

Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 10. С. 475–480
Thermal processes in engineering, 2022, vol. 14, no. 10, pp. 475–480

Научная статья
УДК: 519.682.3
DOI: 10.34759/tpt-2022-14-10-475-480

Особенности расчета параметров теплообмена на поверхности объектов авиационной техники с использованием инструментария Data Science

Н.О. Матковский^{1,2✉}, В.В. Тишков¹, А.Н. Гусев^{1,2}, А.Ю. Ермолаев^{1,2}

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

²Государственное машиностроительное конструкторское бюро «Вымпел» имени И.И. Торопова, Москва, Россия

matkovskiy@yandex.ru✉

Аннотация. Активное развитие авиационных робототехнических систем приводит к увеличению сложности и трудоемкости процессов проектирования и исследования указанных объектов. Разрабатываемые объекты авиационной техники требуют решения вопросов повышенной интенсивности внешних физических воздействий, что влечет за собой постановку сложных математических задач, требующих вычисления и анализа больших объемов данных. В работе предложена методика по расчету коэффициентов теплоотдачи, реализованная на языке программирования Python с применением инструментария для исследования данных: Pandas, NumPy, Matplotlib. Применение инструментария Data Science в технических исследованиях существенно уменьшает время на проведение расчетов, поиск и анализ возможных ошибок за счет удобства средств по визуализации больших объемов данных, возможности сведения массива данных в удобный формат файла и синтаксической простоты используемого языка программирования. Распределение температуры на поверхности параболической части объекта авиационной техники, смоделированное по вычисленным значениям коэффициентов теплоотдачи, имеет достаточную сходимость с данными, полученными в результате экспериментальной отработки.

Ключевые слова: DataFrame, метод эффективной длины, тепловой поток

Для цитирования. Матковский Н.О., Тишков В.В., Гусев А. Н., Ермолаев А.Ю. Особенности расчета параметров теплообмена на поверхности объектов авиационной техники с использованием инструментария Data Science // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 10. С. 475–480. DOI: 10.34759/tpt-2022-14-10-475-480

Original article

Specifics of heat exchange parameters computing on the surface of aerotechnics employing Data Science toolkit

N.O. Matkovskiy^{1,2✉}, V.V. Tishkov¹, A.N. Gusev^{1,2}, A.Yu. Ermolaev^{1,2}

¹ Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

² State Machine Building Design Bureau «Vympel» by name I.I. Toropov, Moscow, Russia

matkovskiy@yandex.ru✉

© Матковский Н.О., Тишков В.В., Гусев А.Н., Ермолаев А.Ю., 2022

Abstract. Active development of aviation robotic systems leads to the complexity increase of the design and research processes of the said objects. The aerotechnics objects (ATO) being developed require solving the issues of increased external physical impacts, which entails setting complex mathematical problems requiring computation and big data analysis.

The authors propose the technique for heat transfer coefficients computing, realized in the Python programming language, employing toolkits for the data analysis, such as Pandas and Matplotlib. The Data Science toolkit application in technical studies significantly reduces computing time, searching and analysis of possible errors due to the ease of use of big data visualization tools, capability of reducing a data array to the convenient file format and syntactical simplicity of the programming language in use.

Temperature distribution on the ATO the parabolic surface, simulated by the computed values of the heat transfer coefficients demonstrates sufficient convergence with the result of the experiment.

Keywords: Heat exchange, DataFrame, effective length method, heat flux

For citation. Matkovskiy N.O., Tishkov V.V., Gusev A.N., Ermolaev A.Yu. Specifics of heat exchange parameters computing on the surface of aerotechnics employing Data Science toolkit. *Тепловые процессы в технике = Thermal processes in engineering*, 2022, vol. 14, no. 10, pp. 475–480. (In Russ.). DOI: 10.34759/tpt-2022-14-10-475-480

