

СРАВНЕНИЕ НИЗКОУРОВНЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ПЛЁНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ: КОРРЕЛЯЦИИ И МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Кондратьев В.Н.¹¹АО «ОДК-Авиадвигатель», Пермь, kondr.wn@mail.ru*Ключевые слова: охлаждение турбин, плёночное охлаждение*

Наиболее трудновыполнимыми и одновременно взаимоисключающими требованиями, предъявляемыми к современным авиационным газотурбинным двигателям, являются высокая экономичность и длительный ресурс [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Из этих требований для деталей горячей части следует необходимость увеличения эффективности и равномерности охлаждения.

Добиться высокой эффективности охлаждения можно внедрением новых конструкций, например, проникающего двухстенного охлаждения, или оптимизацией существующих систем охлаждения [2]. Однако такая оптимизация системы охлаждения в составе лопатки требует большого числа итераций изменения конструкции и оценки её теплового состояния и поэтому реализуема посредством вычислительных экспериментов. Вычислительные эксперименты необходимые для достоверного моделирования температурного поля на поверхности лопатки проводятся с помощью зарубежных программных пакетов и весьма ресурсозатратны. Низкоуровневые одномерные модели сетей гидравлических и тепловых потоков, в состав которых обычно входят корреляционные модели плёночного охлаждения, лишены этого недостатка, но их точность недостаточна для оптимизации. Замена отдельных элементов низкоуровневых моделей моделями на основе машинного обучения имеет большой потенциал, так как их применение может увеличить точность моделей.

Основной корреляцией для ряда цилиндрических отверстий является корреляция Балдауфа [3], которая связывает осреднённую поперёк потока адиабатическую эффективность плёночного охлаждения с основными параметрами:

$$\eta_f(x) = f\left(\frac{x}{D}, M, \frac{s}{D}, \alpha, Tu\right), \quad (1)$$

где M – параметр вдува, D – диаметр цилиндрического отверстия, P – отношение давлений внутри и снаружи лопатки, s – поперечный шаг отверстий, α – угол наклона отверстий к поверхности, Tu – уровень турбулентности в основном потоке. Тихонов А. С. в [4] модифицировал данную корреляцию для учета влияния кривизны профиля спинки, однако она остаётся недостаточно универсальной.

Распределение эффективности охлаждения по поверхности позволяет оценить корреляция Голдштейна, модифицированная Мюрреем [5], наиболее совершенный вариант которой представлен в уравнении (2):

$$\eta_f(x, y) = \frac{MU_\infty D}{8\alpha_{therm}\left(\frac{x}{D} + x_{dec}\right)} e^{-\left(\frac{|y|}{DC_2}\right)^{C_1}}, \quad (2)$$

где коэффициенты α_{therm} , x_{dec} являются функциями параметра вдува, а C_1 и C_2 – параметра вдува и безразмерного расстояния вдоль потока. Такая зависимость неплохо моделирует эффективность плёночного охлаждения (рисунок 10), но не учитывает угол наклона отверстия к поверхности и угол скоса к потоку.

В мировом двигателестроении диффузорных отверстия успешно применяются уже более 25 лет в системах охлаждения камер сгорания и лопаток турбин, поэтому еще

в 2011 году была опубликована [6] корреляция (уравнение 3), связывающая осреднённую поперёк потока адиабатическую эффективность с рядом ключевых параметров:

$$\eta_f(x) = f\left(\frac{x}{D}, M, \frac{s}{D}, AR, \frac{t}{s}\right), \quad (3)$$

где AR – отношение площади на выходе из отверстия к площади на входе, t – ширина отверстия на выходе.

Регрессия на основе Гауссовых процессов (Gaussian process regression – GPR) является одним из алгоритмов машинного обучения, которая позволяет воспроизводить сложные нелинейные зависимости. Обученная на весьма небольшом наборе данных из [7], модель даёт неплохие результаты по сравнению с корреляцией (уравнение 3). Результаты сравнения данной модели, созданной в специализированном ПО для инженерных вычислений с использованием оптимизации параметров для лучшего соответствия, с корреляцией для диффузорных отверстий представлены на рис. 1.

