

УДК 621.45.01

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА НЕОХЛАЖДАЕМОЙ ОСЕВОЙ ТРЁХСТУПЕНЧАТОЙ ТУРБИНЫ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

© 2018 Г.М. Попов, Е.С. Горячкин, Ю.Д. Новикова, В.М. Зубанов,  
А.А. Волков, А.И. Корнеева

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 14.11.2018

В статье описаны результаты многокритериальной оптимизации трехступенчатой осевой неохлаждаемой турбины низкого давления. Целью оптимизации являлось улучшение рабочего процесса турбины по трем критериям: угол потока на выходе турбины, значение остаточной закрутки потока на выходе из турбины, величина КПД турбины.

Для решения задачи выполнялось полное перепрофилирование всех лопаток турбины. Перепрофилирование включало в себя изменение как формы сечений лопаток, так и взаимное положение сечений друг относительно друга в радиальном направлении (3D профилирование).

*Ключевые слова:* испытания ГТД, турбина низкого давления, рабочий процесс, мощностная характеристика, сопло.

### ВВЕДЕНИЕ

Турбина низкого давления оказывает значительный эффект на характеристики двигателя. Вклад ТНД может достигать до 20 – 30 % от величины массы двигателя и до 15 – 20 % от стоимости двигателя. Влияние на удельный расход топлива также довольно значительно. Коэффициент влияния КПД ТНД на общий КПД двигателя составляет 1:0,7 для турбовентилаторных двигателей и до 1:1 для турбовальных двигателей [1].

Как модуль двигателя, ТНД должна, во-первых, обеспечивать заданные параметры работы: максимально возможное значение КПД, заданный расход рабочего тела, требуемую мощность и т. д. Во-вторых, параметры рабочего процесса ТНД должны соответствовать параметрам всего двигателя и параметрам его других компонентов. В частности, это означает, что улучшение параметров ТНД не должно приводить к ухудшению параметров, например, вы-

ходного устройства и, следовательно, всего двигателя из-за высокого остаточного вихря потока на выходе ТНД. Также, турбина должна иметь возможность изготовления с минимальными усилиями и иметь минимальную стоимость.

Оптимизация современных ТНД имеет ряд особенностей. Во-первых, оптимизация ТНД является междисциплинарной и многокритериальной с учетом требований к ТНД по параметрам рабочего процесса, статической и динамической прочности, технологичности и других. Во-вторых, параметры, характеризующие работу ТНД, определяются при оптимизации с помощью численных моделей.

При оптимизации [2] существуют два основных требования к числовым моделям. Первое требование заключается в том, что численная модель должна с достаточной точностью описывать процессы, происходящие в ТНД. «Достаточная точность» в этом случае содержит два аспекта. С одной стороны, численные результаты должны соответствовать экспериментальным. С другой стороны, численная модель должна позволять оценивать изменения параметров ТНД (критерии и ограничения) из-за изменения, например, геометрии лопаток (оптимизационная переменная).

Второе требование для числовых моделей ТНД состоит в том, что временные и вычислительные ресурсы, необходимые для расчетов, должны быть как можно более минимальными. Это требование связано с тем, что для достижения сходимости такой сложной задачи, как оптимизация турбины с большим числом переменных (в этом исследовании – 100) может потребоваться большое количество итераций с численной моделью и, как следствие, большое общее время расчета.

*Попов Григорий Михайлович, кандидат технических наук, ассистент кафедры теории двигателей летательных аппаратов. E-mail: grishatty@gmail.com*

*Горячкин Евгений Сергеевич, ассистент кафедры теории двигателей летательных аппаратов.*

*E-mail: goriachkin.e.s@gmail.com*

*Новикова Юлия Дмитриевна, аспирант кафедры теории двигателей летательных аппаратов.*

*E-mail: y.d.novikova@gmail.com*

*Зубанов Василий Михайлович, аспирант кафедры теории двигателей летательных аппаратов.*

*E-mail: waskes91@gmail.com*

*Волков Андрей Александрович, аспирант кафедры теории двигателей летательных аппаратов.*

*E-mail: a44rey@gmail.com*

*Корнеева Анастасия Ивановна, аспирант кафедры теории двигателей летательных аппаратов.*

*E-mail: akorneeva94@mail.ru*

В-третьих, форма лопаток сопловых аппаратов и рабочих колес ТНД обычно довольно сложна. В этом случае количество параметров, описывающих форму лопаток (вектор переменных параметров), с одной стороны, должно быть минимальным, с другой стороны, не должно ограничивать возможности перепрофилирования.

В настоящее время многие исследования уделяют большое внимание оптимизации турбин. Турбины низкого давления и турбины высокого давления являются довольно частыми объектами для исследований по оптимизации, в ходе которых геометрия лопаток, а также меридиональных обводов проточной части меняются для достижения цели оптимизации.

