

***Золотухин Антон Сергеевич***

ассистент кафедры  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
инженер-расчетчик  
АО «Силовые машины»  
г. Санкт-Петербург

***Маренина Любовь Николаевна***

канд. техн. наук, доцент  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
г. Санкт-Петербург

***Дроздов Александр Александрович***

д-р техн. наук, профессор  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
г. Санкт-Петербург

***Галеркин Юрий Борисович***

д-р техн. наук, профессор  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
г. Санкт-Петербург

***Семеновский Василий Борисович***

канд. техн. наук, доцент  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
г. Санкт-Петербург

***Яблоков Алексей Михайлович***

старший преподаватель

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
г. Санкт-Петербург

## СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ

***Аннотация:** авторы статьи отмечают, что составление универсального подхода к оптимизации сокращает время на доводку компрессора. В связи с чем вопрос составления данного подхода при проведении подобного рода оптимизационных задач является актуальной задачей. В ходе работы были рассмотрены актуальные и современные подходы к оптимизации компрессоров осевого типа: как одно-, так и многоступенчатых. По открытым источникам была составлена классификация подходов к оптимизации в зависимости от учитываемых пространственных явлений: 1D/квази-2D, 2D и 3D. Для каждой группы оптимизационных задач было описано её предназначение в общем цикле проектирования компрессора, а также приведены конкретные примеры. Рассмотрены основные алгоритмы оптимизации осевых компрессоров, которые актуальны на сегодняшний день.*

***Ключевые слова:** осевой компрессор, задачи оптимизации, многокритериальная оптимизация, алгоритмы оптимизации, целевые функции.*

### *Введение*

При проектировании осевых компрессоров важно получить как наиболее оптимальные параметры узла в расчетной точке номинального режима работы установки ( $\dot{m}_{\text{расч}}$ ,  $\pi_{\text{к расч}}^*$ ,  $n_{\text{ном}}$ ), так и обеспечить широкий диапазон его устойчивой работы на различных режимах её работы.

Для решения данных задач оптимального проектирования компрессоров широко применяются методы вычислительной газовой динамики (CFD). Данный подход позволяет сократить объем проводимых физических экспериментов и в более короткий срок сформировать облик будущего компрессора [2]. Для реше-

ния задач поиска оптимальной геометрии проточной части используются различные методы оптимизации. Так как в компрессорах, за частую требуется обеспечение минимум или максимум нескольких целевых функций, то происходит решение задачи многокритериальной оптимизации [1].

*Классификация задач оптимизации осевых компрессоров  
по учитываемым пространственным явлениям*

По проведенному анализу открытых научных источников, можно сделать вывод, что большую часть оптимизационных исследований в области осевых компрессоров можно поделить на три большие группы, в зависимости от того, какие пространственные явления в них учитываются [2]:

- задача оптимизации по параметрам на среднем радиусе невязкого течения на основе уравнений термодинамики (1D постановка и квази-2D постановка);
- осесимметричный расчет невязкого течения с учетом геометрии профилей (2D постановка);
- задача оптимизации в трехмерной постановке вязкого течения (3D постановка).

Течение в межлопаточном канале венца лопаточной машины включает в себя множество типов сложных пространственных течений [2]. Современные CFD методы, при правильной постановке задачи, позволяют с большой степенью точности моделировать сложный характер течения в проточной части компрессора. При этом возможно проведение оптимизации в такой постановке, которая либо не учитывает, либо косвенно учитывает взаимное влияние сечений по высоте лопатки. Такие подходы названы как: оптимизация на среднем радиусе (1D оптимизация) и оптимизация с косвенным учетом взаимного влияния струек тока по высоте между собой (квази-2D).

Наибольшее распространение получение модель, предложенная Koch С.С., Smith L.H [7], также существуют модели Хауэлла [5], Картера [3], других авторов [10; 11] и т. д.

Так, в работе Jinguang Y. и др. [6] проведена 1D оптимизация шестиступенчатого осевого компрессора путем изменения угла установки направляющих аппаратов. Для коэффициентов используемых эмпирических моделей так же осуществляется корректировка. В работе используется генетический алгоритм оптимизации NSGA-II. Результаты численной оптимизации качественно коррелируют с экспериментальными значениями. Количественно же, результаты оптимизации всё же показывают завышение значений КПД компрессора.