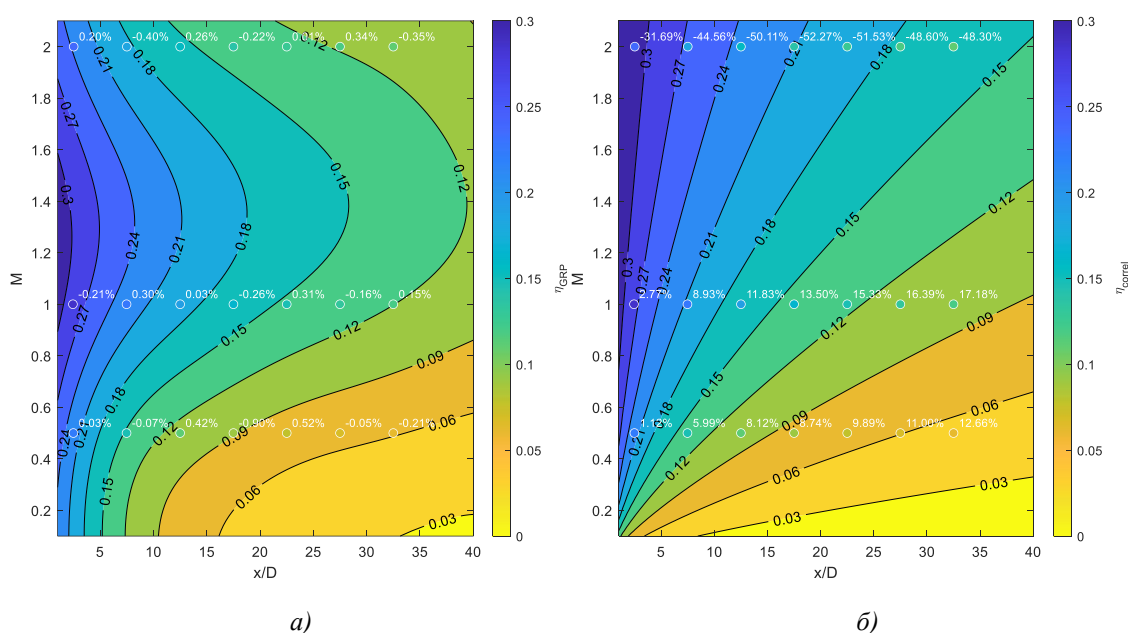


Рис.1 – Сравнение низкоуровневых моделей:
а) регрессия на основе Гауссовых процессов, б) корреляция из [6]

В обоих случаях отображена зависимость адиабатической эффективности охлаждения, осреднённая поперёк потока, в зависимости от безразмерного расстояния (x/D) от отверстия вниз по потоку и параметра вдува (M). Из визуального сравнения видно, что модель, построенная с использованием GPR, более точно отражает влияние параметра вдува по сравнению с корреляцией. Количественное сравнение представлено в виде наложения точек с экспериментальными данными из [7] и относительными ошибками предсказания в каждой такой точке, подписанными белым цветом. В области параметров вдува, характерных для лопатки корреляция имеет относительную ошибку до 17,2%, тогда как модель на основе машинного обучения только 0,5%.

Список литературы

1. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: учеб. – М.: Машиностроение, 2008. – Т. 2. – 368 с.
2. Development trend of cooling technology for turbine blades at superhigh temperature of above 2000 K / Xu Liang, Sun Zineng [и др.] // Energies. – 2023. – №2. – P. 668-684.

3. Baldauf S. [и др.]. Correlation of Film-Cooling Effectiveness From Thermographic Measurements at Enginelike Conditions // Journal of Turbomachinery. – 2002. – № 4 (124). – С. 686–698.

4. Тихонов А.С. Влияние геометрических параметров профиля лопатки на эффективность пленочного охлаждения спинки статорных лопаток газовых турбин // Новые решения и технологии в газотурбостроении: сб. тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. молодых учёных и специалистов. – М.: ЦИАМ, 2010. – С. 98-101.

5. Van De Noort M., Murray A. V., Ireland P. T. Low Order Heat & Mass Flow Network Modelling for Quasi-Transpiration Cooling Systems // Volume 6B: Heat Transfer – General Interest/Additive Manufacturing Impacts on Heat Transfer; Internal Air Systems; Internal Cooling. Rotterdam, Netherlands: American Society of Mechanical Engineers. – 2022. – С. V06BT15A012.

6. Colban W. F., Thole K. A., Bogard D. A Film-Cooling Correlation for Shaped Holes on a Flat-Plate Surface // Journal of Turbomachinery. – 2011. – № 1 (133). – С. 011002.

7. Schroeder R. P., Thole K. A. Adiabatic Effectiveness Measurements for a Baseline Shaped Film Cooling Hole // Volume 5B: Heat Transfer. – Düsseldorf, Germany: American Society of Mechanical Engineers, 2014. – С. V05BT13A036.

Сведения об авторе

Кондратьев Вячеслав Николаевич – аспирант, инженер-конструктор. Область научных интересов: системы охлаждения лопаток турбин.

COMPARISON LOW ORDER MODELS OF FILM COOLING: CORRELATIONS AND MODELS ON MACHINE LEARNING

Kondratev V. N.

JSC «UEC-Aviadvigatel», Perm, Russia, kondr.wn@mail.ru

Keywords: turbine cooling, film cooling

This paper offer to apply surrogate models as a part of low order models for optimization of gas turbine blade cooling system. The most common film cooling effectiveness correlations are analyzed. Correlation for shaped holes is considered especially as having more potential and it is compared with a model based on machine learning. This model is learnt on open data uses Gaussian process regression to predict adiabatic effectiveness of film cooling. The result shows a significantly superiority of models based on machine learning over correlations.