

УДК 621.165

А.В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф., Ю.Н. ГОВОРУЩЕНКО, канд. техн. наук,  
А.П. УСАТЫЙ, канд. техн. наук

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»*

## **ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ОСЕВЫХ ТУРБОМАШИН – СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ**

В статті проведена оцінка сучасного стану теорії та практики оптимального проектування проточної частини осевих турбомашин, перспектив її розвитку і можливостей використання в турбінобудуванні України. Дослідження базуються на аналізі джерел інформації по названій тематиці, в основному, зарубіжних, та досвіді авторів у області оптимального проектування проточних частин турбомашин. Підтверджена актуальність проблем оптимального проектування проточних частин осевих турбомашин з використанням сучасних методів чисельного моделювання течії рідини в решітках і термонапруженого стану лопаток, а також прогресивних методів пошуку оптимального рішення. Показано, що використання описаних методів дозволяє досягти рекордних показників ефективності створюваних турбомашин при зменшенні терміну доводки конструкції та затрат на проектування.

Семидесятые-восьмидесятые годы прошлого столетия ознаменовались зарождением и быстрым развитием новой научной дисциплины – теории оптимального проектирования проточных частей осевых турбомашин. Существенный вклад в ее развитие внесли отечественные ученые, в том числе и харьковские школы ХПИ [1] и ИПМаш [2], а также МЭИ, МВТУ, ЛПИ и др. Систематическое изложение используемых подходов, моделей и методов оптимизации проточной части осевых турбин было изложено в монографиях [1-4], однако, следует отметить, что с распадом Советского Союза работы в этом направлении практически прекратились.

В то же время, с середины 90-х годов наблюдается интерес к оптимизации турбомашин со стороны ведущих, в большей части, зарубежных энергомашиностроительных и аэрокосмических компаний, что привело к появлению большого количества публикаций по этой теме и их число постоянно возрастает.

Данная статья основывается на обзоре публикаций, докладов, представленных на различные международные конференции, а также других материалов, которые можно найти в сети Интернет, и ставит своей целью проанализировать современное состояние оптимизации турбомашин, пути ее развития и подходы, используемые при решении поставленной задачи.

В настоящее время сформировалась общая схема оптимального проектирования, которая подразумевает проведение многовариантных расчетов с использованием математической модели (моделей) элементов проточной части, управляемых специальным блоком оптимизации, процедуры параметризации, а также, при необходимости, модулей построения расчетных сеток для программ расчета и пре- и постпроцессоров для обмена данными в системе. В тех случаях, когда одновременно принимаются во внимание различные разнородные модели изучаемого объекта (например, аэродинамические, прочностные, температурные), говорят о мультидисциплинарном анализе (MDA) или мультидисциплинарной оптимизации (MDO) [5]. Часто при этом используются модели различной степени сложности, особенно при изучении взаимного влияния различных факторов. Например, при аэродинамической оптимизации расчет потерь может производиться по точной модели, а оценка напряжений в конструкции – по приближенной. Если ориентируются на

промышленные решения, в качестве решателей выбирают коммерческие программы вычислительной аэродинамики, прочностного анализа и пр. В отдельных случаях используются программы, разработанные для исследовательских целей, или специализированные решатели. Остальные элементы, как правило, создаются самостоятельно, с использованием языковых интерфейсов, предоставляемых решателями. Наиболее важным представляется параметризация объекта оптимизации, т.к. от этого во многом зависит полезность получаемого решения и скорость поиска экстремума. Обычно стараются генерировать регулярные расчетные сетки, обеспечивающие более высокую точность решения уравнений.

Используемые методы оптимизации, как правило, основываются либо на случайном поиске (например, генетические алгоритмы, квазислучайные последовательности) изучаемого объекта, либо на предварительном построении суррогатных моделей (функций отклика, макромоделей) с помощью методов планирования эксперимента или нейронных сетей с последующей оптимизацией на упрощенных моделях. Преимуществами второго подхода является существенное (на порядки) снижение количества пробных точек и удобство анализа чувствительности получаемого оптимального решения. Недостатки заключаются в невозможности оптимизации негладких функций и сравнительно небольшом количестве независимых переменных.

