

# Разработка методики сборки соплового аппарата с использованием методов кластеризации

В.А. Печенин  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
vadim.pechenin2015@gmail.com

Е.Ю. Печенина  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
ek-ko@list.ru

А.В. Куприянов  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
ssau.yap@gmail.com

**Аннотация**—Разработана методика для комплектации соплового аппарата, основанная на использовании численной модели, измеренных данных и методов кластеризации, направленная на снижение разноплощадности сечений между лопатками соплового аппарата. Проведены численные эксперименты по комплектации шести сопловых аппаратов с использованием разработанной методики комплектации. Разработанная методика показала лучшие результаты в сравнении с существующими подходами.

**Ключевые слова**— сборка, кластеризация, stl, сопловой аппарат, измеренные данные.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей двигателестроения является снижение трудоемкости и повышение точности комплектации лопаточных машин. Лопатки ротора и статора изготавливаются с допусками, которые не позволяют обеспечивать полную взаимозаменяемость при сборке. В связи с этим лопатки комплектуют с дисками за несколько итераций – пересборок [1]. Традиционно комплектацию делают вручную с использованием специальных методик (сортировка по массе или по части отклонений геометрических параметров), что сопровождается пересборками всего комплекта [2], заменами лопаток и зачастую неоптимальностью достигаемых итоговых эксплуатационных параметров. Передовой технологией для контроля лопаток сопловых аппаратов является их 3D сканирование [3], и получаемые данные после соответствующей обработки можно использовать для имитационного моделирования сборки [4, 5] и численных расчетов оптимальных расстановок деталей в комплекте. В работе предложена методика, отличительной особенностью которой является использование цифровых моделей лопаток (по данным), компьютерного расчета оптимальной расстановки лопаток и методов кластеризации.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Расстановка лопаток осуществляется по критерию разности разницу между наибольшей и наименьшей площадями проходных сечений (ППС) отдельных межлопаточных каналов в аппарате (разноплощадность  $\Delta$ ) и суммарный ППС. Авторами была разработана модель, описанная в [6], позволяющая на основании измеренных данных из файла \*.stl (после сканирования) выполнять компьютерный расчет площади проходного сечения между двумя сопловыми лопатками. На рис. 1 приведена модель ППС между двумя лопатками.

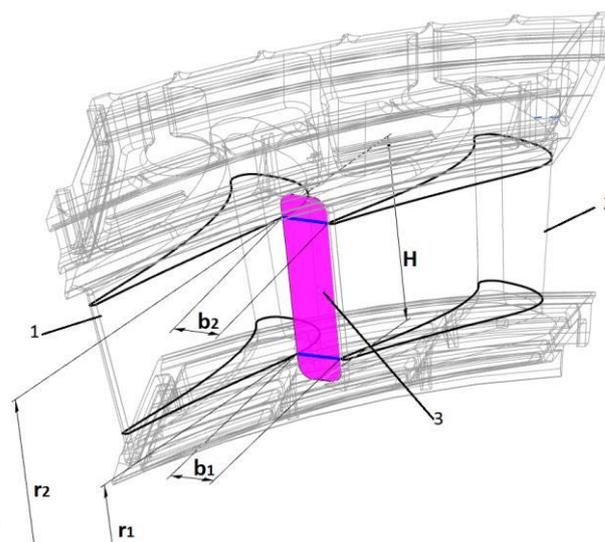


Рис. 1. Параметры площади: 1, 2 – первая и вторая лопатки, 3 – ППС;  $r_1$  и  $r_2$  – расстояния до сечений,  $b_1$  и  $b_2$  – кратчайшие расстояния в сечениях;  $H$  – расстояние между сечениями

Основная идея разработанной методики состоит в том, что рядом должны устанавливаться лопатки с близкими параметрами отклонений. Разработанная методика включает в себя четыре этапа: нормализация параметров (диапазон от 0 до 1); кластеризация на группы; сортировка центров кластеров; комплектация лопаток с использованием групп и модели расчета ППС. Разработанная методика применима как для расстановки лопаток внутри одного комплекта (имеются лопатки только для одного венца), так и для комплектации нескольких венцов. Для кластеризации использовался алгоритм k-means. Количество групп подбиралось исходя из того, что в классе не должно быть меньше пяти экземпляров и количество классов не меньше количества комплектов. На третьем этапе выполняется сортировка групп. Рассчитываются расстояния от центров (кластеров) каждой группы до нулевой точки. Так как параметры нормализованы в диапазон [0, 1], меньшее значение будет соответствовать 0, поэтому рассчитываются расстояния до нулевой точки в n-мерном пространстве нормированных параметров. Первым ставится группа с меньшими значениями координат центра, последней – с наибольшими (ближайшими к n-мерной точке из единиц).

На четвертом этапе выполняется собственно подбор лопаток. Из группы с наименьшими значениями координат центра выбирается лопатка, параметры которой ближе всего к нулевой точке. Лопатки располагаются по окружности. Затем выбирается лопатка

справа, параметры которой являются ближайшими к параметрам первой лопатки внутри первой группы. Рассчитывается ППС между этими двумя лопатками с помощью разработанной модели из [6]. Следующая лопатка, справа от первой, выбирается методом прямого подбора из оставшихся лопаток группы: рассчитываются ППС между первой лопаткой и остальными, выбирается ППС, имеющий меньшее отклонение от ППС между первой и второй лопатками. Четвертая лопатка подбирается уже справа от второй лопатке, аналогично как подбиралась третья, ППС сравнивается с ППС между третьей и первой лопаткой. Пятая ставится слева от третьей, шестая справа от четвертой. Когда заканчиваются лопатки первой группы, переходят к лопаткам второй группы и так далее. Когда комплект собран, следующий собирается по тем же шагам, описанным выше.

