

ветствовало целевому значению. Вычисление текущей ошибки рассогласования вычисляется на основании расположения в данный момент величины расхода топлива относительно его верхнего и нижнего значения. Если расход топлива лежит в допустимых пределах, то величина рассогласования остаётся неизменной и равной разности между уставкой и текущим значением частоты вращения, вычисленным в модели двигателя. Если значение расхода топлива больше максимально допустимого для данной частоты вращения, то алгоритм рассчитывает ошибку исходя из того, на сколько было превышено допустимое значение.

Обучение нейронной сети проводится циклически – сначала производится симуляция системы регулятор-объект. Следующим шагом производится коррекция весов, используя модифицированные значения ошибок. Затем симуляция повторяется снова. Цикл прерывается, когда среднеквадратичное значение ошибки не станет меньшим, либо равным установленному значению.

В результате обучения нейроконтроллера были получены графики переходных процессов, а так же линия рабочих режимов на динамической характеристике двигателя (рис. 1).

Библиографический список

1. Aircraft Engine Controls. Design, System Analysis, and Health Monitoring / Link C.J., Jack D.M. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, 2009. 397 p.
2. Чернодуб А.Н., Дзюба Д.А. Обзор методов нейроуправления // Проблемы программирования. 2011. Т.2. С. 79-94.
3. Isermann R. Perspectives of automatic control // Control Engineering Practice. 2011. V.19. P. 1399-1407.
4. Tao G. Multivariable adaptive control: A survey // Automatica. 2014. V. 50. P. 2737-2764.
5. Cybenko G. Approximation by Superpositions of a Sigmoidal Function // Mathematics of Control, Signals, and Systems. 1989. V. 2. P. 303-314.

УДК 621.45

СОПРЯЖЁННЫЙ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БЛОКА СОПЛОВЫХ АППАРАТОВ ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ

©2018 Д.А. Матвеев¹, А.С. Матвеев¹, А.И. Белоусов², А.Ю. Тисарев¹

¹ПАО «Кузнецов», г. Самара

²Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

CONJUGATE HEAT TRANSFER SIMILATION OF HIGH PRESSURE TURBINE NOZZLE GUIDE VANES OPERATING UNDER REAL LOAD CONDITIONS

Matveev D.A., Matveev A.S., Tisarev A.Yu. (JSC «Kuznetsov», Samara, Russian Federation)
Belousov A.I. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

This research is focused on the conjugate heat transfer simulation of nozzle guide vanes. In order to properly estimate blade temperature distribution the real boundary conditions were considered. Both measured radial and circumferential distortion after combustion chamber were used. It allowed us to predict local increase in blade temperature and temperature gradient determining the stress-stain state. Apart from that, the hot gases radiation was taken into account that helps us to avoid overestimated values of cooling efficiency.

Традиционный путь увеличения эффективности газотурбинного двигателя связан с повышением параметров цикла, таких как температура газа перед турбиной и суммарная степень сжатия в компрессоре. Повышение температуры как газа, так и охла-

дителя сказывается в первую очередь на температуре сопловых аппаратов (СА) турбины высокого давления (ТВД), которая, как правило, ограничена 1050–1150°C. Сдерживание температуры стенки СА на приемлемом уровне достигают увеличением расхода

охлаждающего воздуха и внесением изменений в конфигурацию каналов для интенсификации конвективно-плёночного охлаждения. При введении изменений в геометрию системы охлаждения необходимо проводить проверку конфигурации, которая сопряжена с оценкой эффективности охлаждения, потерь давления и градиента температуры, вносящего вклад в напряжённо-деформированное состояние лопатки. Экспериментальная проверка каждой промежуточной конфигурации является длительной и дорогостоящей процедурой, которая при этом позволяет получить только ограниченный объём данных по тепловому состоянию лопатки. Достоинством дополнением к прогнозированию температур и оценке эффективности различных систем охлаждения СА являются методы сопряжённого численного моделирования. Численный анализ предоставляет возможность получить полную картину распределения температуры по поверхности соплового аппарата, а также поля газодинамических параметров внутреннего и внешнего потока. Точность получаемых результатов, однако, зависит от многих факторов, из которых можно выделить следующие: постановка задачи; представление идентичных реальным граничных условий; подходы моделирования различных видов теплопередачи, а также дискретизация модели по времени и пространству.

Внешний теплообмен со стороны проточной части двигателя определяет подвод теплового потока к СА и охладителю. Поэтому достоверность расчёта сильно зависит от граничных условий со стороны газа, а также разрешения процессов течения и теплообмена в проточной части. В качестве исходных данных на входной границе выступает поле температуры газа перед турбиной, которое обладает своей окружной и радиальной неравномерностью. Неравномерность температуры определяется особенностью работы камеры сгорания и локально температура может отличаться от среднемассового значения на $\pm 15\%$ и более. Это приводит не только к локальному перегреву стенки, но и к высоким градиентам температур на трактовых полках лопаток, объединённых в один блок из трёх лопаток. Поэтому для повышения точности расчёта в качестве внешних

граничных условий использовались измеренные окружная и радиальная неравномерности поля температуры за камерой сгорания, которые были наложены определённым образом на блок из трёх лопаток с объединёнными трактовыми поверхностями и коллекторами подвода и отвода воздуха.

