

УДК 629.1:004.04

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ КАМЕР СГОРАНИЯ СУДОВЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

¹Казимиренко Ю.А., ¹Михелев И.Л., ²Матвеев Н.А.

¹Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова
Украина, г. Николаев, пр-т Героев Украины, 9

²Государственное предприятие научно-производственный комплекс газотурбостроения
«Зоря»-«Машинопроект» Украина, г. Николаев
E-mail: u.a.kazimirenko@gmail.com, kafedra.iust@gmail.com, mnasoft@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается подход к управлению процессом обработки данных распределения температурных полей при стендовых испытаниях камер сгорания судовых газотурбинных двигателей, для чего разработана новое программное обеспечение.

Xülasə. Məqalədə yeni program təminatının hazırlandığı gəmi qaz-turbin mühərriklərinin yanma kameralarının stend sınaqları zamanı temperatur sahələrinin paylanması barədə məlumatların işlənməsi prosesinin idarə edilməsinə yanaşmadan bəhs olunur.

Abstract. The article discusses an approach to managing the process of processing data of the distribution of temperature fields during bench tests of combustion chambers of marine gas turbine engines, for which new software has been developed.

Ключевые слова: судовые газотурбинные двигатели, камеры сгорания, температурное поле, программное обеспечение, технологии компьютерной графики, визуализация изображений

Açar sözlər: gəmi qaz-turbin mühərrikləri, yanma kameraları, temperatur sahəsi, program təminatı, kompyuter qrafikası texnologiyaları, görüntünün vizuallaşdırması

Key words: marine gas turbine engines, combustion chambers, temperature field, software, computer graphics technologies, image visualization

Введение. Эффективная эксплуатация судовых газотурбинных двигателей (ГТД) непосредственно зависит от надежной работы камеры сгорания (КС), в которой одновременно происходят процессы смесеобразования, сгорания, тепло- и массообмена, взаимодействия и завихрения потоков [1]. Процесс создания РС включает в себя полный комплекс расчетно-экспериментальных работ (оптимизация распределения воздуха по сечению камеры сгорания, проектирование системы охлаждения стенок жаровых труб и проч.); доводочные работы для обеспечения заданного уровня радиальной и окружной неравномерности поля температур газа на выходе из РС; стендовые испытания на рабочих режимах с измерениями в контрольных точках потоков воздуха, топлива, продуктов сгорания. Важным критерием, обеспечивающим ресурс турбины и двигателя в целом, следует считать степень совершенства температурного поля на выходе из камеры сгорания [2]. Визуализация процессов их распределения – важный инструментальный метод обработки результатов экспериментальных исследований, с помощью которого принимаются конструкторские решения. Таким образом, разработка программного обеспечения для управления процессами обработки данных при стендовых испытаниях камер сгорания, является *важной научно-прикладной задачей*.

Применяемые в настоящее время методы сбора и обработки результатов испытаний камер сгорания судовых ГТД [1-6] основаны на графической интерпретации полученных данных в виде контурных диаграмм температурных полей – плоских изотерм, по которым определя-

ется их соответствие техническим требованиям. Расширение возможности управления данными с выбором среди альтернативных вариантов наилучшего конструктивно-компоновочного решения требует разработки и внедрения современного программного обеспечения, отвечающего особенностям работы предприятия

Цель работы – повышение эффективности обработки результатов испытаний камер сгорания судовых ГТД с помощью разработки нового программного обеспечения.

Организация стендовых испытаний камер сгорания судовых ГТД. Обобщенно алгоритм систематизации результатов испытаний включает в себя постановку экспериментальных исследований температур в секторе кольцевой камеры сгорания; фиксацию значений температур продуктов сгорания в реперных точках; отбраковку данных из выборки по критериям Грубса; обработку результатов методом наименьших квадратов; обработку результатов методом Гаусса.

Анализ существующих методов визуализации стендовых испытаний (табл. 1) показал сложность и нецелесообразность их использования на этапах проектирования камер сгорания судовых ГТД, что обусловлено выборочностью и осреднением полученных экспериментальных данных, отсеком ненужных значений в отдельных точках, выбором графического редактора, принятием информации конструкторами, возможностью корректировки данных в ручном режиме.

