

Влияние шероховатости поверхности трубок, получаемой методом селективного лазерного сплавления, на эффективность воздухо-воздушного теплообменника

© А.В. Агапов, А.В. Ионов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация

Рассмотрены вопросы влияния шероховатости трубок воздухо-воздушного теплообменника (ВВТ), получаемой методом селективного лазерного сплавления (СЛС), на эффективность работы ВВТ. В ходе исследования спроектирован образец, в дальнейшем напечатанный на СЛС-установке, на котором измерена шероховатость на разных участках. Проведено математическое моделирование сопряженного теплообмена участка трубки. В одном случае моделировалась гладкая деталь, в другом — с учетом шероховатости, измеренной на напечатанном образце. Проведено сравнение результатов, по итогам которого выявлено значительное влияние шероховатости на гидравлическое сопротивление, что показывает необходимость ее учета при проектировании ВВТ для производства с применением СЛС и обязательности обработки после печати изделия.

Ключевые слова: *воздухо-воздушный теплообменник, селективное лазерное сплавление, шероховатость, математическое моделирование*

Введение. Система обеспечения теплового состояния газотурбинного двигателя (ГТД) состоит из многих элементов, одним из которых является воздухо-воздушный теплообменник (ВВТ), предназначенный для охлаждения воздуха, отбираемого из вторичной зоны основной камеры сгорания и подаваемого на охлаждение сопловых лопаток и рабочих лопаток турбины высокого давления (ТВД). Такой теплообменник располагается в наружном контуре (НК) изделия, охлаждение горячего воздуха осуществляется воздухом НК, омывающим ВВТ (рис. 1).

Воздухо-воздушный теплообменник представляет собой набор модулей трубчатых теплообменных аппаратов (ТА), расположенных во втором контуре ГТД. Традиционные конструкции трубчатых ТА для газотурбинных двигателей имеют ограниченную эффективность и трудоемки в производстве, поскольку ВВТ — это сборочный узел, состоящий из нескольких элементов. Традиционная технология производства теплообменника включает в себя изготовление трубок и придание им необходимой формы на гибочных станках, изготовление фланцев на фрезеровальном оборудовании, штамповку проставочных элементов и сборку деталей с помощью пайки. На каждую

операцию имеются ограничения, большое количество деталей обуславливает высокий процент брака при изготовлении одного модуля ВВТ. Кроме того, требуется большое количество специализированной оснастки.

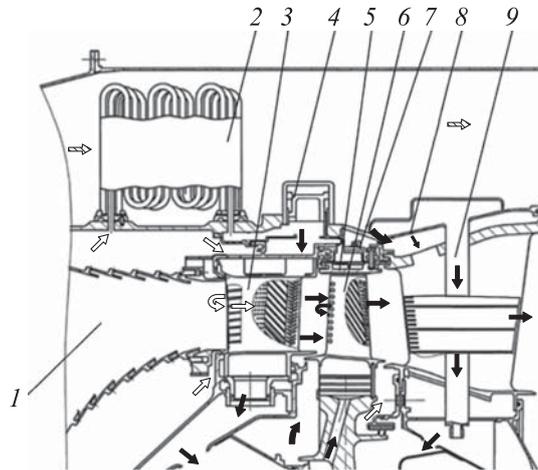


Рис. 1. Схема расположения ВВТ:

1 — камера сгорания; 2 — воздухо-воздушный теплообменник; 3 — лопатка соплового аппарата ТВД; 4 — клапанный аппарат; 5 — лопатка рабочего колеса ТВД; 6 — наружное кольцо; 7 — сотовые вставки; 8 — обод; 9 — перепускная труба; ➔ — воздух из теплообменника; ⇔ — вторичный воздух; ⇨ — воздух из наружного контура

Один из наиболее перспективных методов снижения трудоемкости изготовления теплообменника — переход от традиционного производства к применению аддитивных технологий, а именно технологии селективного лазерного сплавления (СЛС). В этом случае модуль можно выпускать целиком, а не поддетально с последующей сборкой. Помимо снижения трудоемкости технология СЛС позволяет создавать конструкции, обладающие большей эффективностью (переменные сечения, турбулизаторы и ламинализаторы в закрытых полостях, микрорельеф и др.), производство которых было невозможно или сложным при изготовлении традиционными методами. Однако, как и любая другая технология, СЛС имеет ограничения и недостатки, которые следует учитывать при проектировании и производстве.