Постановка задачи

Одним из наиболее важных показателей при моделировании аэродинамического нагрева объектов авиационной техники (ОАТ) является корректное вычисление коэффициентов теплоотдачи на его поверхности. Основной проблемой в решении задачи расчета параметров теплообмена является нестационарность траекторных параметров ОАТ, в частности углов атаки, что существенно усложняет моделирование физических воздействий, в особенности при больших скоростях полета. В работе [1] с использованием теоретических и экспериментальных исследований доказано, что с увеличением скорости набегающего потока величина коэффициентов теплоотдачи на поверхности объекта существенно увеличивается, приводя к увеличению температуры корпуса ОАТ. При расчете коэффициентов теплоотдачи применяется метод эффективной длины, в котором действительное течение заменяется течением над пластиной, с параметрами потока, равными параметрам рассматриваемого сечения ОАТ. Длина пластины x_{eff} выбирается из условия нарастания на ней теплового пограничного слоя толщиной, равной толщине в рассматриваемом сечении тела. Выбор данного метода обусловлен необходимостью точного учета геометрии ОАТ, что помогает избежать допущений, которые приводят к недостаточной сходимости результатов расчета рассматриваемых объектов с данными проводимых экспериментальных от-

работок [2]. В работе [3] проведено теоретическое и экспериментальное исследование температурного нагружения головной части ОАТ и его оперения как наиболее теплонапряженных участков. Скорость полета составляла $M = 7$. Наибольшую тепловую нагрузку испытывала составляющая летательного аппарата, обладающая криволинейной геометрической формой. Головная часть объекта, содержащая жизненно необходимую аппаратуру, требует не только исключительный тип теплозащитных материалов, но и корректное проведение всех теоретических и экспериментальных испытаний перед этапом летных испытаний. В работе [4] описан способ определения параметров теплообмена с использованием термоиндикаторных покрытий: чем выше ожидаемый уровень коэффициента теплоотдачи, тем выше критическая температура термоиндикатора, наносимого на соответствующий участок поверхности. Исследования также показали необходимость в тщательном определении параметров теплообмена тел, обладающих параболической геометрией.

Решение задачи

Основная работа построена на создании объекта DataFrame для дальнейшего манипулирования индексированными данными. Объекты DataFrame – многомерные массивы с метками для строк и столбцов, а также зачастую с неоднородным типом данных или пропущенными данными. Помимо удобного ин-

терфейса для хранения маркированных данных библиотека Pandas, которой принадлежит объект DataFrame, реализует множество операций с данными. Структура данных dfarray библиотеки NumPy представляет все необходимые возможности для работы с хорошо упорядоченными данными для решения задач в численном виде. Однако NumPy имеет свои ограничения, которые становятся заметными, когда требуется работать с маркированными и пропущенными данными, что часто встречается при исследовании параметров теплообмена на поверхности ОАТ. Ограничения также проявляются при попытках выполнения операций, не подходящих для поэлементного транслирования: группировки, создания сводных таблиц и др. Библиотека Pandas, особенно ее объекты Series и DataFrame, основана на структурах массивов библиотеки NumPy и обеспечивает эффективную работу над подобными задачами «очистки данных». В свою очередь, библиотека Matplotlib – мультиплатформенная библиотека для визуализации данных, основанная на массивах библиотеки NumPy и спроектированная в расчете на работу с обширным стеком SciPy [5].

В работе [6] приведены алгоритмы расчета температурных полей летательных аппаратов (ЛА), определения коэффициента теплоотдачи α на внутренней и внешней поверхности отсека ЛА, которые вполне применимы для решения некоторого класса задач, но в ряде случаев, например для тел сложной геометрии, могут привести к завышенным значениям α и температуры аппаратуры ОАТ.

При расчете коэффициентов теплоотдачи используемым методом эффективной длины [7], необходимые значения $x_{eff i}$, которые вычисляются по интегральной зависимости:

$$x_{eff i} = \begin{cases} \frac{\int_0^x R^2(x_i)_j \rho_{w_i} u_i dx}{R^2(x_i)_j \rho_{w_i} u_i} & \text{– для ламинарного} \\ & \text{пограничного слоя,} \\ \frac{\int_0^x R^{1.25}(x_i)_j \rho_{w_i} u_i dx}{R^{1.25}(x_i)_j \rho_{w_i} u_i} & \text{– для турбулентного} \\ & \text{пограничного слоя.} \end{cases} \quad (1)$$

Для формулы (1) введены следующие переменные:

- $R(x_i)_j$ – радиус в i -ом сечении ОАТ;
- x_i – длина по образующей ОАТ;
- $R^2(x_i)_j \rho_{w_i} u_i = h_{x_i}$ и $R^{1.25}(x_i)_j \rho_{w_i} u_i = h_{x_i}$.