После определения предварительных параметров компрессора по параметрам на среднем радиусе переходят к осесимметричному расчету компрессора – 2D постановка. При этом, выполняется предварительное профилирование лопаточного аппарата компрессора (уточнение углов атаки и отставания) и расчет на прочность его наиболее важных частей (лопаток и дисков).

Так, для пятнадцатиступенчатого компрессора в работе M. Schnoes, C. Voß и E. Nicke [8] была проведена оптимизация в 2D постановке путем выбора оптимального профиля из библиотеки, сгенерированной с помощью нейронной сети. Варьируя геометрическими параметрами профиля, а также расчетными условиями течения и аэродинамической нагруженностью профиля формируется библиотека профилей. Для достижения аэродинамического совершенства компрессора применяются программные комплексы, направленные на разрешение трехмерного вязкого течения – CFD подходы. Для этого реализуется разрешение системы уравнений Навье-Стокса [2].

В работе U. Siller, C. Voß и E. Nicke [9] приведен пример мультидисциплинарного подхода к многокритериальной оптимизации осевого компрессора. Эволюционный алгоритм AutoOpti в данном случае позволяет разрешить две задачи: поиск аэродинамического совершенства рассматриваемого компрессора, а также проверка на статическую и динамическую прочности для доминантных аэродинамических вариантов (рис. 1).

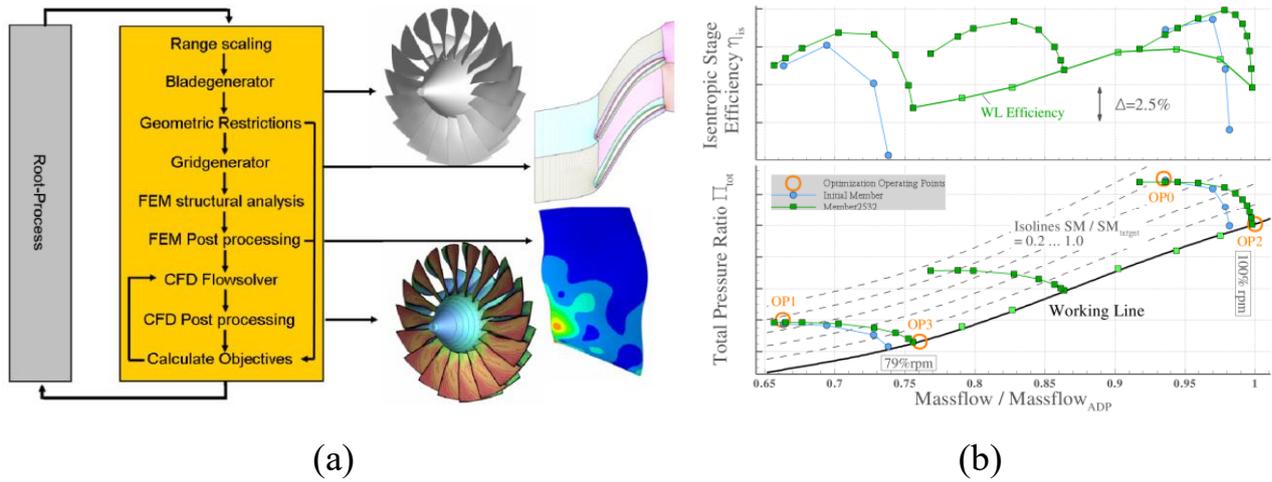


Рис. 1. Подход к 3D мультидисциплинарной оптимизации трансзвукового компрессора и её результаты в работе U. Siller, C. Voß и E. Nicke [9]

Итоговое представление к подходам оптимизации осевых компрессоров приведено на рис.2 с указанием наиболее очевидных преимуществ и недостатков каждого из них.