В случае выпуска ВВТ методом селективного лазерного сплавления шероховатость стенок будет повышена. Это в свою очередь будет оказывать воздействие на теплообмен: большое термическое сопротивление ухудшает теплообмен, а турбулизация потока, вызванная неровностями поверхности (шероховатость вызывает дополнительные возмущения, что способствует потере устойчивости ламинарной формы течения) теплообмен улучшает [1–3]. Обычно при расчетах теплопередачи ВВТ шероховатость поверхности не учитывается и стенки считаются гладкими.

Цель данной работы — исследование влияния получаемой при печати шероховатости на эффективность работы теплообменника, в частности на понижение температуры охлаждаемого воздуха, потери давления и необходимость постобработки внутренней поверхности трубок, учитывая при этом изменение технологии производства ВВТ с традиционной на селективное лазерное сплавление и то, что большинство каналов не является гидравлически гладким.

Проектирование и производство образца. Для определения шероховатости, получаемой при печати на СЛС-установке, и отработки технологии — подбора режимов и стратегии печати спроектирована конструкция образцов, которые в последующем были напечатаны. В качестве образца был выбран участок трубки, который представляет собой колено (место перегиба). Такой выбор обусловлен тем, что это геометрически наиболее сложный образец для производства с помощью аддитивных технологий: имеется наклонный (нависающий) участок и переход от вертикального к горизонтальному расположению трубки. Конструкция спроектирована с учетом имеющегося опыта печати и ограничений, накладываемых технологией. В конструкцию заложена перегородка для уменьшения числа поддержек и увеличения жесткости конструкции. На рис. 2 показана 3D-модель образца, а на рис. 3 — выращенный образец.



Рис. 2. 3D-модель образца



Рис. 3. Выращенный образец

Печать производилась в АО «Центр аддитивных технологий», созданном в 2018 г. на базе холдинговых корпораций авиационного комплекса ГК «Ростех» как единый интегратор в области аддитивного производства. Образцы были изготовлены на 3D-принтере EOS M 290 компании Electro Optical Systems (рис. 4), который работает с металлическими порошками широкого ассортимента, включая:

- алюминиевые сплавы;
- титановый сплав;
- никелевые и кобальт-хромовые сплавы
- инструментальную и нержавеющей сталь.



Рис. 4. Принтер EOS M 290

Основные технические характеристики принтера EOS M 290 приведены ниже:

Камера построения, мм	250×250×215
Лазер:	
тип	Оптоволоконный
мощность, Вт	400
Прецизионная оптика	F-theta объектив, высокоскоростной сканер
Скорость сканирования, м/с ...	До 17,0
Диаметр фокуса, мкм	100
Подача сжатого воздуха:	
давление, ГПа	7000
скорость, м ³ /ч	20
Толщина слоя, мкм	От 20
Скорость печати, см ³ /ч	7,2–72,0

С целью определения шероховатости внутренней поверхности выращенный образец был разделен вдоль оси трубки. Для исследования зависимости шероховатости от угла нависания детали относительно плоскости печати выбраны три участка, располагающиеся под углами 0°, 45 и 90° к плоскости печати. Для измерения шероховатости использовался трехмерный измерительный лазерный микроскоп OSL5000 компании Olympus. Он имеет оптические системы двух типов: оптическую систему цветного изображения и лазерную конфокальную оптическую систему. Измерения на участках проводились по шести точкам. Получены также трехмерные изображения каждого участка (рис. 5).