Известно, что метод численного интегрирования функции одной переменной заключается в замене на каждом элементарном отрезке подынтегральной функции на многочлен первой степени. Подынтегральная функция аппроксимируется трапециями [8].

Преобразуя интегральную зависимость, имеем:

$$x_{eff i} = \frac{\int_0^x h_{x_i} dx}{h_{x_i}} = \frac{F_{x_i}}{h_{x_i}},$$

где F_{x_i} – площадь под интегралом.

Для каждого сечения находим

$$x_{eff i} = \frac{F_{x_{i+1}}}{h_{x_{i+1}}},$$

где $F_{x_{i+1}} = F_{x_i} + \frac{(h_{x_{i+1}} + h_{x_i})}{2} (x_{i+1} - x_i)$. (2)

Графическое изображение интегрирования функции в разных масштабах представлено на рис. 1.

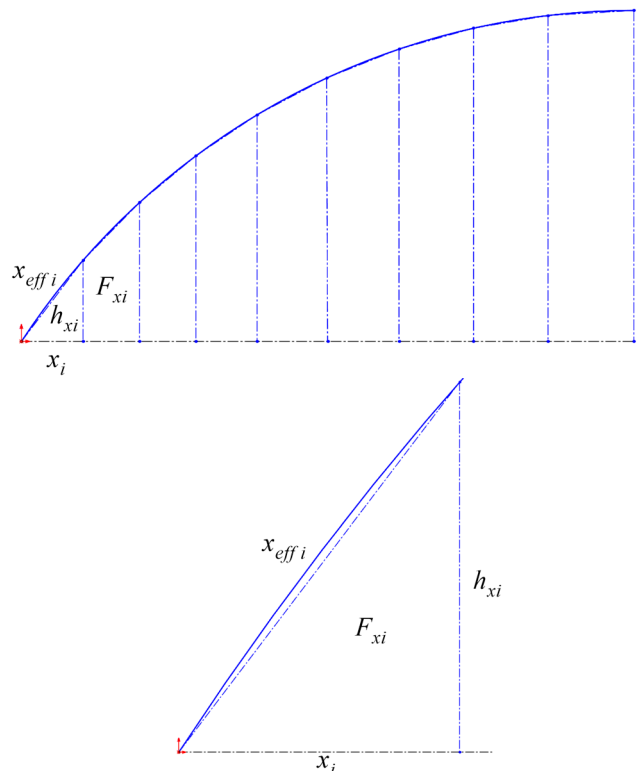


Рис. 1. Визуализация исследуемой функции

Основной проблемой при нахождении F_{xi+1} является работа с индексируемыми по i -му значению параметрами, решить которую помогает функция Pandas «Shift()», сдвигающая индекс на необходимое количество периодов. Функция принимает скалярный параметр, называемый периодом, который представляет количество сдвигов для необходимой оси. Для заполнения данных за пределами граничных значений использована функция fillna(0) [9]. На рис. 2 показана блок-схема действия данной функции.

Метод «Mask()», применяемый в качестве условий if-then для каждого элемента Pandas DataFrame, использовался при расчете аэродинамических критериев. Например, поправка на сжимаемость K_i имеет ряд условий, указанных в формуле (3), учесть которые помогает метод «Mask()»:

$$K_i = \begin{cases} \left(\frac{\mu_i \rho_i}{\mu_{wi} \rho_{wi}} \right)^{1/3} & \text{при } \frac{k_i - 1}{2} M_i^2 \leq 1 - \frac{T_{wi}}{T_i}, \\ \left(\frac{\mu_{*i} \rho_{*i}}{\mu_{wi} \rho_{wi}} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_i \rho_i}{\mu_{*i} \rho_{*i}} \right)^{1/15 T_{wi}/T_{ei}} & \text{при } \frac{k_i - 1}{2} M_i^2 > 1 - \frac{T_{wi}}{T_i}. \end{cases} \quad (3)$$