Очевидно, что в задачах оптимизации, особенно мультидисциплинарной, с точки зрения эффективности отыскания оптимального решения выгодно использовать упрощенные математические модели. Для создания упрощенных моделей, обеспечивающих адекватность исследуемому объекту, требуется привлечение многолетнего опыта специалистов в исследуемой области. Другой, более формальный подход, заключается в применении «грубой силы», т.е. оптимизации с привлечением наиболее сложных трехмерных моделей – аэродинамических, прочностных и проч. [6 и др.]. С появлением возможности использования все больших вычислительных мощностей предпочтение отдается второму подходу. Высказывается даже крайнее мнение о несостоятельности оптимизации на упрощенных моделях [7]. Критерием истины в данном случае может быть только практика реального проектирования и время. Совершенно четко можно утверждать, что применение тех или иных моделей зависит от постановки задачи оптимизации, количества учитываемых факторов, требуемого времени на получение решения. В этом плане интересной является работа [8], где демонстрируется разница в подходах к решению задачи предварительного проектирования проточной части турбины и оптимизации формы лопаток. В первой постановке используется многокритериальная оптимизация (по экономичности, прочности, себестоимости), возможная только на упрощенных моделях в силу необходимости построения поверхности Парето. Решение производилось с использованием разновидности генетического алгоритма, допускающего параллельное вычисление точек паретовской поверхности. Согласно полученному решению с повышением эффективности наблюдается повышение себестоимости и напряженности конструкции. Выбор компромиссного варианта, как обычно, возлагается на проектировщика. Рассматриваемая далее оптимизация пера лопатки использует единственный критерий оптимальности – потери в венце, трехмерную модель расчета потока, и всего лишь 8 варьируемых параметров, описывающих форму лопатки. Решение методом случайного поиска потребовало вычисления 210 пробных точек, расчет каждой из которых требует несколько часов машинного времени. Решение

поставленной задачи потребовало создания достаточно сложной вычислительной среды.

В более подробном изложении [9] показывается, что хотя для описания закона закрутки и навала лопатки требуется небольшое количество параметров, это позволяет эффективно управлять формой лопатки, добиваясь выигрыша в экономичности ступени. Указывается, что трудно сформулировать общие правила проектирования закрученных лопаток (по крайней мере, применительно к 3D-расчету) поскольку конструкция зависит от многих неочевидных факторов. Нельзя не заметить, что подобные задачи ставилась и решалась (с использованием упрощенных моделей течения) более 20 лет назад в [1, 4] и полученные результаты имеют экспериментальное подтверждение.

В ряде случаев получаемые с использованием трехмерных солверов решения имеют весьма экзотический вид и, безусловно, должны быть подтверждены экспериментально. Примерами таких решений могут быть оптимизированный направляющий аппарат турбины [6] или неосесимметричный дизайн образующих ступени [10].

Методы поиска оптимальных решений сегодня во многом отличаются от тех, которые были популярны в 70-80 годы прошлого столетия [10]. Практически не используются классические градиентные методы поиска, все реже решение ищется детерминированными прямыми методами типа Хука-Дживса или Нелдера-Мида [4,17].

В основном, применяются методы поиска двух типов:

- разновидности случайного поиска на исходных моделях;
- поиск на суррогатных моделях (функциях отклика), получаемых путем планирования численного эксперимента или обучением нейронных сетей.

В некоторых работах [18-20] используется анализ чувствительности.

Наряду с традиционными методами случайного поиска все более широкое применение находят методы, использующие различные аналогии и эвристики.