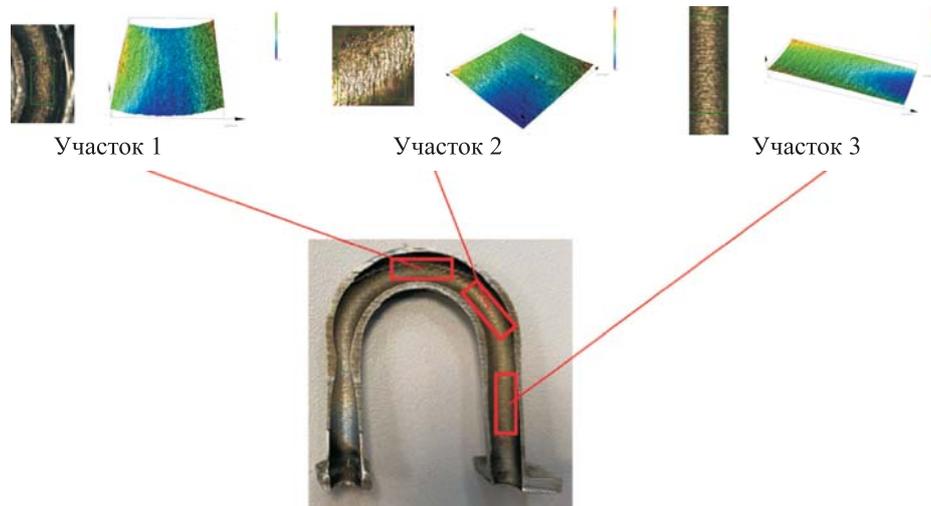


Рис. 5. Исследование шероховатости внутреннего канала образца на трех участках. Среднее значение шероховатости, мкм: 1 — $Ra = 9,671$; 2 — $Ra = 8,881$; 3 — $Ra = 8,730$

Математическое моделирование влияния шероховатости.

В большинстве программных комплексов вычислительной гидрогазодинамики (CFD), в частности ANSYS CFX, влияние шероховатости поверхностей учитывается в модели пристеночных функций, при этом используется эквивалентная песочная шероховатость, которая отличается от указываемой в конструкторской документации (Ra — среднее арифметическое отклонение профиля, Rz — высота неровностей профиля по десяти точкам), что в свою очередь ставит задачу перевода технических параметров шероховатости в эквивалентную для получения качественных результатов расчетов. Существует большое количество работ в данной области [4–11]. Из анализа литературы выявлено, что оптимальным методом перевода является зависимость

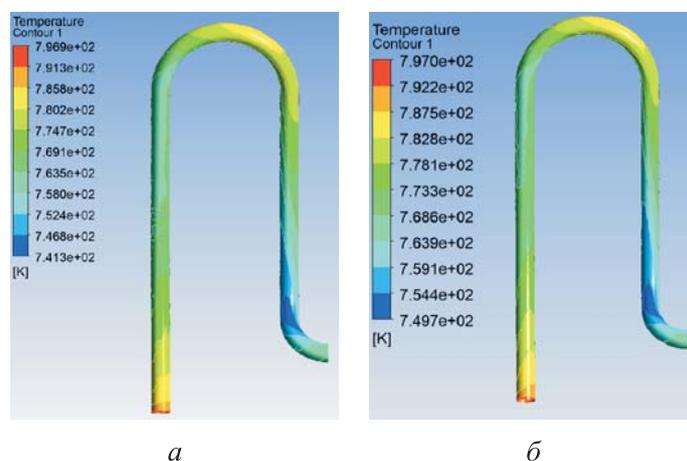
$$k_s = 2,19 Ra^{0,877}.$$

Исследование влияния шероховатости проводилось численным моделированием [12–15]. Серия CFD-расчетов одной трубки была проведена в ANSYS CFX с включенной моделью пристеночных функций и без нее, полученные результаты сравнивались между собой. Грани внутренней поверхности трубки (рис. 6) были разбиты на несколько частей, для каждой из которых задавались эквивалентные шероховатости по результатам измерения натурального образца и преобразований по приведенной выше формуле.