Цель представленного исследования – провести многокритериальную оптимизацию трехступенчатой ТНД (рис. 1) турбовального двигателя.



Рис. 1. Исследуемая трёхступенчатая ТНД

### АЛГОРИТМ МНОГОДИСЦИПЛИНАРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТНД

Алгоритм нелинейной оптимизации на основе самоорганизации (IOSO) [3] использовался для решения задачи оптимизации.

Технология IOSO основана на методике построения поверхности отклика. На каждой итерации IOSO строится поверхность отклика целевой функции в пределах текущей области поиска. За этим шагом следует вызов математической модели системы для расчёта параметров точки кандидата, полученной в результате построения поверхности отклика. Во время работы IOSO информация о поведении системы сохраняется для точек в окрестности экстремума, так что модель поверхности отклика становится более точной для области поиска. Каждая итерация IOSO состоит из следующих шагов:

- изменение плана эксперимента;
- адаптивная корректировка текущей области поиска;
- выбор типа функции (глобальный или локаль-

- ный диапазон) для модели поверхности отклика;
- корректировка модели поверхности отклика;
- изменение параметров и структуры алгоритмов оптимизации;
- при необходимости - выбор новых перспективных точек в зоне поиска.

Алгоритм многодисциплинарной оптимизации ТНД показан на рис. 2.

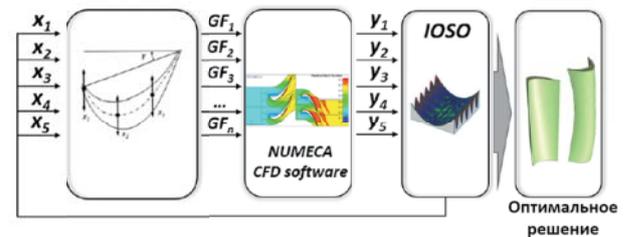


Рис. 2. Алгоритм решения многокритериальной задачи оптимизации ТНД

На каждом шаге оптимизации оптимизатор IOSO создает план эксперимента и генерирует вектор переменных параметров  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ . Этот вектор представляет собой набор переменных, которые описывают геометрию лопатки турбины в параметрической форме. Вектор переменных параметров передается в блок перепрофилирования лопаток. В этом блоке специализированная программа выполняет создание геометрических моделей лопаток ТНД на основе вектора переменных параметров и сохраняют их в виде файлов геометрии лопаток (GF) в формате \*.geomturbo, который подходит для импорта геометрии лопаток в программный комплекс численного моделирования Numesa FineTurbo [4]. Используемые параметрические модели лопаток и метод перепрофилирования описаны ниже.

На следующем этапе в блоке расчета газодинамических параметров выполняется построение вычислительной сетки в программном комплексе Numesa AutoGrid 5 с использованием файлов с геометрией перепрофилированных лопаток ТНД  $GF_1, GF_2 \dots GF_n$  (рис. 3). Затем осуществляется создание вычислительной модели в программном обеспечении Numesa FineTurbo и выполняется расчёт параметров работы ТНД. Обработка результатов расчета выполняется в программном пакете Numesa CFView. В результате создается несколько выходных файлов, содержащих параметры работы ТНД (вектор ограничений и критериев оптимизации). Эти параметры передаются оптимизатору IOSO. Далее вектор выходных параметров (критерии и ограничения оптимизации)  $y_1, y_2 \dots y_n$ , сформированный по результатам работы блоков газодинамического анализа, передается оптимизатору IOSO. Анализ полученных данных выполняется в оптимизаторе, как было указано выше. Затем генерируется новый век-

тор переменных параметров. И цикл (итерация) оптимизации повторяется.

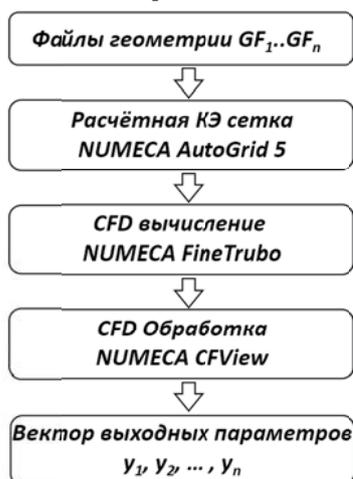


Рис. 3. Алгоритм работы блока расчета газодинамических параметров

### МЕТОД ПАРАМЕТРИЗАЦИИ И ПЕРЕПРОФИЛИРОВАНИЯ ЛОПАТОК

Для параметризации сечений лопаток использовался следующий метод. В каждом сечении лопаток статора и ротора строилась средняя линия, которая аппроксимировалась сплайном, проходящим через 4 точки (центр входной кромки, центр выходной кромки и две промежуточные точки). 2D-перепрофилирование сечений лопаток выполняется путем изменения угла установки  $\Delta\gamma$  и ординат  $\Delta y_1$  и  $\Delta y_2$  двух средних точек средней линии (рис. 4). Стоит отметить, что для уменьшения числа переменных изменение значений угла наклона  $\Delta\gamma$  и ординат точек средней линии  $\Delta y_1$  и  $\Delta y_2$  выполняется только в трех секциях: втулочном, среднем и периферийном. Значения этих параметров для других сечений (промежуточных) рассчитывались в соответствии с квадратичным законом их изменения по высоте проточной части на основе их значений в трех обозначенных сечениях. Пример 2D-перепрофилирования профиля лопатки ТНД показан на рис. 5.