Таблица 1

Методология визуализации результатов стендовых испытаний
 [составлено авторами по результатам источников 1-6]

Методы	Преимущества	Недостатки
Применение стандартных пакетов вычислительной газодинамики (CFD-пакетов)	Наглядность процесса распределения температурных полей, возможность применения разноплановых математических моделей физических процессов	Трудоемкая длительная подготовка для создания геометрической модели и генерирования расчетной сетки
Внедрение системы технического зрения	Доступность данных в режиме «живого изображения»; возможность просмотра эксперимента	Высокая стоимость процесса, сложность аппаратного обеспечения
Оборудование стендово-экспериментальной базы специальными информационными системами	Усовершенствование процесса сохранения и поиска данных, возможность формирования отчетов, в т.ч. в графическом виде	Необходимость проведения проектно-поисковых исследований с реализацией расчетных методик

Обзор современных подходов к решению практических задач визуализации многомерных данных [5] показал перспективы применения методов инфографики и картографии, позволяющих представлять процессы в динамике и сравнивать числовые значения, выявлять изменения, происходящие в конструкции или структуре исследуемого объекта. Однако их применение в технике ограничено технологическими возможностями и низким уровнем защиты информации. В силу противоречивости полученных данных их обработка в большинстве случаев осуществляется в ручном режиме с построением таблиц и двумерных графических зависимостей исследуемых параметров (рис. 1). Реализация технических задач требует высокой инженерной квалификации с освоением классических методов матанализа [7], теории графов [8], использования современных информационных пакетов [9, 10].

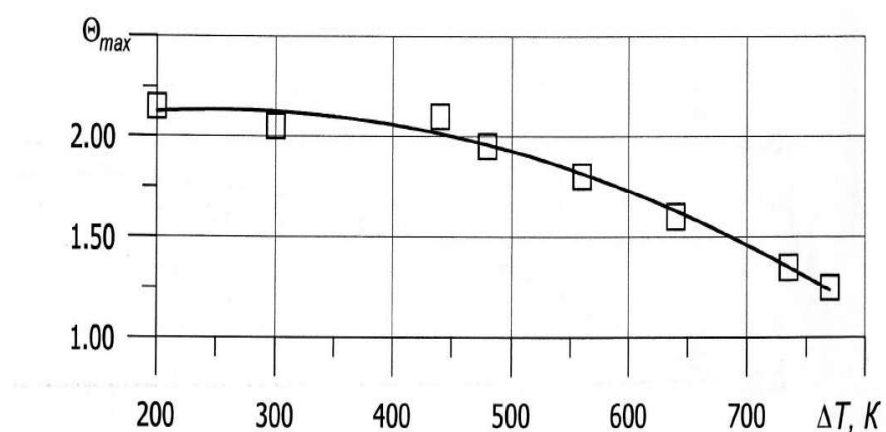


Рис. 1. Пример оформления температурных параметров: максимальная неравномерность поля температуры продуктов сгорания на выходе из камеры сгорания

Теоретико-методологической базой для исследований являются: научные работы отечественных и зарубежных ученых в области проектирования камер сгорания судовых ГТД [1-3]; разработки информационных систем [9]; интернет-ресурсы, нормативные документы, личный опыт авторов. В основу разработки программного обеспечения для визуализации изображений положен алгоритм (рис. 2) обработки результатов испытаний камеры сгорания, составленный авторами.



Рис. 2. Алгоритм обработки результатов

Для построения информационных моделей использованы математические методы исследований операций [7] и компьютерной алгебры [11], объектно-ориентированный подход [10].

Программное обеспечение написано на языке программирования *COMMON LISP* [12], применяемый при написании программных кодов для научных исследований и решения инженерных задач. Поставленная задача рассмотрена как подход «от данных до написания кода» с реализацией функций выборки данных, их осреднения, отсева недействительных значений, восстановления значений в отдельных точках с построением функций осреднения методом Гаусса и возможностью корректирования данных в ручном режиме.