Результаты расчетов представлены на рис. 7–10. В табл. 1 и 2 вынесены сравниваемые параметры и граничные условия внутреннего и внешнего теплоносителя, где ΔT , ΔP — разности температур и давлений на входе, которые задаются в граничных условиях, и на выходе из трубки, полученные из расчетов, соответственно.



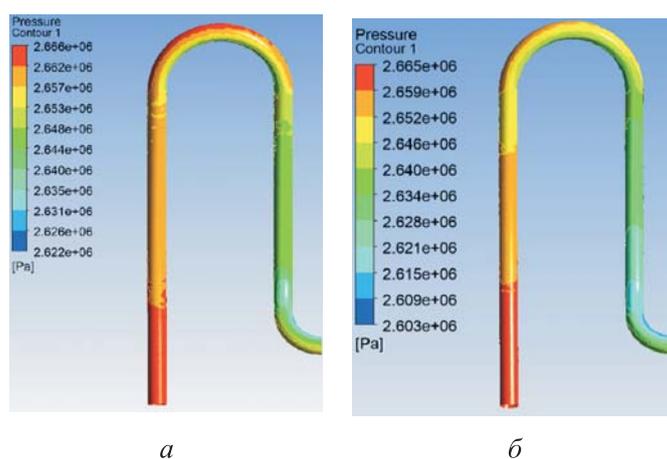
Рис. 6. 3D-модель трубки для расчета



а

б

Рис. 7. Температура гладкой (а) и шероховатой (б) стенки трубки



а

б

Рис. 8. Давление внутреннего теплоносителя при гладкой (а) и шероховатой (б) стенке трубки

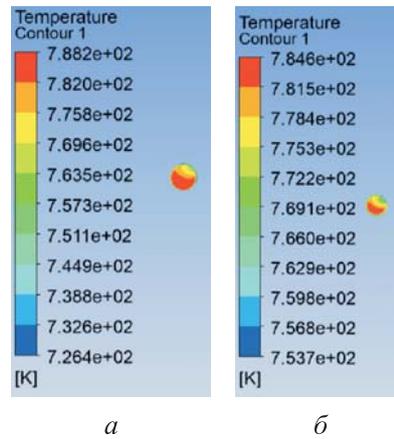


Рис. 9. Температура на выходе из трубки при гладкой (а) и шероховатой (б) стенке

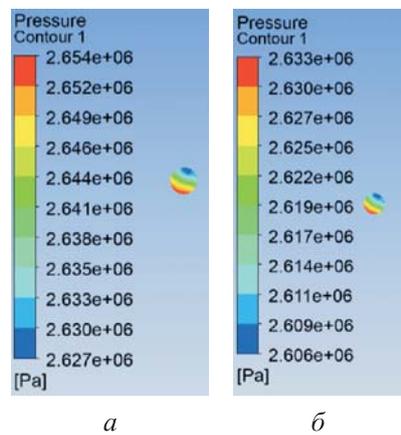


Рис. 10. Давление на выходе из трубки при гладкой (а) и шероховатой (б) стенке трубки

Таблица 1

Результаты перепада температур и давлений для трубки с гладкой и шероховатой стенками

Параметр	Вид трубки со стенкой	
	гладкой	шероховатой
ΔT , К	22,496	24,356
ΔP , Па	23920	46123

Таблица 2

Граничные условия для теплоносителей

Теплоноситель	На входе		На выходе
	T , К	P , МПа	G , кг/с
Внешний	491	0,527	0,16100
Внутренний	803	2,665	0,01283

Анализ полученных результатов и выводы. В ходе работы изучено влияние шероховатости внутренней поверхности трубок на изменение ΔT и ΔP . Согласно полученным в ходе исследования результатам, шероховатость незначительно влияет на изменение температуры, но оказывает существенное влияние на потери давления. Отсюда можно сделать вывод, что необходимо проводить постобработку после печати на СЛС-установке для снижения шероховатости внутренних стенок трубок ВВТ, а также учитывать ее значение при проектировании ВВТ для производства СЛС-методом.