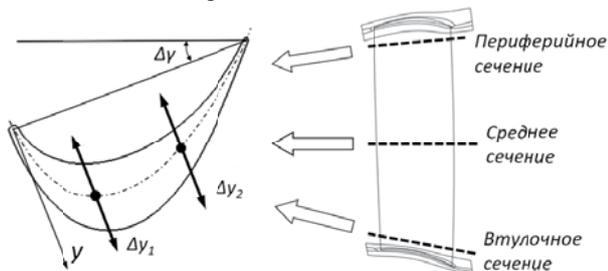


Рис. 4. Схема 2D перепрофилирования лопаток

Для 3D параметризации лопаток использовался метод, позволяющий менять такие параметры как хорда лопатки, толщина профиля,

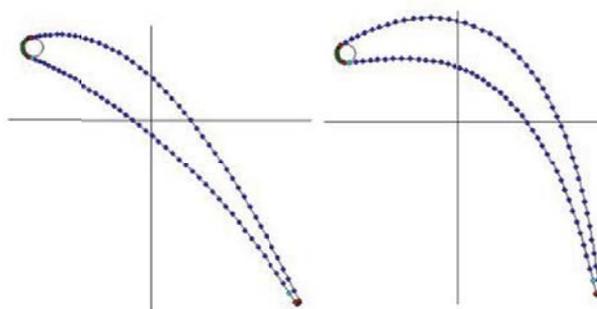


Рис. 5. Пример перепрофилирования сечений лопатки ТНД

сдвиг сечений в осевом и окружном направлениях. Закон изменения этих параметров вдоль радиального направления описывался сплайном из квадратичных кривых Безье. Количество контрольных точек сплайна могло изменяться от 3 (для лопаток соплового аппарата) до 5 (для лопаток ротора) (рис. 6). Пространственное перепрофилирование лопаток, а также изменение хорд и толщины профилей осуществляется путем изменения положения контрольных точек сплайна. Примеры возможного пространственного перепрофилирования лопаток ТНД показан на рис. 7.

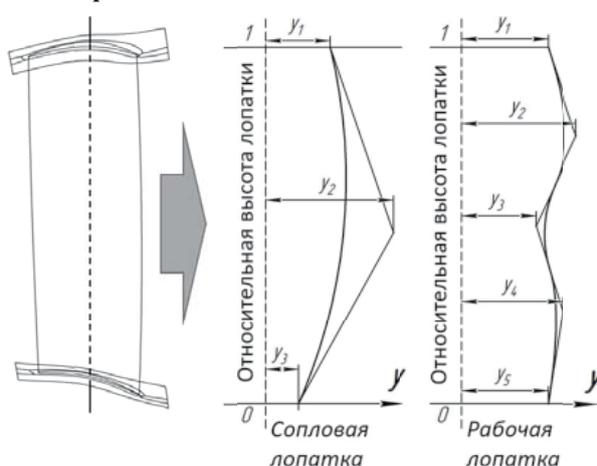


Рис. 6. Схема пространственного перепрофилирования лопаток

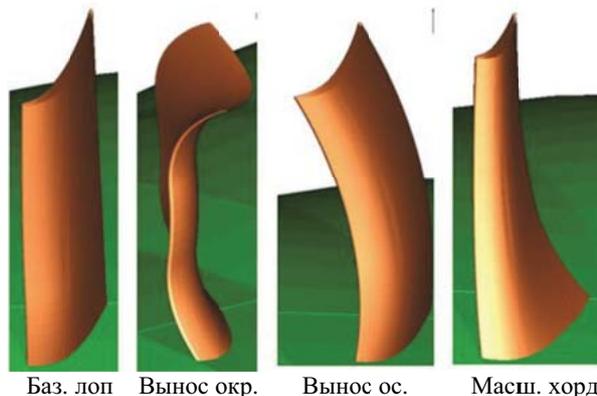


Рис. 7. Пример пространственного перепрофилирования лопаток ТНД

Описанный метод параметризации и пере-профилирования лопаток использовался при решении задач оптимизации ТНД.

**ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ТНД**

Как отмечалось выше, для численных моделей, используемых при оптимизации, накладываются два противоречивых требования: точность расчёта параметров работы ТНД, а также требуемое время вычисления и требуемые вычислительные ресурсы. При многокритериальной оптимизации ТНД по описанной выше методике, время одной итерации оптимизации и требуемые вычислительные ресурсы определяются блоком расчета газодинамических параметров, а именно скоростью расчёта газодинамических параметров работы ТНД.