Было проведено имитационное моделирование лопаток для шести комплектов (пять параметров отклонений, 180 лопаток). Разработанная методика сравнивалась со случайной расстановкой и методикой, основанной на сортировке лопаток по возрастанию комплексного параметра (декартово расстояние из пяти рассматриваемых параметров).

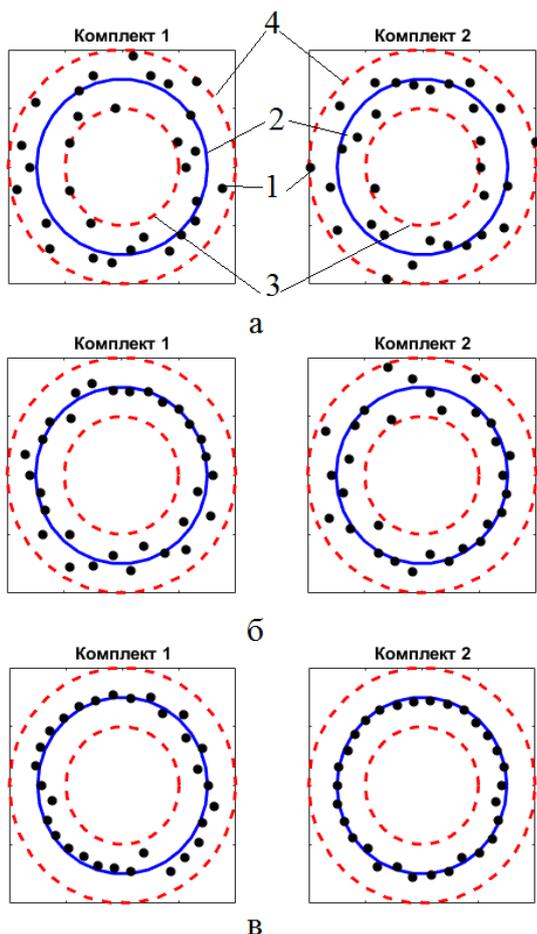


Рис. 2. Результаты ППС: 1 – значение для лопатки, 2 – конструкторское значение; 3,4 – нижняя и верхняя границы поля допуска а) случайная расстановка б) методика с сортировкой; в) предлагаемая методика

Допуск на отклонение в горле решетки, согласно ОСТ 1 02571-86, составил  $\pm 0,2$  мм. Суммарное номинальное значение ППС в сечении – 218,5686 мм. В алгоритме кластеризации использовалось 8 классов и метрика Евклида. Параметрами для кластеризации являлись величины отклонений формы и расположения каждой лопатки: смещения центров масс, отклонение угла закрутки и отклонение формы спинки и корыта. Величину  $\Delta$  удалось снизить с 0,38–0,58 мм до 0,10 – 0,34 мм в шести комплектах. Отклонение в горле решетки не превысило допуск только при использовании разработанной методики.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных вычислений выявлено, что изготовленные в допуске лопатки, отклонения формы и расположения которых подчиняются нормальному закону распределения, нельзя собирать по методу полной взаимозаменяемости, так как не соблюдаются требования по точности сборочного параметра, в частности величина ППС и разноплощадности  $\Delta$ . Разработанную методику можно охарактеризовать как методику сборки, основанную на использовании метода индивидуального подбора с кластеризацией. Разработанная методика позволяет существенно улучшить достигаемые сборочные параметры с первой сборки.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта Президента Российской Федерации (номер МК-2156.2022.1.6).

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Олейникова, Е.В. Метод индивидуального подбора деталей как основа обеспечения качества сборки высокоточных изделий / Е.В. Олейникова, В.В. Непомилуев, А.Н. Семенов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2016. – № 4(39). – С. 37-42.
- [2] Осипович, Д.А. Исследование алгоритмов подбора лопаток при сборке сопловых аппаратов газотурбинного двигателя / Д.А. Осипович, С.Г. Ярушин, А.Б. Макеев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2018. – № 7(216). – С. 313-319.
- [3] Расчёт фактической площади проходного сечения соплового аппарата (межлопаточных каналов лопаток) по данным оцифровки на измерительном комплексе ATOS II и программном обеспечении Geomagic Qualify // Методика №554-20-1. – ОАО "Авиадвигатель", 2011. – 63 с.
- [4] Ameta, G. Comparison of spatial math models for tolerance analysis: tolerance-maps, deviation domain, and TTRS / G. Ameta, S. Samper, M. Giordano // J Comput Inf Sci Eng. – 2011. – Vol. 11(2). – P. 255-267.
- [5] Das, A. Transfer function of assembly process with compliant non-ideal parts / A. Das, P. Franciosa, P.R.S. Prakash, D. Caglarelk // Procedia CIRP. – 2014. – Vol.21. – P. 177-182.
- [6] Pechenina, E.Yu. Model of analysis of the results of geometry scanning of turbine nozzles / E.Yu. Pechenina, V.A. Pechenin, M.A. Bolotov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1155. – P. 012030.