Для улучшения качества поверхности могут применяться механические, химические, электрохимические и лучевые (лазерные, электронно-лучевые, плазменные) методы [16]. Следует отметить, что для постобработки наружных поверхностей подходит любой из перечисленных методов. Перспективными методами очистки сложных наружных и внутренних поверхностей синтезированных деталей от микрочастиц порошка с низкой адгезией и частиц-сателлитов являются химические и электрохимические. Для глубоких внутренних полостей (более 100 мм) диаметром менее 3 мм наиболее подходит химический способ. Ограничением при выборе метода обработки внутренних полостей может оказаться и их форма. Так, для полостей сложной пространственной геометрии применим только химический метод.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Авдудевский В.С., Галицейский Б.М., Глебов Г.А. *Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике*. Москва, Машиностроение, 1992, 528 с.
- [2] Смекалкин А.С., Иванов А.В. Влияние шероховатости поверхности на коэффициент теплоотдачи рабочих тел в выполненном по аддитивной технологии агрегате наддува. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2022, № 2, с. 109–114. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2022-21-2-109-114>
- [3] Кутателадзе С.С. *Основы теории теплообмена*. Москва, Атомиздат, 1979, 419 с.
- [4] Herwig H., Gloss D., Wenterodt T. A new approach to understanding and modeling the influence of wall roughness on friction factors for pipe and channel flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 2008, vol. 613, pp. 35–53.
- [5] Güllich J.F. *Centrifugal Pumps*. Springer, 2010, 998 p.
- [6] Flack K.A., Schultz M.P. Review of hydraulic roughness scales in the fully rough regime. *Journal of Fluids Engineering*, 2010, vol. 132 (4), 10 p.
- [7] Limbach P., Müller T., Blume M., Skoda R. Numerical and experimental investigation of the cavitating flow in a low specific speed centrifugal pump and assessment of the influence of surface roughness on head prediction. In: *16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*. Apr 10–15, 2016, Honolulu, United States. hal-01890073.
- [8] Акимов С.В. *Разработка методов математического моделирования и повышения энергоэффективности нефтяных магистральных насосов путем модернизации поверхности элементов проточной части: дис. ... канд. техн. наук*. Санкт-Петербург, 2021. 216 с.

- [9] Иноземцев А.А., Плотников А.И. Исследование влияния шероховатости поверхностей проточной части сверхзвуковой высоконапорной ступени осевого компрессора на ее характеристики. *Прикладная механика и техническая физика*, 2015, т. 56, № 2, с. 21–31. DOI: 10.15372/PMTF20150203
- [10] Акимов С.В., Борисов Д.В. Моделирование центробежных насосов с использованием программного комплекса FlowVision. *Компьютерные исследования и моделирование*, 2023, № 4, с. 907–919.
- [11] Садовский Н.И. *Повышение эффективности малорасходных ступеней центробежных компрессоров высокого и сверхвысокого давления на основе изучения влияния числа Рейнольдса и шероховатости на рабочие процессы: дис. ... канд. техн. наук.* Санкт-Петербург, 1994, 343 с.
- [12] Агапов А.В., Селиверстов С.Д. Перспективные конструкции и методики проектирования теплообменных аппаратов, изготавливаемых с применением аддитивных технологий. *Сборник тезисов работ Международной молодежной научной конференции XLVII Гагаринские чтения–2021*. Москва, 2021, с. 114–115.
- [13] Агапов А.В., Ионов А.В. Исследование эффективности теплообменных аппаратов различных конструкций, спроектированных для производства с помощью селективного лазерного спекания. *21-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 21–25 ноября 2022 года. Москва. Тезисы*. Москва, Изд-во «Перо», 2022, с. 85–86.
- [14] Агапов А.В., Ионов А.В., Стародумов А.В. Применение селективного лазерного сплавления при модернизации и производстве трубчатого воздуховоздушного теплообменника. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*, 2023, т. 27, № 1 (99), с. 116–129.
- [15] Классическая обработка изделий, напечатанных на SLM установке. *3DLAM*. URL: <https://addtechno.ru/step6-post-processing> (дата обращения: 24.04.2024).
- [16] Постобработка изделий после 3D-печати. Ограничения и сложности. *TopStanok* URL: https://topstanok.ru/articles/postobrabotka_izdelij_posle_3d_pechati_ogranichenia_i_slozhnosti (дата обращения: 25.04.2024)

