

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИИ И ПРИКЛАДНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ В МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ РАСЧЕТАХ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ ГТД

Мусеев А.А., Зильберберг В.Л., Самсонов Д.С.

АО «ОДК-Климов», г. Санкт-Петербург,

museev_aa@klimov.ru, vzilberberg@klimov.ru, DSamsonov@klimov.ru

Ключевые слова: искусственный интеллект, суррогатные модели, автоматизированная расчётная цепочка (АРЦ), газотурбинный двигатель (ГТД), междисциплинарные расчёты, проектно-проверочные расчёты

Представлено видение развития подходов к инженерному анализу газотурбинных двигателей на основе интеграции автоматизированных расчётных цепочек и технологий искусственного интеллекта. Показано, что даже в такой сложной предметной области, как проектирование и сопровождение эксплуатации ГТД, применение суррогатного моделирования, автоматизация междисциплинарных расчетов и использование ИИ-инструментов позволяют существенно ускорить выполнение инженерных работ, повысить вариативность анализа и улучшить качество принимаемых проектных решений. Рассмотрены практические аспекты внедрения данных технологий в контур цифрового двойника, а также перспективы создания единой платформы для проектно-проверочных расчётов нового поколения.

Цифровая трансформация инженерных процессов открывает новые возможности для ускорения и совершенствования подходов к расчётному обоснованию сложных технических изделий. Даже в такой традиционно наукоёмкой области, как проектирование газотурбинных двигателей (ГТД), внедрение инструментов прикладной автоматизации и технологий искусственного интеллекта (ИИ) позволяет перейти от трудоёмких единичных расчётов к оперативному анализу больших массивов данных, не снижая при этом достоверности результатов.

Автоматизированные расчётные цепочки, реализованные на платформах типа pSeven Enterprise, обеспечивают сквозное выполнение взаимосвязанных расчётов: от задания параметров полётного цикла до оценки накопленной повреждаемости деталей. Ключевое преимущество АРЦ заключается не только в ускорении отдельных расчётов, но и в возможности генерации структурированных массивов информации о напряжённо-деформированном состоянии, температурных полях и ресурсных показателях деталей при воздействии на них различных условий нагружения.

Такие данные становятся ценным ресурсом для последующего анализа: обучения моделей машинного обучения, проведения параметрической оптимизации, формирования цифровых двойников вариантов «как спроектировано» и «как изготовлено». При пакетной обработке множества эксплуатационных сценариев эффективность АРЦ возрастает на порядок, что особенно актуально при оценке влияния разброса параметров на надёжность изделия.

Одним из наиболее перспективных направлений применения ИИ в расчётной практике является разработка суррогатных моделей, аппроксимирующих результаты трудоёмких конечно-элементных анализов. Обученные на данных АРЦ, такие модели позволяют получать оценку прочностных характеристик деталей сложной геометрии (рабочие колёса, диски, корпуса) за секунды вместо часов вычислений.

Верификация суррогатных моделей на тестовых выборках показывает относительную погрешность прогнозирования в пределах 3–5% при верифицированных диапазонах входных параметров, что приемлемо для задач предварительного проектирования и экспресс-анализа. При этом сохраняется возможность «возврата» к высокоточным

моделям при выявлении критических режимов, что обеспечивает баланс между скоростью и достоверностью расчётов.

Проектирование ГТД требует согласованного учёта аэродинамических, тепловых, прочностных и динамических факторов. Традиционный подход с последовательной передачей результатов между дисциплинами сопряжён с рисками потери информации и накопления погрешностей. Интеграция ИИ в контур междисциплинарных расчётов при этом также позволяет:

- автоматизировать трансформацию и передачу граничных условий между этапами (расчетными блоками) АРЦ;
- выявлять скрытые корреляции между параметрами разных физических полей;
- формировать компромиссные решения, удовлетворяющие противоречивым требованиям (например, минимизация массы при обеспечении запаса прочности).

На этапе эксплуатации актуальными становятся задачи учёта фактической наработки ответственных деталей, анализа отклонений режимов работы и прогнозирования остаточного ресурса. ИИ-модели, обученные на совокупности данных АРЦ, результатов стендовых и натурных испытаний, позволяют в режиме, близком к реальному времени, оценивать влияние эксплуатационных факторов на повреждаемость.

Интеграция таких моделей с системами мониторинга состояния двигателя даёт возможность формировать персонализированные рекомендации по техническому обслуживанию, планировать замену деталей до достижения их предельного состояния и снижать риски отказов.

Комбинация суррогатных моделей ИИ, автоматизированных расчётных цепочек и специализированных систем управления требованиями создаёт технологический задел для разработки нового поколения инженерного программного обеспечения.

Такая платформа должна обеспечивать:

- адаптивность под изменяющиеся нормативные требования и проектные ограничения;
- сквозную прослеживаемость результатов от технического задания до отчётной и доказательной документации;
- бесшовную интеграцию с цифровыми двойниками на всех этапах жизненного цикла изделия;
- поддержку как проектных (вариантный синтез), так и поверочных (подтверждение соответствия) расчётов.

В совокупности с разработкой ИИ-помощников или ИИ-агентов, позволяющих генерировать отчетную документацию на основе выполненных расчетов в соответствии с требованиями к оформлению КД, цикл работ от получения исходных данных до оформления результатов инженерного анализа можно будет считать полным.

Разработка отечественных решений в этой области соответствует стратегическим задачам цифровой трансформации в отрасли авиационного двигателестроения и импортозамещения критически важного программного обеспечения.

Сведения об авторах

Мусеев А.А. – заместитель начальника ОКБ по расчетам АО «ОДК-Климов». Область научных интересов: разработка ГТД, расчеты долговечности конструкций, расчеты трещиностойкости, ресурсные испытания ГТД и его основных деталей.

Зильберберг В.Л. – ведущий инженер-конструктор, руководитель бригады систем инженерного анализа. Область научных интересов: разработка ГТД, расчеты долговечности роторных деталей двигателя, расчеты трещиностойкости.

Самсонов Д.С. – ведущий инженер-конструктор, руководитель бригады ресурса двигателей. Область научных интересов: разработка ГТД, расчеты долговечности деталей, расчеты трещиностойкости.

**APPLICATION OF AI TECHNOLOGIES AND APPLIED AUTOMATION
IN INTERDISCIPLINARY CALCULATIONS
OF GAS TURBINE ENGINE UNITS AND PARTS**

Museev A.A., Zilberberg V.L., Samsonov D.S.

JSC «UEC-Klimov», Saint Petersburg,

museev_aa@klimov.ru, vzilberberg@klimov.ru, DSamsonov@klimov.ru

Keywords: Artificial intelligence, surrogate models, automated calculation chain (ACC), gas turbine engine (GTE), digital twin, interdisciplinary calculations, design and verification calculations.

This article presents a perspective on the development of approaches to the engineering analysis of gas turbine engines based on the integration of automated calculation processes and artificial intelligence technologies. It is demonstrated that even in such a complex subject area as gas turbine engine design and operation support, the use of surrogate modeling, automation of interdisciplinary calculations, and the use of AI tools can significantly accelerate engineering work, increase the variability of analysis, and improve the quality of design decisions. The article also examines the practical aspects of implementing these technologies within the digital twin framework, as well as the prospects for creating a unified platform for next-generation design and verification calculations.