Рассчитанные значения коэффициентов теплоотдачи визуализированы при помощи библиотеки Matplotlib (рис. 3). При работе с данной библиотекой используется функция pr.arrange(),

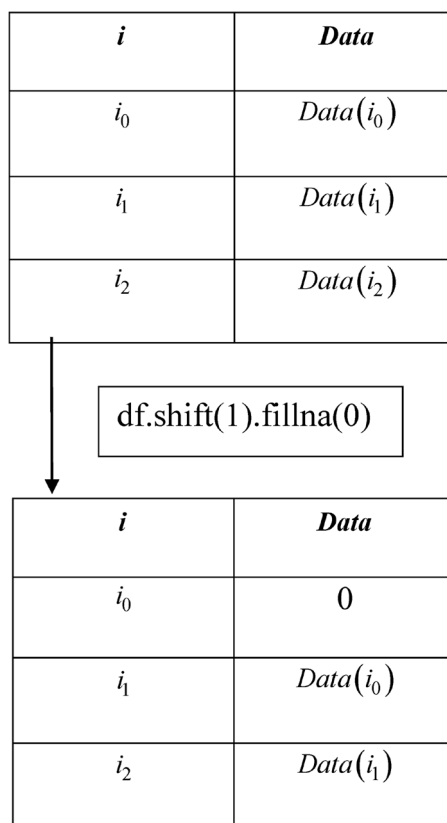


Рис. 2. Блок-схема метода Pandas «Shift().fillna(0)»

которая возвращает одномерный массив с равномерно разнесенными значениями внутри заданного интервала. Коэффициенты теплоотдачи α на поверхности ОАТ вычисляются по формулам:

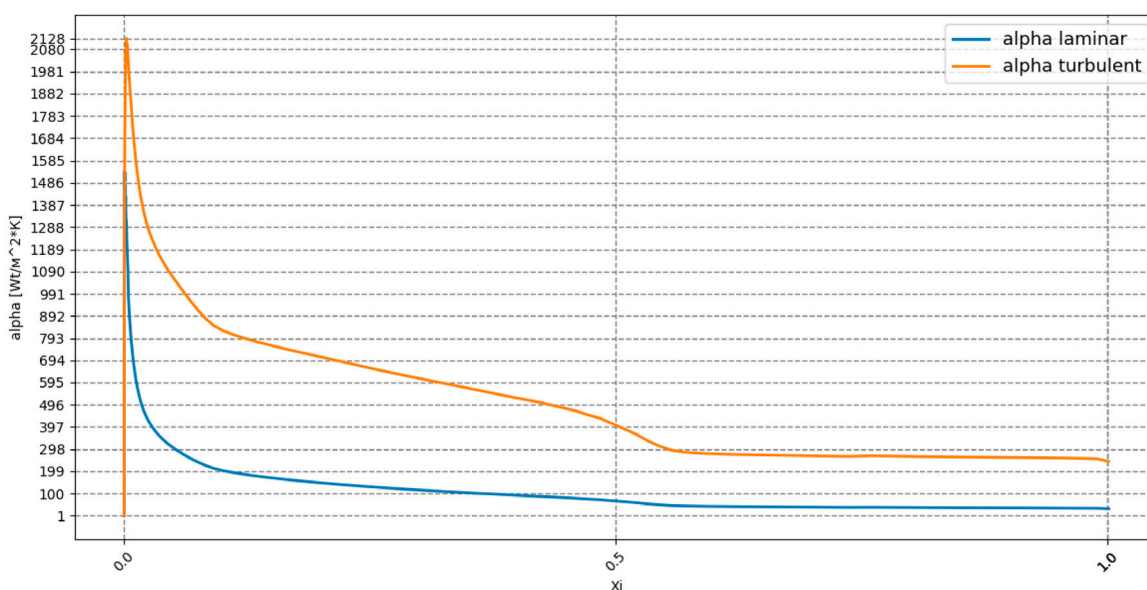


Рис. 3. Распределение значений коэффициента теплоотдачи α на поверхности ОАТ от координаты по образующей

$$\alpha_{ilaminar} = \frac{Nu_{w\,eff\,i} \lambda_{wi}}{x_{eff\,i}},$$

$$\alpha_{iturbulance} = \frac{Nu_{w\,eff\,i} \lambda_{wi}}{x_{eff\,i}}.$$

Конечным результатом расчета является сведение всего объема полученных данных DataFrame в CSV-файл, после чего по значениям α и T_e рассчитываются температуры на корпусе ОАТ.