На базе исходной геометрии турбины была создана численная модель оптимизируемой турбины. КЭ сеть создана в программе NUMECA AutoGrid 5 с помощью блочно-упорядоченной сети (рис. 8).

В качестве граничных условий на входе в турбины были заданы осредненные значения полного давления  $p^*$ , полной температуры  $T^*$ , входного угла потока  $\alpha$  и турбулентной вязкости в соответствующем сечении проточной части ГТД. На выходе из турбин задавалось статическое давление на втулочном радиусе. Давление на остальных радиусах рассчитывалось программой автоматически, согласно уравнению радиального равновесия. Величина статического давления на выходе из турбины назначалась в соответствии с требуемой степенью расширения.

В качестве рабочего тела использовался идеальный газ со свойствами продуктов сгорания керосина [5].

Для передачи данных между областями СА и РК применялся встроенный в программный комплекс интерфейс Full Non Matching Mixing Plane.

Для исследуемой турбины не имеется данных экспериментальных исследований. По этой причине для доказательства адекватности результатов, полученных с помощью CFD-моделирования выполнено исследование сеточ-



Рис. 8. КЭ модель исследуемой ТНД

ной независимости. Для этого созданы четыре КЭ модели исследуемой турбины с различным количеством элементов по высоте части и по ширине межлопаточного канала. Аналогичный подход используется в [6], где выполняется сравнение расчетных характеристик с экспериментальными. Количество элементов в созданных моделях турбины приведено в табл. 1.

Размер первого элемента всех созданных сетях был подобран таким образом, чтобы обеспечить значение безразмерного параметра  $y^+ = 1$ .

Характеристики ТНД, рассчитанные с использованием созданных сетей показаны на рис. 9. Характеристики ТНД, рассчитанные с использованием различных моделей турбулентности с использованием модели Сеть3 показаны на рис. 10.

Из анализа рис. 9 следует, что расчетные значения КПД и расхода рабочего тела с изменением количества элементов в сетке лопаток с 6417 до 33969 незначительно меняются (изменение эффективности составляет не более 0,5% (макс.), расхода рабочего тела не более 0,25 кг/с (менее 1% от массового расхода через LPC). При этом количество элементов в вычислительной сети ТНД увеличивается примерно в 5 раз с 3,6 до 19,2 миллиона элементов, что приводит к существенному увеличению требуемого времени вычисления и затрат вычислительных ресурсов. Качественно при изменении количества элементов в сети расчетные характеристики смещаются равномерно, т. е. их тренд качественно не меняется.

Учитывая тот факт, что численная модель для исследования оптимизации должна позво-

Таблица 1. Параметры созданных численных моделей ТНД

Обозначение	Количество элементов в одном слое сети	Количество слоев сети по высоте проточной части	Суммарное количество элементов в сети
Сеть1	13359	49	3 633 669
Сеть2	23810	57	8 143 337
Сеть3	27797	73	12 175 084
Сеть4	37716	85	19 235 173

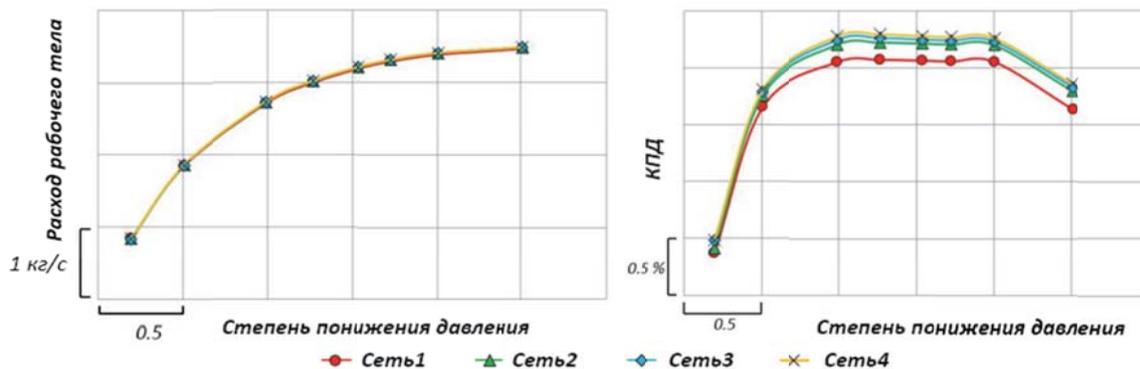


Рис. 9. Сравнение характеристик ТНД, рассчитанных с использованием сетей с различным количеством элементов