Рис. 2. Результирующая схема к подходам по оптимизации осевых компрессоров

### *Алгоритмы оптимизации*

При решении любой оптимизационной задачи, в зависимости от выбранного метода оптимизации, определяется последовательность действий – алгоритм. Опираясь на открытые исследования в данной области, можно выделить следующие основные группы алгоритмов [4]: генетические алгоритмы; адаптивные алгоритмы; эволюционные алгоритмы самоорганизации; алгоритмы на основе моделирования искусственных нейронных сетей; градиентные алгоритмы.

Подход к выбору алгоритма зачастую зависит от опыта предприятия-исследователя, а также от поставленной задачи. Наибольшую популярность обрели генетические и эволюционные алгоритмы. За более чем 40 лет данные алгоритмы существенно доработались до высокого уровня.

При этом, большой популярностью также пользуются методы оптимизации по поверхности отклика. Данная поверхность является математическим представлением зависимости целевых функций от параметров оптимизации. Преимуществом данного метода является то, что после наработки плана эксперимента и аппроксимации зависимостей не требуется численного разрешения альтернативных вариантов, находящихся на поверхности отклика.

### *Целевые функции*

Авторы работы [1] дают такое определение целевым функциям: «Признаки, по которым признаки, по которым следует провести сравнительную оценку альтернатив, получаемых в ходе оптимизации вариантов, и выбрать среди них наилучшую с точки зрения поставленной задачи. Иными словами – сформировать целевые функции. При этом критерием оптимальности может быть требование достижения наибольшего или наименьшего значения одной или несколькими действительными (скалярными) функциями параметров оптимизации, выражающими количественно меру достижения цели оптимизации рассматриваемого объекта. Каждую из таких функций принято называть целевой».

Наиболее часто перед исследователем в ходе оптимизации требуется повысить интегральные и расходные характеристики компрессора. Такая постановка выглядит следующим образом:

$$\eta_{ad} = \frac{\pi_k^{*k} - 1}{\frac{T_{out}^*}{T_{in}^*} - 1} \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$m_{in} \rightarrow \max. \quad (2)$$

где  $\eta_{ad}$  – адиабатический КПД компрессора;  $\pi_k^*$  – степень повышения полного давления в компрессоре;  $T_{out}^*$  и  $T_{in}^*$  – температура торможения на выходе из компрессора и входе в него;  $m_{in}$  – расход на входе.

Для многоступенчатых компрессоров важно обеспечить равномерность радиального распределения полного давления на выходе из его ступеней. При это можно рассмотреть целевую функцию, обеспечивающую данное условие:

$$\Delta p_{out}^* = \frac{p_{out,max}^* - p_{out,ave}^*}{p_{out,ave}^*} \rightarrow \min. \quad (3)$$

где  $p_{out,max}^*$  – максимальное значение в эпюре полного давления на выходе из ступени;  $p_{out,ave}^*$  – среднеарифметическое значение эпюры давления выходе из ступени.

Основные группы целевых функции основываются на обеспечении минимума или максимума (или же стремление к определенному значению) в интегральных параметрах компрессора и же параметрах отдельных элементов. Представление подобного подхода, с примерами целевых функций, приведено на рис. 3.

### *Параметры оптимизации и ограничения*

Ранее по тексту упоминалось, что программа-оптимизатор должна воспринимать достаточное количество параметров оптимизации и их ограничений. Параметрами называют изменяемые при оптимизации величины, а ограничениями – пределы изменения данных параметров. Применительно к осевым компрессорам, в качестве параметров оптимизации выступают геометрические характеристики как трактовых поверхностей, так и лопаточного аппарата. К наиболее часто используемым можно отнести: лопаточные углы профиля на входе и выходе; угол установки профиля; навал (вынос центра масс) лопатки: осевой и тангенциальный; положение узловых сторон давления и разряжения профилей

(часто заданных в виде кривых Безье или сплайнов  $n$ -го порядка); узловые точки корпуса (часто заданных в виде кривых Безье или сплайнов  $n$ -го порядка) др.