Вывод

По результатам расчета коэффициентов теплоотдачи, реализованных на языке программирования Python с применением инструментария Data Science и метода эффективной длины, получено распределение коэффициентов теплоотдачи на внешней поверхности ОАТ, имеющего параболическую форму. В работе использован метод эффективной длины для оценки тепловых потоков, позволяющий наиболее точно оценить влияние аэродинамического нагрева на ОАТ, обладающие сложной геометрической формой и совершающие высокоскоростной полет.

Рассчитанное с учетом полученных параметров теплообмена распределение температуры на поверхности ОАТ имеет достаточную сходимость с данными экспериментальной отработки. Реализация программного обеспечения позволяет рассчитать коэффициенты теплоотдачи на поверхности ОАТ без дополнительных знаний синтаксиса языка программирования. Инженеру требуется знать только условия прогнозируемого полета и закон изменения криволинейного профиля ОАТ.

Применение инструментария Data Science существенно уменьшило время на проведение расчетов, поиск и анализ возможных ошибок за счет удобства средств по визуализации больших объемов данных, возможности сведения массива данных в формат CSV-файла и синтаксической простоты языка программирования Python.

Список источников

1. Иордан Ю.В., Давыдович Д.Ю., Жариков К.И., Дронь М.М. Экспериментальные исследования теплового нагружения элемента головного обтекателя ракеты на атмосферном участке траектории его спуска // Динамика

систем, механизмов и машин. 2017. Том 5. № 2. С. 37–42. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-2-37-42

2. **Матковский Н.О., Агишев Р.Ю.** Методика расчета параметров теплообмена в нестационарной постановке при обтекании тел сложной формы // XIII Всероссийский межотраслевой молодежный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики»: сборник аннотаций конкурсных работ. Москва: Издательство «Перо», 2021. С. 149–150.
3. **Amudsen R.M., Leonard C.P., Bruce W.E.** Hyper-X hot structure comparison of thermal analysis and flight data. *15 Thermal and Fluid Analysis Workshop (TFAWS)*. 30 August 2004, Pasadena, California, 24 p. URL: https://tfaws.nasa.gov/TFAWS04/Website/program/paper/TFAWS04_RAmudsen_Aero_CFD.pdf (дата обращения: 19.09.2022).
4. **Боровой Б.Я.** Экспериментальные исследования теплообмена и теплозащиты гиперзвуковых летательных аппаратов // Лесной вестник. 2000. № 2. С. 39–47.
5. **Плас Дж. Вандер.** Python для сложных задач: наука о данных и машинное обучение. Санкт-Петербург: Издательство «Питер», 2020. 576 с.
6. **Егоров И.А.** Тепловое проектирование летательных аппаратов. Определение температурных полей ЛА на этапе проектирования: учебное пособие. Москва: Издательство МАИ, 2019. 52 с.
7. **Мякочин А.С., Никитин П.В.** Конспект лекций (теоретический материал) по дисциплине «Термогазодинамика и теплообмен в элементах конструкций космических летательных аппаратов». Москва: Издательство МАИ, 2015, 556 с.
8. **Солнцев В.П., Галицкий Б.М., Глебов Г.А., Калмыков Б.М., Шкарбан И.И., Пирогов А.Е.** Методические указания к расчетно-графическим работам «Теплообмен на поверхности летательных аппаратов» / под ред. В.П. Солнцева. Москва: Издательство МАИ, 1987. 47 с.
9. Полезные функции Python [Электронный ресурс]. URL: <https://python.ivan-shamaev.ru/5-usful-functions-of-pandas-python-for-data-science/> (дата обращения: 02.02.2022).