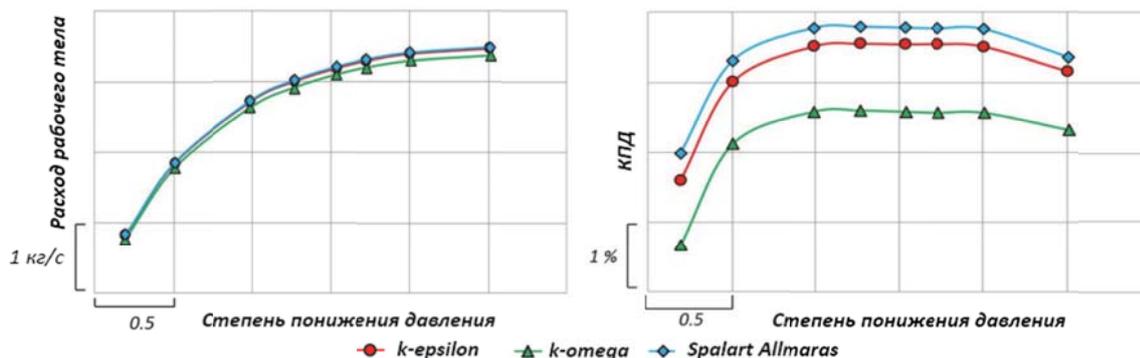


Рис. 10. Сравнение характеристик ТНД, рассчитанных с использованием различных моделей турбулентности

Для расчета тенденций изменения характеристик турбины и иметь минимальное время вычисления, было решено в первую очередь, провести оптимизацию с использованием модели Сеть1 (3 633 669 элементов), а для проверки результатов оптимизации использовать модель Сеть3 (12 175 084 элементов), при которой достигается сеточная независимость (увеличение количества элементов в сетке, большее, чем в Сеть3, не приводит к существенным различиям в значении расчетных параметров турбины).

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

Базовый вариант исследуемой трехступенчатой ТНД (рис. 1) имеет высокую эффективность, но в то же время имеет ряд конструктивных недостатков.

Во-первых, конструкция ТНД не содержит выходного спрямляющего аппарата, что обуславливает значение интегрального угла выхода потока из турбины 22,7 градуса. В то же время на выходе из турбины имеется остаточная закрутка потока, которая характеризуется параметром  $\Delta\alpha_{out}$  – разницей между максимальным и минимальным значением абсолютного угла выхода потока из турбины в радиальном направлении (рис. 11). Значение параметра остаточной закрутки для базового варианта ТНД 12,8 градуса. Рост значения

остаточной закрутки потока на выходе из турбины приводит к росту потерь в выходном устройстве, что ведёт к уменьшению общего КПД двигателя. По этой причине требовалось, в результате решения задачи оптимизации, требовалось сократить интегральный угол выхода потока из турбины до 16 градусов, а также уменьшить параметр остаточной закрутки до 10 градусов (рис. 11).

Таким образом, целью оптимизации ТНД являлось уменьшение интегральных значений угла выхода потока из ТНД  $\alpha_{out}$ , уменьшение значения параметра остаточной закрутки на выходе из ТНД  $\Delta\alpha_{out}$  при сохранении высоких значений КПД. В то же время другие параметры работы ТНД (расход рабочего тела, степень понижения давления, мощность) не должны были меняться более чем на 0,5% от базового значения.

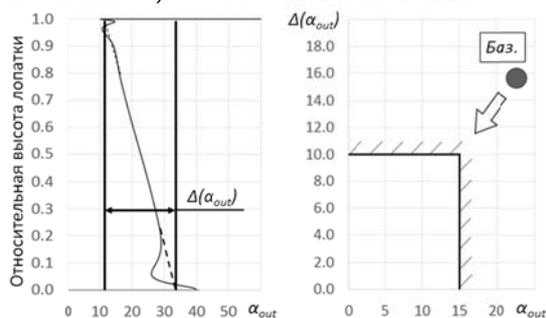


Рис. 11. Остаточная закрутка потока на выходе из ТНД

Критерии данной задачи оптимизации: увеличение эффективности ТНД, уменьшение значения интегрального угла потока на выходе из ТНД  $\alpha_{out}$ , а также уменьшение параметра остаточный закрутки  $\Delta\alpha_{out}$  на выходе из ТНД. Ограничениями задачи являлись параметры работы ТНД: расход рабочего тела  $G$ , степень понижения давления  $p_T^{**}$ , мощность  $N$ . Эти параметры при оптимизации не должны изменяться более чем на 0,5% от базового значения.

### ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

На первом этапе выполнялось решение задачи газодинамической оптимизации ТНД. Решение задачи газодинамической оптимизации ТНД выполнялось по алгоритму, показанному на рис. 2.

Как было отмечено выше, газодинамическая задача оптимизации решалась в трёхкритериальной постановке с ограничениями.

Критериями оптимизации являлись:

КПД ТНД;

Значение интегрального угла выхода потока из турбины  $\alpha_{out}$  (должно было быть не более 15 градусов);

Значение параметра остаточной закрутки на выходе из турбины  $\Delta\alpha_{out}$  (должно было быть не более 10 градусов).