С помощью *COMMON LISP* зависимость температурного поля *TEMPERATURE-FILD* от других систем и ее составляющих представлена в виде ориентированного графа *System-graf* (рис. 3): стрелками показана зависимость системы *TEMPERATURE-FILD* от других систем.

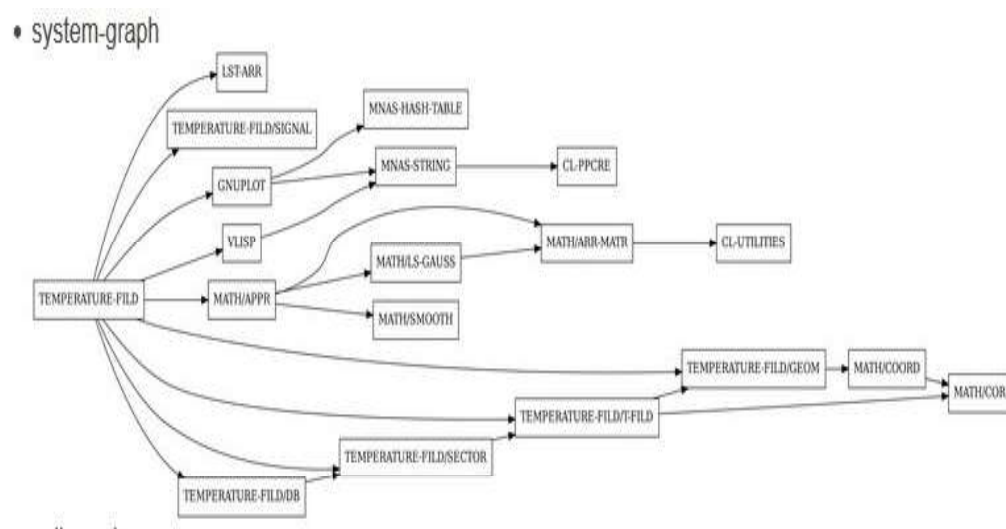


Рис. 3. Системный граф

Практическая реализация программного обеспечения в испытательной лаборатории. Измерения осуществляются в режиме реального времени с автоматическим сохранением параметров работы камеры сгорания в файле тренда. В электронный журнал заносятся также время измерений, температуры и объемный расход воздуха на входе и на выходе из жаровых труб камер сгорания. Для выводов результатов вычислений использована графическая программа *Gnuplot* [13] как свободная программная среда для создания двух- или трехмерных графиков, преимущество которой заключается в доступности для многих платформ, таких как *Linux*, *MS Windows*, *OSX*.

Результаты испытаний представлены в виде контурных диаграмм температурных полей (рис. 4) – плоских изотерм, по которым определяется соответствие температурных полей техническим требованиям. Построение диаграмм осуществляется в выборочном порядке, установленном экспертом.

В качестве примера на рис. 5 приведены построенные в графическом редакторе *Gnuplot* радиальные и окружные эпюры относительных температур на выходе из жаровых труб кольцевой камеры сгорания ГТД, где пунктирной линией нанесены максимальные температуры, сплошной – осредненные значения.

Научное и практическое значение результатов работы.

Усовершенствован подход к управлению процессом обработки данных распределения температурных полей при стендовых испытаниях камер сгорания судовых ГТД, позволяющий за счет разработки нового программного обеспечения с возможностью реализации выборки данных, повысить качество конструкторских и исследовательско-доводочных работ.