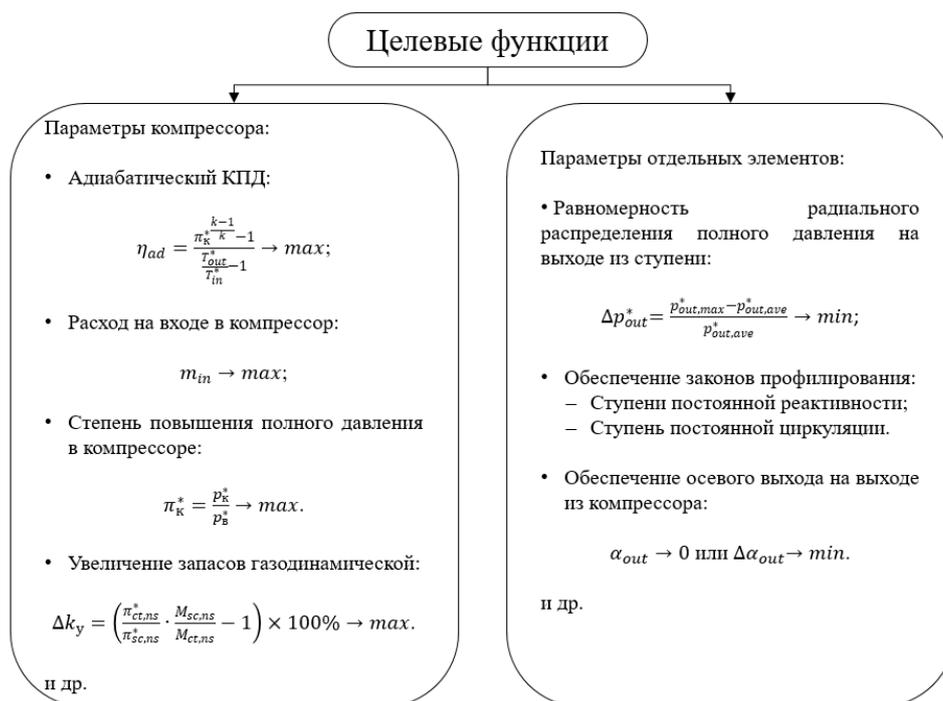


Рис. 3. Классификация целевых функций для задач оптимизации осевых компрессоров

Также стоит обращать внимание на то, в каких пределах варьируются данные величины, то есть – задать ограничения.

В качестве примера такой геометрии можно привести результаты оптимизации ступени NASA Stage 37 (рис. 4). Для решения поставленной задачи использовался генетический алгоритм IOSO в связке с сеточным генератором AutoGrid5 и решателем Ansys CFX.

Не смотря на увеличение интегральных характеристик ступени (рис. 4, b, c), стоит обратить внимание на параметры сечений по соседству от указанного  $i$ -го (рис. 4, a). Имеет место большой градиент угла установки между сечениями. Данный факт негативным образом сказывается на прочностных характеристиках рассматриваемой ступени.