Ограничениями являлись газодинамические параметры ТНД: расход рабочего тела  $G$ , степень понижения давления  $p_T^{**}$ , мощность  $N$ . Эти параметры при оптимизации не должны изменяться более чем на 0,5% от базового значения.

Параметры, описывающие геометрию лопаток ротора и статора, использовались как переменные в процессе газодинамической оптимизации ТНД. Для лопаток статора выполнялось 2D и 3D перепрофилирование, для лопаток ротора выполнялось только 2D перепрофилирование.

Для лопаток статора и ротора 2D перепрофилирование выполнялось за счёт изменяя угла установки профилей лопаток  $\Delta\gamma$  и двух ординат точек сплайна, описывающего среднюю линию  $\Delta\gamma_1$  и  $\Delta\gamma_2$  в трёх сечениях (втулочном, среднем и периферийном (рис. 4). Таким образом, количество переменных, используемых для 2D перепрофилирования лопаток ротора и статора, составляло 9 на каждый лопаточный венец.

3D перепрофилирование лопаток статора выполнялось за счёт сдвига сечений лопаток в окружном и осевом направлениях, а также за счёт масштабирования сечений. Закон распределения этих параметров в радиальном направлении описывался кривой Безье из трёх контрольных точек (рис. 6). Таким образом, количество варьируемых переменных для описания 3D формы лопатки каждого соплового аппарата 9.

Суммарное количество варьируемых переменных в задаче газодинамической оптимизации ТНД 81.

Оптимизация выполнялась с использованием CFD модели ТНД Сеть1 модель турбулентности Spalart-Allmaras.

В процессе решения задачи оптимизации было выполнено около 1000 обращений оптимизатора к математической модели ТНД. При этом пространство оптимальных решений было обнаружено после примерно 600 обращений. История решения задачи оптимизации показана на рис. 12.

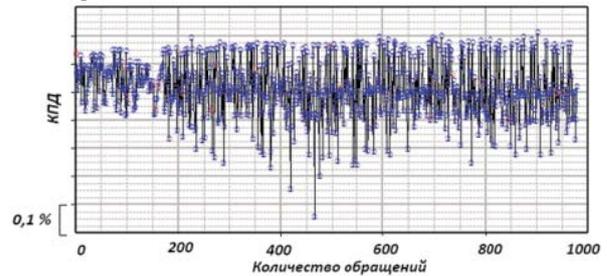


Рис. 12. История поиска решения задачи газодинамической оптимизации ТНД

Как результат решения задачи оптимизации был получен фронт Парето компромиссных решений между величиной КПД, интегральным углом выхода потока из ТНД  $\alpha_{out}$  и параметром, характеризующим величину остаточной закрутки потока на выходе из ТНД  $\Delta\alpha_{out}$ . Полученный фронт Парето показан на рис. 13. На рис. 13 величина КПД показана кругами, диаметр которых тем больше, чем больше падение КПД в данной точке по сравнению с базовым значением:

$$\Delta\text{КПД}_i = \text{КПД}_{\text{баз}} - \text{КПД}_i$$

где  $\text{КПД}_{\text{баз}}$   $Eff_{Base}$  — значение КПД для базового варианта ТНД;  $\text{КПД}_i$   $Eff_i$  — значение КПД для  $i$ -го варианта ТНД с фронта Парето.

Следует отметить, что каждой точки фронта Парето соответствует уникальный вариант ТНД.

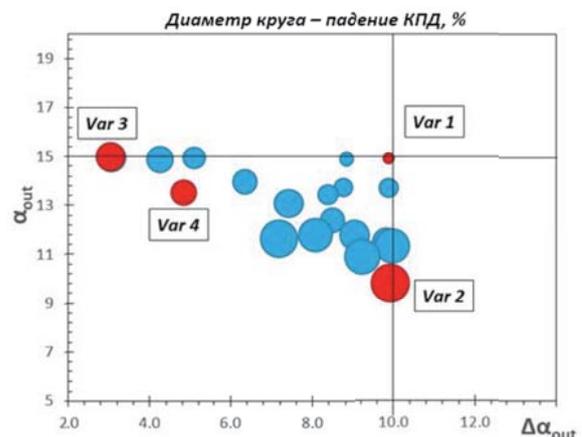


Рис. 13. Фронт Парето

Анализ полученного фронта Парето показал, что уменьшение угла выхода потока из турбины  $\alpha_{out}$  и параметра остаточной закрутки  $\Delta\alpha_{out}$  возможно только при падении КПД. В то же время минимальное падение КПД 0,12% наблюдается для варианта ТНД, находящегося на границе заданных ограничений. Четыре точки фронта Парето были выбраны для дальнейшего анализа (табл. 2):

- точка с минимальным падением КПД относительно базового варианта ТНД;
- точка с минимальным значением угла выхода потока из турбины  $\alpha_{out}$ ;
- точка с минимальным значением параметра остаточной закрутки  $\Delta\alpha_{out}$ ;
- компромиссный вариант.