Статья поступила в редакцию 25.06.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Агапов А.В., Ионов А.В. Влияние шероховатости поверхности трубок, получаемой методом селективного лазерного сплавления, на эффективность воздуховоздушного теплообменника. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 9. EDN KAKQFM

Агапов Андрей Владимирович — аспирант кафедры 205 «Технология производства двигателей летательных аппаратов», МАИ (НИУ).
e-mail: agapov_andrey@icloud.com

Ионов Алексей Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры 205 «Технология производства двигателей летательных аппаратов», МАИ (НИУ).
e-mail: woln@mail.ru

The influence of tube surface roughness produced by selective laser melting on the efficiency of an air-to-air heat exchanger

© A.V. Agapov, A.V. Ionov

Moscow Aviation Institute, Moscow, 125993, Russian Federation

The paper considers how tube surface roughness obtained by selective laser melting influences on the efficiency of an air-to-air heat exchanger. During the study, a sample was designed, subsequently printed on a selective laser melting machine; and the sample roughness was measured in different areas. Mathematical modeling of conjugate heat exchange in a tube section was performed. In one case, a smooth part was modeled, in the other one, the roughness measured on a printed sample was taken into account when modelling. A comparison of the results was carried out, according to which a significant effect of roughness on hydraulic resistance was revealed. This shows the need to take it into account when designing an air-to-air heat exchanger for production using selective laser melting and the mandatory post-print processing of the product.

Keywords: an air-to-air heat exchanger, selective laser melting, roughness, mathematical modeling

REFERENCES

- [1] Avduevsky V.S., Galitseisky B.M., Glebov G.A. *Osnovy teploperedachi v aviatsionnoy i raketno-kosmicheskoy tekhnike* [Fundamentals of heat transfer in aviation and rocket-space engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992, 528 p.
- [2] Smekalkin A.S., Ivanov A.V. Vliyaniye sherokhovatosti poverkhnosti na koefitsiyent teplootdachi rabochikh tel v vypolnennom po additivnoy tekhnologii agregate nadduva [Influence of surface roughness on the heat transfer coefficient of fluids in an additively manufactured supercharger]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye — VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2022, vol. 21, no. 2, pp. 109–114. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2022-21-2-109-114>
- [3] Kutateladze S.S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of heat transfer theory]. Moscow, Atomizdat, 1979, 419 p.
- [4] Herwig H., Gloss D., Wenterodt T. A new approach to understanding and modelling the influence of wall roughness on friction factors for pipe and channel flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 2008, vol. 613, pp. 35–53.
- [5] Gülich J.F. *Centrifugal Pumps*. Springer, 2010, 998 p.
- [6] Flack K.A., Schultz M.P. Review of hydraulic roughness scales in the fully rough regime. *Journal of Fluids Engineering*, 2010, vol. 132 (4), 10 p.
- [7] Limbach P., Müller T., Blume M., Skoda R. Numerical and experimental investigation of the cavitating flow in a low specific speed centrifugal pump and assessment of the influence of surface roughness on head prediction. *16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, Honolulu, United States, Apr. 2016.
- [8] Akimov S.V. *Razrabotka metodov matematicheskogo modelirovaniya i povysheniya energoefektivnosti neftyanykh magistral'nykh nasosov putem modernizatsii poverkhnosti elementov protochnoy chasti: dis....kand. tekhn. nauk* [Development of methods for mathematical modeling and increasing the energy