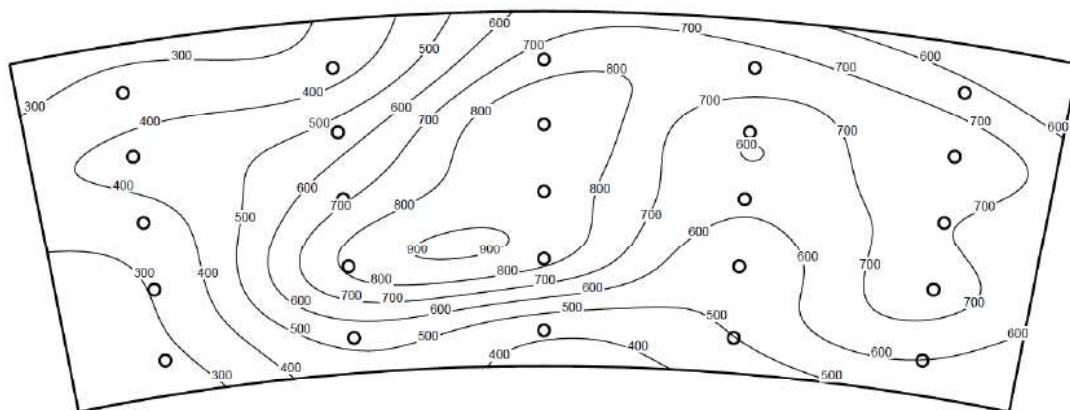
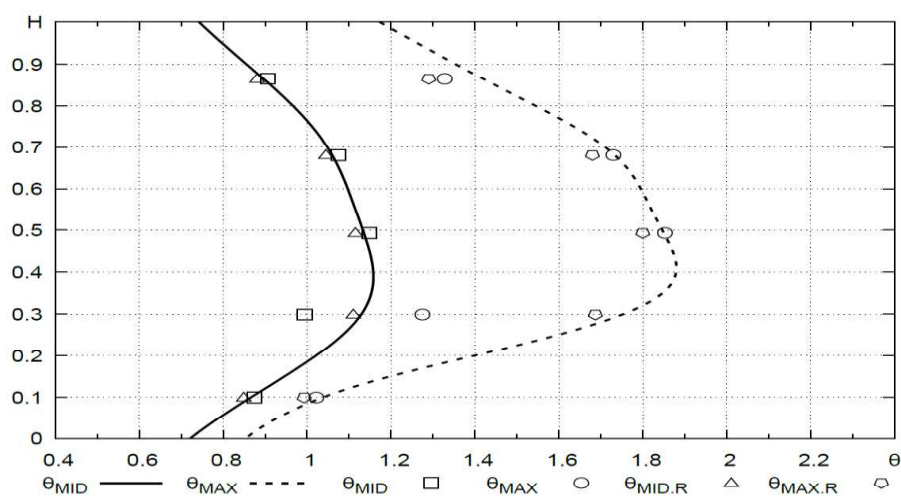
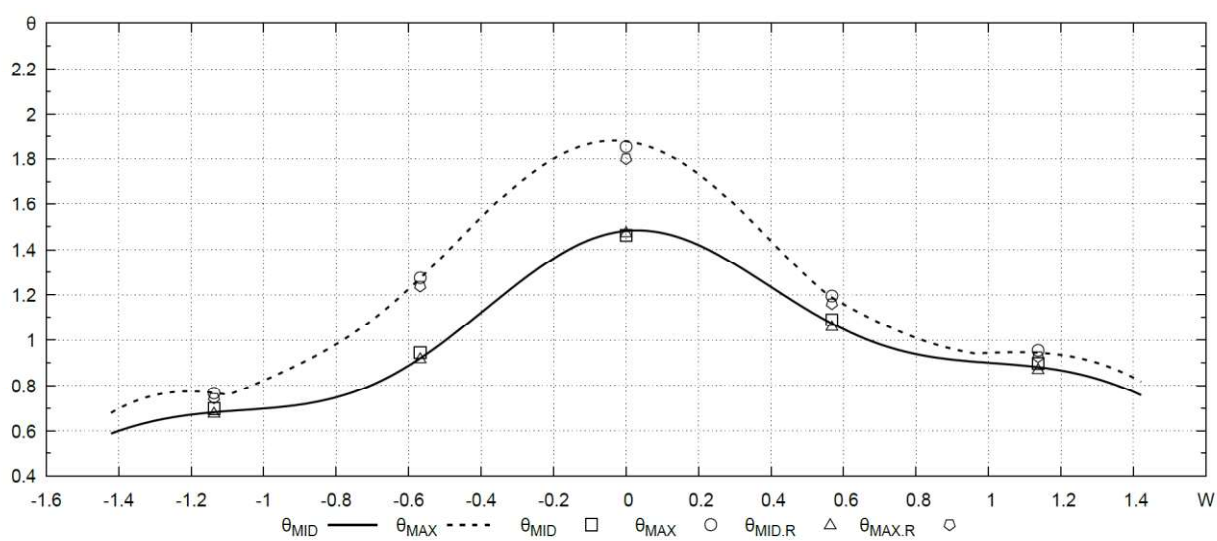