Рис. 14 показывает графики распределения угла выхода потока из ТНД в радиальном направлении для 4 выбранных вариантов ТНД и базового варианта ТНД. Видно, что в результате оптимизации угол выхода потока и остаточная закрутка потока были значительно сокращены.

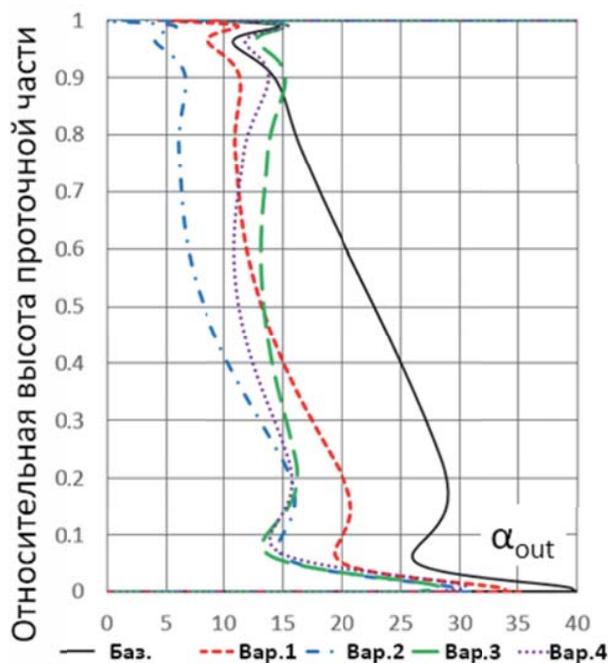
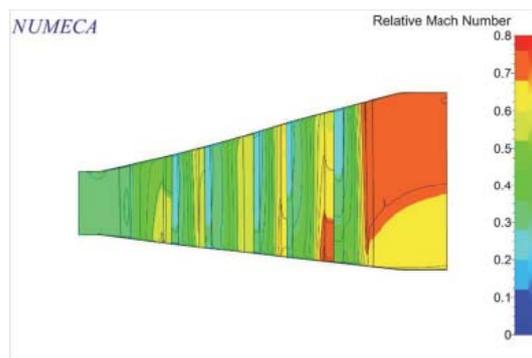


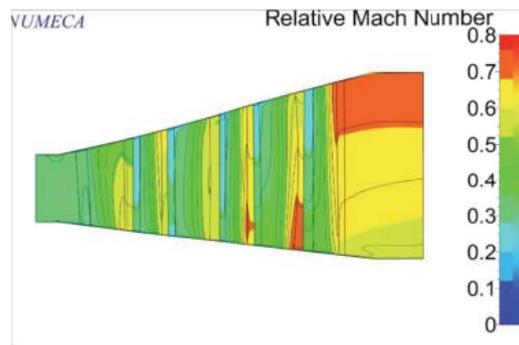
Рис. 14. Графики распределения угла выхода потока из ТНД в радиальном направлении

На рис. 15 показано сравнение чисел Маха, усредненных по окружности для вариантов ТНД 1 и 4 и их сравнение с полями базового варианта ТНД. Рис. 15 показывает, что основные изменения в структуре потока в ТНД произошли в последнем рабочем колесе.

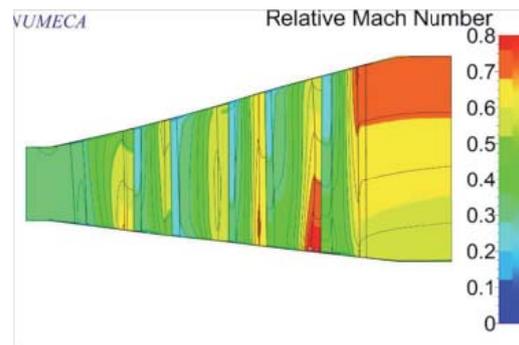
Проверка результатов решения задачи газодинамической оптимизации ТНД выполнена с использованием сетей Сеть1 и более детальных сетей Сеть3 с моделями турбулентности Spalart – Allmaras, k-epsilon и k-omega. Выполнялась проверка всего полученного фронта Парето. Показано, что использование более точных моделей



Базовый вариант ТНД



ТНД: Вариант 1



ТНД: Вариант 4

Рис. 15. Сравнение рассчитанных полей числа Маха в проточной части ТНД для различных вариантов

приводит только к небольшому количественному изменению рассчитанных параметров ТНД. Качественно результаты (позиция точек относительно друг друга и относительно заданных ограничений) при использовании более точных сетей не меняются (рис. 16). Этот факт позволяет использовать для оптимизационных исследований более быструю, но менее точную модель ТНД. В табл. 3 приведено сравнение рассчитанных параметров ТНД с использованием различных сетей.