- efficiency of oil main pumps by modernizing the surface of flow part elements. Diss. ... Cand. Sc. (Eng.). Saint-Petersburg, 2021, 216 p.
- [9] Inozemtsev A.A., Plotnikov A.I. Issledovaniye vliyaniya sherokhovatosti pov-
erkhnostey protochnoy chasti sverkhzvukovoy vysokonapornoy stupeni oseвого
kompссора na yeye kharakteristiki [Investigation of the effect of roughness of
duct surfaces of a supersonic high-pressure stage of an axial compressor on its
characteristics]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of
Applied Mechanics and Technical Physics*, 2015, vol. 56, no. 2, pp. 21–31. DOI:
10.15372/PMTF20150203
- [10] Akimov S.V., Borisov D.V. Modelirovaniye tsentrobezhnykh nasosov s
ispol'zovaniyem programmnoy kompleksa FlowVision [Centrifugal pump
modeling in FlowVision CFD software]. *Komp'yuternyye issledovaniya i mod-
elirovaniye — Computer Research and Modeling*, 2023, no. 4, pp. 907–919.
- [11] Sadovsky N.I. Povysheniye effektivnosti maloraskhodnykh stupeney tse-
ntrobezhnykh kompressorov vysokogo i sverkhvysokogo davleniya na osnove
izucheniya vliyaniya chisla Reynol'dsa i sherokhovatosti na rabochiye protsessy:
dis...kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of low-expenditure steps of
centrifugal compressors of high and ultra-high pressure based on the study of the
influence of Reynolds number and roughness on work processes. Diss. ... Cand.
Sc. (Eng.). Saint-Petersburg, 1994, 343 p.
- [12] Agapov A.V., Seliverstov S.D. Perspektivnyye konstruksii i metodiki proyektiro-
vaniya teploobmennyykh apparatov, izgotavlivayemykh s primeneniyyem addi-
tivnykh tekhnologiy [Promising designs and methods for the design of heat ex-
changers made using additive technologies]. In: *Sbornik tezisov rabot Mezhdun-
arodnoy molodozhnoy nauchnoy konferentsii XLVII Gagarinskiye chteniya 2021*
[XLVII Gagarin Science Conference]. Moscow, 2021, pp. 114–115.
- [13] Agapov A.V., Ionov A.V. Investigation of the efficiency of heat exchangers of
various designs designed for production using selective laser sintering. In: *21st
International Conference "Aviation and Cosmonautics" (AviaSpace–2022). 21–
25 November 2022. Moscow. Abstracts*. Moscow, Pero Publ., 2022, pp. 85–86.
- [14] Agapov A.V., Ionov A.V., Starodumov A.V. The use of selective laser fusion in
the modernization and production of a tubular air-to-air heat exchanger. *Vestnik
Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta —
Vestnik USATU*, 2023, vol. 27, no. 1 (99), pp. 116–129.
- [15] Klassicheskaya obrabotka izdeliy, napechatannykh na SLM ustanovke [Classical
processing of products printed on SLM installation]. *3DLAM*. Available at:
<https://addtechno.ru/step6-post-processing> (accessed April 24, 2024).
- [16] Postobrabotka izdeliy posle 3D pechati. Ogranicheniya i slozhnost [Post-cutting
products after 3D printing. Restrictions and complexity]. *TopStanok* Available
at: https://topstanok.ru/articles/postobrabotka_izdelij_posle_3d_pechati_ogranichenia_i_slozhnosti (accessed April 25, 2024)

Agapov A.V., Postgraduate, Department 205 Technology for the production of aerial ve-
hicles, Moscow Aviation Institute. e-mail: agapov_andrey@icloud.com

Ionov A.V., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department 205 Technology for the
production of aerial vehicles, Moscow Aviation Institute. e-mail: woln@mail.ru