References

1. **Jordan Y.V., Davydovich D.Y., Zharikov K.I., Dron M.M.** Eksperimental'nye issledovaniya teplovogo nagruzeniya ehlementa golovnogo obtekatelya rakety na atmosfernom uchastke traektorii ego spуска [Experimental researches of thermal loading of a rocket head fairing element in the atmospheric section of its descent trajectory]. *Dynamics of systems, mechanisms and machines*, 2017, vol. 5, no. 2, pp. 37–42. (In Russ.). DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-2-37-42.
2. **Matkovskiy N.O., Agishev R.Yu.** Metodika rascheta parametrov teploobmena v nestatsionarnoi postanovke pri obtekanii tel slozhnoi formy [Calculation of heat transfer parameters in a non-stationary setting bodies of complex shape]. *XIII Vserossiiskii mezhotraslevoi molodezhnyi konkurs nauchno-tekhnikeskikh rabot i projektov "Molodezh' i budushchee aviatsii i kosmonavtiki": sbornik annotatsii konkursnykh rabot*. Moscow, 2021. pp. 149–150. (In Russ.)
3. **Amudsen R.M., Leonard C.P., Bruce W.E.** Hyper-X hot structure comparison of thermal analysis and flight data. *15 Thermal and Fluid Analysis Workshop (TFAWS)*. 30 August

- 2004, Pasadena, California, 24 p. URL: https://tfaws.nasa.gov/TFAWS04/Website/program/paper/TFAWS04_RAmundsen_Aero_CFD.pdf (date of application: 19.09.2022).
4. **Borovoy B.Ya.** Eksperimental'nye issledovaniya teploobmena i teplozashchity giperzvukovykh letatel'nykh apparatov [Experimental researches of heat exchange and thermal protection of hypersonic aircraft]. *Lesnoy vestnik*, 2000, no. 2, pp. 39–47. (In Russ.)
 5. **Plas J. Vander.** Python dlya slozhnykh zadach [Python for complex tasks: Data Science and Machine Learning]. Saint Petersburg, 2020, 576 p. (In Russ.)
 6. **Egorov A.I.** Teplovoe proektirovanie letatel'nykh apparatov. Opredelenie temperaturnykh polei LA na etape proektirovaniya [Thermal design of aircraft. Determination of the temperature fields of the aircraft at the design stage]. Moscow: Izdatel'stvo MAI, 2019, 52 p. (In Russ.)
 7. **Myakochin A.S., Nikitin P.V.** Metodicheskie ukazaniya k raschetno-graficheskim rabotam “Teploobmen na poverkhnosti letatel'nykh apparatov” [Lecture notes (theoretical material) on the discipline of “Thermo-gas dynamics and heat transfer in the structural elements of spacecraft”]. Moscow, 2015, 556 p. (In Russ.)
 8. **Solncev V.P., Galiceyskiy B.M., Glebov G.A., Kalmikov B.M., Shkarban I.I., Pirogov A.E.** Metodicheskie ukazaniya k raschetno-graficheskim rabotam “Teploobmen na poverkhnosti letatel'nykh apparatov” [Methodological guidelines for computational and graphic works “heat exchange on the surface of aircraft”]. Ed. V.P. Solncev. Moscow, 1987, 47 p. (In Russ.)
 9. **Poleznye funktsii Python** [Useful Python Functions]. URL: <https://python.ivan-shamaev.ru/5-usful-functions-of-pandas-python-for-data-science/> (date of application: 02.02.2022).

Статья поступила в редакцию 20.03.2022; одобрена после рецензирования 12.08.2022; принята к публикации 28.09.2022.

The article was submitted on 20.03.2022; approved after reviewing on 12.08.2022; accepted for publication on 28.09.2022.

Учредитель и издатель журнала:

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-72651 от 16.04.2018

Редактор *Медведева В.Ф.*, e-mail: tpt@mai.ru

Оригинал-макет и электронная версия изготовлены в МАИ.

Сдано в набор 10.10.2022. Подписано в печать 25.10.2022.

Формат 60×90 1/8. Печать цифровая. Усл. печ. л. 5.82. Уч.-изд. л. 6.35. Тираж 55 экз. «Свободная цена». Заказ № 249

Отпечатано с готового оригинал-макета

Типография Издательства МАИ

(МАИ), Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993