## ВЫВОДЫ

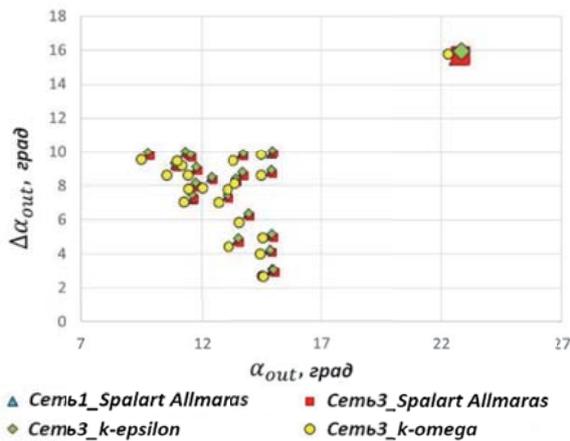
Был разработан алгоритм и методика решения многокритериальной задачи оптимизации многоступенчатой турбины по газодинамическим критериям. С использованием разработан-

**Таблица 2.** Значения параметров ТНД в выбранных точках фронта Парето

Вариант ТНД	Падение КПД, %	Интегральный угол расхода на выходе $\alpha_{out}$ , град	Закручивание потока на выходе из ТНД $\Delta\alpha_{out}$ , град
Базовый	0	22.73	12.79
Вариант 1	0.12	14.92	9.89
Вариант 2	0.386	9.82	9.92
Вариант 3	0.292	14.95	3.06
Вариант 4	0.262	13.53	4.83

**Таблица 3.** Параметры ТНД для точки фронта Парето с минимальным значением падения эффективности (Вариант 1), полученные с использованием различных численных моделей

CFD - модель	Падение КПД, %	Интегральный угол расхода на выходе $\alpha_{out}$ , град	Закручивание потока на выходе из ТНД $\Delta\alpha_{out}$ , град
Mesh1_SA	0.12	14.92	9.89
Mesh3_SA	0.12	15.00	9.92
Mesh3_k-e_Y_Sh	0.15	14.96	10.09
Mesh3_k-w	0.13	14.50	9.84



**Рис. 16.** Расчет параметров работы вариантов турбины с фронта Парето с использованием различных расчетных моделей

ного алгоритма была выполнено оптимизация ТНД. В результате решения задачи оптимизации ТНД был найден вариант, который позволяет уменьшить угол выхода потока.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Aero-engine Design: From State of the Art Turbofans Towards Innovative Architectures, Lecture Series 2008-03.
2. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: учеб. М.: Машиностроение, 2008. 368 с.
3. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. М.: Наукова думка, 1982. 296 с.
4. NUMECA, User Manual AutoGrid5 Release 8.4, NUMECA.inc., Belgium, January 2008
5. Shablii L.S., Dmitrieva I.B. Blade geometry transformation in optimization problems from the point cloud to the parametric form // Russian Aeronautics, 57(3), 2014, pp.276-282
6. Workflow optimization of multistage axial turbine / Matveev, V.N., Popov, G.M., Baturin, O.V., Goryachkin, E.S., Kolmakova, D.A. // 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Orlando, USA, 2015

**MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION WORKFLOW UNCOOLED THREE-STAGE AXIAL LOW PRESSURE TURBINE**

© 2018 G. M. Popov, E. S. Goriachkin, Y. D. Novikova, V. M. Zubanov, A. A. Volkov, A. I. Korneeva

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The article describes the results of multi-criteria optimization of a three-stage axial uncooled low-pressure turbine. The purpose of optimization was to improve the turbine operating process according

to three criteria: the angle of flow at the turbine output, the value of the residual twist of the flow at the turbine output, the value of the turbine efficiency. To solve the problem, complete re-profiling of all turbine blades was performed. Re-profiling included changing both the shape of the blade sections and the relative position of the sections relative to each other in the radial direction (3D profiling).

*Keywords:* optimization, low-pressure turbine, working process, model, geometry of blades

---

*Grigory Popov, Candidate of Technics, Assistant Lecturer at the Theory of Aircraft Engines Department. E-mail: grishatty@gmail.com*

*Evgeny Goryachkin, Assistant Lecturer at the Theory of Aircraft Engines Department. E-mail: goriachkin.e.s@gmail.com*

*Julia Novikova, Graduate Student at the Theory of Aircraft Engines. E-mail: y.d.novikova@gmail.com*

*Vasily Zubanov, Graduate Student of the Theory of Aircraft Engines. E-mail: waskes91@gmail.com*

*Andrei Volkov, Graduate Student of the Theory of Aircraft Engines. E-mail: a44rey@gmail.com*

*Anastasia Korneeva, Graduate Student at the Theory of Aircraft Engines. E-mail: akorneeva94@mail.ru*