglu B, Morris CT. More electric aircraft: Review, challenges, and opportunities for commercial transport aircraft. *IEEE transactions on Transportation Electrification*. 2015;1(1):54–64.
6. Wheeler P. Technology for the more and all electric aircraft of the future. In: *IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)*. IEEE, 2016:1–5.
7. Wheeler P, Bozhko S. The more electric aircraft: Technology and challenges. *IEEE Electrification Magazine*. 2014;2(4):6–12.
8. Joco FM. inventor; The Garrett Corporation, assignee. Compressor wheel assembly for turbochargers. United States patent US 4705463. 1987 Oct 11. Accessed: 16.07.2023. Available

from: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/4705463>

9. Pankratz AW, Matysek BJ, Mendelson RA. inventor; Allied-Signal Inc., assignee. Composite compressor wheel for turbochargers. United States patent US 4850802. 1989 Jul 25. Accessed: 16.07.2023. Available from: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/4850802>

10. Decker D, Roby SI. inventor; BorgWarner, Inc., assignee. Turbocharger including cast titanium compressor wheel. United

States patent US 8702394. 2014 Apr 22. Accessed: 16.07.2023. Available from: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/8702394>

11. Tiefenbacher E. inventor; Daimler-Benz Aktiengesellschaft, assignee. Radial turbine wheel for a gas turbine. United States patent US 4125344. 1978 Jun 17. Accessed: 16.07.2023. Available from: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/4125344>

ОБ АВТОРАХ

* Жаров Антон Андреевич,

к.т.н.;

адрес: Российская Федерация, 105005, Москва,

Лефортовская наб., д. 1;

ORCID: 0000-0001-9945-0850;

eLibrary SPIN: 8581-1809;

e-mail: zharov_a@bmstu.ru

Леонов Виктор Павлович,

к.т.н.;

ORCID: 0009-0000-6270-0158;

eLibrary SPIN: 8983-9663;

e-mail: leonov.v.p@bmstu.ru

Тищенко Игорь Валерьевич,

к.т.н.;

ORCID: 0000-0001-6094-8723;

eLibrary SPIN: 5630-4301;

e-mail: iv.tischenko@bmstu.ru

Микеров Иван Алексеевич;

ORCID: 0009-0002-0411-6249;

eLibrary SPIN: 7896-5169;

e-mail: iamikerov@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку

AUTHORS' INFO

* Anton A. Zharov,

Cand. Sci. (Tech.);

address: 1 Lefortovskaja naberezhnaja, 105005, Moscow,

Russian Federation;

ORCID: 0000-0001-9945-0850;

eLibrary SPIN: 8581-1809;

e-mail: zharov_a@bmstu.ru

Viktor P. Leonov,

Cand. Sci. (Tech.);

ORCID: 0009-0000-6270-0158;

eLibrary SPIN: 8983-9663;

e-mail: leonov.v.p@bmstu.ru

Igor V. Tishchenko,

Cand. Sci. (Tech.);

ORCID: 0000-0001-6094-8723;

eLibrary SPIN: 5630-4301;

e-mail: iv.tischenko@bmstu.ru

Ivan A. Mikerov;

ORCID: 0009-0002-0411-6249;

eLibrary SPIN: 7896-5169;

e-mail: iamikerov@mail.ru

* Corresponding author