Рис. 4. Контурная диаграмма температурных полей



a



б

Рис. 5. Этюры максимальных и средних относительных температур на выходе из кольцевой камеры сгорания: а – радиальная этюра; б – окружная этюра

Практическое значение работы заключается в возможности управления выбором наилучшего конструктивно-компоновочного решения с элементами визуализации изображений и исключением из рабочего процесса дорогостоящих *CFD*-пакетов.

Выводы. 1. Исследована организация стендовых испытаний камер сгорания судового ГТД с цифровой обработкой и графической интерпретацией экспериментальных данных;

2. Составлен алгоритм обработки результатов, положенный в основу разработки нового программного обеспечения, написанного на языке *COMMON LISP*; результаты испытания представлены в виде контурных диаграмм температурных полей, для построения которых использован графический редактор *Gnuplot*.

3. Полученные результаты направлены на повышение научного уровня проектирования камер сгорания судовых ГТД за счет внедрения нового программного обеспечения в рабочий процесс инженерно-конструкторской деятельности.

Литература

1. Мингазов, Б. Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей: [монография] / Б. Г. Мингазов. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. – 167 с.
2. Орлов, М. Ю. Доводка поля температуры на выходе из многофорсуночной камеры сгорания ГТД методами трехмерного моделирования / М. Ю. Орлов, И. А. Зубрилин, С. С. Матвеев, Ю. И. Цыбизов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – № 6(4). – с. 905-910.
3. Александров, Ю. Б. Исследование формирования температурных полей в камерах сгорания газотурбинных двигателей / Ю. Б. Александров, И. И. Вафин, Б. Г. Мингазов // Инженерный журнал. – 2018. – № 18. – с. 1-13.
4. Кофман, В. М. Методология экспериментально расчетного определения показателей эффективности основных камер сгорания газотурбинных двигателей по результатам автономных испытаний на камерном стенде / В. М. Кофман // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 46. – с. 6-39.
5. Романова, И. К. Современные методы визуализации многомерных данных: анализ, классификация, реализация, приложение в технических системах / И. К. Романова // Наука и образование МГУ им. Н.Э. Баумана. – 2016. – № 3. – с. 133-167.
6. Маркушин, А. А. Испытательные стенды для исследований процессов и доводки низкоэмиссионных камер сгорания ГТД / А. А. Макушин, А. В. Бакланов // Вестник Самарского госуд. аэрокосмического ун-та. – 2013. – № 3 (41). – с. 131-138.
7. Вентцель, Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1980. – 207 с.
8. Введение в теорию графов: изд-ние 5-е / под ред. Р. Уилтона. – М.: Диалектика-Вильямс, 2019. – 240 с.
9. Дьяков, В. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование / В. Дьяков. – 2014. – 383.
10. Иванова, Г. С. Объектно-ориентированное программирование: [учебник] / Г. С. Иванова, Т. Н. Никишкина. – М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2014. – 456 с.
11. Федорченко, Л.Н. Теория типов, компьютерная алгебра, поддержка доказательств и грамматики / Л.Н. Федорченко// Вестник БГУ. Математика, информатика. –2016. –№2. –с.55-76.
12. Сайбель, П. Практическое использование COMMON LISP / Питер Сайбель. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 488 с.
13. Попов, А. В. GNUPLOT и его приложения / А. В. Попов. – М.: Изд-во попечительского совета механико-математического факультета МГУ, 2015. – 240 с.

Məqalə qəbul olunub: 05.04.2021

Təvsiyə ediblər: t.e.d., prof. A.M. Qafarov