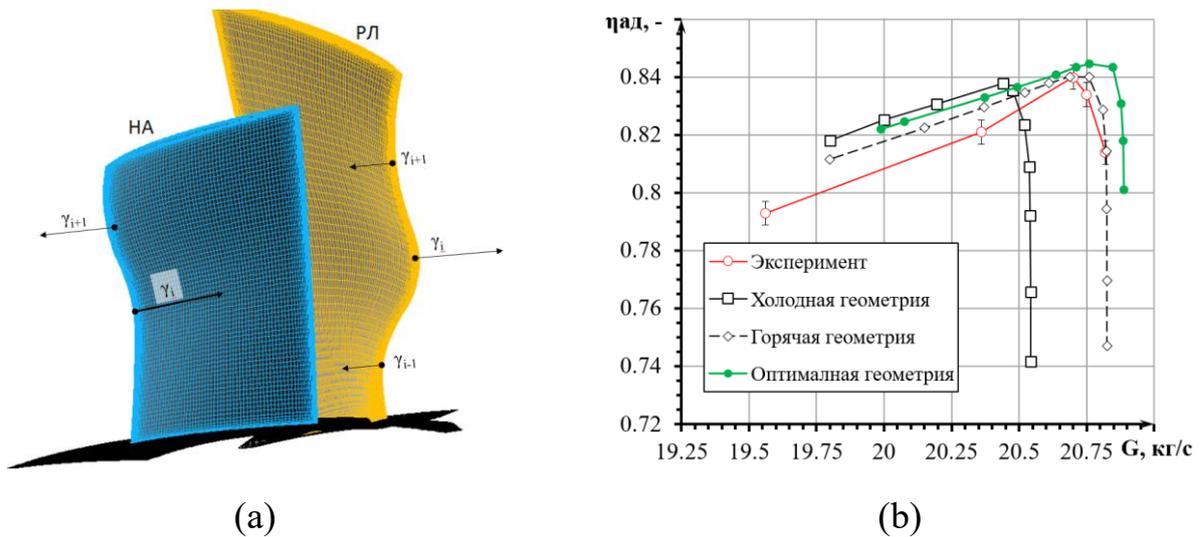


Рис. 4. Результат 3D оптимизации осевой компрессорной ступени NASA Stage 37: (a) – полученная геометрия; (b) – сопоставление характеристик исходной ступени с оптимальной

### Заключение

В ходе данной работы были рассмотрены современные подходы к оптимизации осевых компрессоров. На основе приведенных примеров была составлена классификация задач оптимизации по типу учитываемых пространственных явлений: 1D/квази-2D, 2D и 3D. На основе этого была составлена соответствующая схема, в которой отмечены преимущества и недостатки каждого типа задач, а также их предназначения в контексте проектирования компрессора.

Проведенный в данной работе анализ современного подхода к оптимизации осевых компрессоров будет использован полезным образом на следующих этапах работы: отработка методики оптимизации на модельной ступени, а в последующем на многоступенчатом осевом компрессоре газотурбинной установки.

### Список литературы

1. Аттетков А.В. Методы оптимизации: учеб. для вузов / А.В. Аттетков, С.В. Галкин, В.С. Зарубин; под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 440 с.
2. Иноземцев А.А. Газотурбинные двигатели / А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий. – Пермь: Авиадвигатель, 2006. – 1202 с.

3. Carter A.D.S. The low speed performance of related aerofoils in cascades / A.D.S. Carter. – 1950. – 46 p.
4. Popov G. Axial compressor optimization method / G. Popov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 904. – 012008.
5. Howell A.R. Fluid Dynamics of Axial Compressors / A.R. Howell // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. – 1945. – Vol. 153. No. 1. – P. 441–452.
6. Jinguang Y. Stator re-stagger optimization in multistage axial compressor / Y. Jinguang // Propulsion and Power Research. – 2021. – Vol. 10. Issue 2. – P. 107–117.
7. Koch C.C. Loss Sources and Magnitudes in Axial-Flow Compressors / C.C. Koch, L.H. Smith // Journal of Engineering for Power. – 1976. – Vol. 98. No. 3. – P. 411–424.
8. Schnoes M. Design optimization of a multi-stage axial compressor using throughflow and a database of optimal airfoils / M. Schnoes, C. Voß, E. Nicke // Journal of the Global Power and Propulsion Society. – 2018. – Vol. 2. – P. 516–528.
9. Siller U. Automated Multidisciplinary Optimization of a Transonic Axial Compressor / U. Siller, C. Voß, E. Nicke // 47th AIAA Aerospace Sciences Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition (Orlando, 5–8 January 2009). – 2009. – 12 p.
10. Разработки математической модели и компьютерной программы первичного проектирования трансзвуковых осевых компрессоров / А.И. Боровков, Ю.Б. Галеркин, О.А. Соловьёва [и др.] // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. – 2020. – Т. 4. №4. – С. 16–27. DOI 10.25206/2588-0373-2020-4-4-16-27. EDN FINYLD
11. Сахранавард М. О первичном проектировании рабочих колес осевых компрессоров / М. Сахранавард, Л.Н. Маренина, О.А. Соловьёва // Компрессорная техника и пневматика. – 2022. – №3. – С. 28–37. EDN XPHADA

12. Современные подходы к оптимизации осевых компрессоров / А.С. Золотухин, Л.Н. Маренина, А.А. Дроздов [и др.] // Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение». – 2025. – №3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-podhody-k-optimizatsii-osevyh-kompressorov> (дата обращения: 18.02.2026). DOI 10.25206/2588-0373-2025-9-3-64-74. EDN SXCZAS