Кроме того, на распределение коэффициентов конвективной теплоотдачи вдоль профиля СА и трактовых поверхностей влияют процессы, связанные с отрывом потока и ламинарно-турбулентным переходом [1]. Согласно [2] ламинарно-турбулентный переход для лопаток турбины возможен в диапазоне чисел Рейнольдса от 10^5 до 10^6 , рассчитанных по параметрам на входе в решётку. Однако развитое плёночное охлаждение, применяемое в первой ступени ТВД, значительно уменьшает степень влияния данных процессов [3]. Решение уравнений Навье–Стокса проводилось с осреднением по Рейнольдсу с использованием модели турбулентности SST Ментора. Пограничный слой был разрешён 22 объёмами с коэффициентом роста 1,2. Для корректного моделирования вязкого подслоя на внутренних и внешних поверхностях теплообмена было достигнуто условие $y^+ \leq 1$. Нестационарные эффекты в потоке не учитывались, поскольку временной масштаб в потоке сильно меньше, чем в материале СА, где теплообмен осуществляется за счёт теплопроводности. Поэтому задача решалась в стационарной постановке.

Тепловой поток, поступающий в сопловой блок за счёт излучения газов, весьма часто игнорируется при определении поля температур на сопловых аппаратах, что является одной из причин получения в расчёте завышенных значений эффективности охлаждения. Влияние излучения на суммарный тепловой поток, поступающий в лопатку, увеличивается с повышением температуры газового потока и поэтому пренебрегать излучением при определении температур СА становится некорректно. Для учёта излучения использовалась модель Discrete Transfer Method, которая при небольших потерях в точности позволяет существенно снизить вычислительные затраты по сравнению с моделью Монте-Карло. В работах [4] и [5] уделялось внимание влиянию излучения на эффективность охлаждения СА при использовании теплозащитного покрытия (ТЗП). По

результатам работы авторы заключили, что при $T_{Г^*} > 1500$ К современные ТЗП блокируют существенную долю теплового потока за счёт термического сопротивления и более низкого значения степени черноты [4], что сдерживает рост температуры лопатки.

На основе анализа распределения температурных полей сделаны выводы о направлениях улучшения системы охлаждения блока сопловых аппаратов.

Библиографический список

1. Mayle R. "The role of laminar-turbulent transition in gas turbine engines", Journal of Turbomachinery, 113, с.509-537.

2. Schulz A.V. "Zum Einfluss hoher Freistromturbulenz, intensive Kühlung und einer Nachlaufströmung auf den äußeren Wärmeübergang einer konvektiv gekühlten Gasturbi-

nenschaufel" . Dissertation, Universität Karlsruhe, 1986.

3. Findeisen E., Woerz B., Wieler M., Jeschke P., Rabs M. "Evaluation of numerical methods to predict temperature distribution of an experimentally investigated convection-cooled gas-turbine blade", Proceedings of ASME Turbo Expo 2017. GT2017-64205, 2017.

4. Kumar N.A., Kale S.R., "Numerical simulation of Steady State Heat Transfer in Ceramic-Coated Gas Turbine Blades", International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002.

5. Akwaboia S., Mensah P., Diwan R., "Effects of Thermal Radiation on Air Plasma Spray (APS) Coated Gas Turbine Blade", Proceedings of ASME Turbo Expo 2010, 2010.

УДК 331.453

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА МЕТОДА ОПРЕСНЕНИЯ МОРСКИХ ВОД ДЛЯ РЕГИОНА

©2018 Г.А. Сигора¹, Т.Ю. Хоменко¹, Л.А. Ничкова¹, В.В. Бирюк²

¹Севастопольский государственный университет

²Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

OPTIMIZATION OF THE SELECTION OF THE METHOD OF SEA WATER DESALINATION FOR THE REGION

Sigora G.A., Khomenko T.Y., Nychkova L.A. (Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University", Sevastopol, Russian Federation)

Biryuk V.V. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

Criteria for the choice of a way of desalting of sea water in the Crimean region – «study and reliability», «geographical», «industrial application», «economic», «an electric power expense», «ecological safety» and others are offered. Based on these criteria we selected the most optimal method of desalination of sea water for the Crimean region.

Проблема дефицита пресной воды становится все актуальней для многих регионов мира. Её обострение связывают с ростом населения, климатическими изменениями и рядом других причин. По данным Всемирной организации здравоохранения более двух миллиардов человек в мире страдают сегодня от нехватки питьевой воды. В ближайшие 20 лет, учитывая современные тенденции роста населения и мирового хозяйства, следует ожидать увеличения потребности в пресной воде не менее чем на 100 км^3 в год.

Естественные источники пресной воды не могут удовлетворить всё возрастающие потребности в ней. Следовательно, для решения этой проблемы необходимо искать другие, более эффективные пути.

В этой связи для многих стран и регионов крайне актуальной является задача искусственного получения пресной воды. Одним из наиболее перспективных путей обеспечения пресной водой является опреснение солёных вод Мирового океана.