Моделируемый отжиг, как видно из названия, использует аналогию, заимствованную из металлургии (отжиг металла). Словарь алгоритмов, структур данных и проблем оптимального проектирования определяет моделируемый отжиг как технику получения хорошего решения проблемы оптимизации путем случайных вариаций текущего решения. Худшая вариация принимается как новое решение с вероятностью, которая уменьшается в процессе вычислений. Чем медленнее степень уменьшения, тем более вероятно, что алгоритмом найдено оптимальное или почти оптимальное решение. Его преимуществом является способность избегать попадания в локальные минимумы. Примером использования моделируемого отжига для оптимизации форма профилей является работа [12], в которой, однако, путем сравнения показано, что лучшие результаты дает использование генетического алгоритма. В статье [5] использован гибридный алгоритм, автоматически переключающийся на генетический алгоритм, модифицированный симплексный метод или градиентный метод.

Генетические алгоритмы представляют собой методы случайного поиска, базирующиеся на биологических аналогиях с естественным отбором и генетикой. Они относятся к классу эволюционных алгоритмов. Генетические алгоритмы работают с популяциями решений, которые эволюционируют в сотнях поколений с целью наилучшим образом приспособиться к характеру целевой функции. Случайный поиск проводится в окрестностях тех точек пространства, где существует наибольший потенциал для «выживания» получаемых решений [13]. Существует огромное количество вариаций этого подхода применительно к целочисленным, непрерывным

или комбинированным задачам оптимизации, с дискретным или непрерывным представлением генов, с различными стратегиями биологического развития (мутации, скрещивание, отбор). В Интернете можно найти множество свободно распространяемых реализаций генетических методов. Считается, что генетические алгоритмы наиболее подходят для тех задач, где другие методы бессильны. Примеры использования генетических алгоритмов в задачах оптимизации элементов турбомашин достаточно многочисленны [5, 12, 14-16 и др.].

Достоинством методов, использующих функции (поверхности) отклика является значительное (на порядок и более) сокращение количества расчетных точек при поиске оптимального решения. Существенным ограничением при этом является предположение о гладкости целевой функции в области, где строится поверхность отклика. Построение функций отклика методом планирования численного эксперимента позволяет преобразовать исходную модель к простой полиномиальной зависимости, на которой можно решать задачи анализа и оптимизации. Кроме того, преимуществом таких (суррогатных) моделей является возможность их повторного использования. В вычислительном плане удается распараллелить процесс вычисления функции отклика и тем самым сократить астрономическое время решения задачи [8, 21, 22]. Существуют различные способы планирования эксперимента и подходов к его использованию. Например, для повышения точности аппроксимации и, соответственно, получаемого оптимального решения, используется подход, описанный в [23]. Речь идет о специальном выборе диапазонов аппроксимации, наиболее подходящих для решения конкретной задачи оптимизации.

Существует огромное количество коммерческих программ для планирования эксперимента и оптимизации на его основе, в том числе и для решения инженерных задач, например [24-26] и др. Следует сказать, что на выгоды использования планирования эксперимента для решения задач оптимизации проточных частей турбомашин нами указывалось еще 20 лет назад [3, 4], а предложенные постановки и примеры решения конкретных задач не потеряли актуальности и в настоящее время.

Нейронные сети являются сравнительно новым аппаратом, используемым для решения самых разнообразных задач, в том числе, и связанных с поиском оптимальных решений [8, 9, 21 и др.]. Нейронные сети могут «обучаться» решению той или иной задачи, для чего им следует передать определенное количество информации о правильных решениях. После этого с определенной вероятностью нейронная сеть сама сможет давать ответы на задаваемые ей вопросы. Можно говорить о том, что в нейронной сети происходит построение функции отклика в соответствии с подаваемыми точками обучающей последовательности.

Анализ чувствительности заключается в определении степени влияния изменения независимых переменных в заданной точке на изменение целевой функции. При поиске экстремума стремятся двигаться в направлении, обеспечивающем наибольшее увеличение (уменьшение) целевой функции. Этот подход широко используется в градиентных методах поиска, где очередное направление поиска оценивается численным дифференцированием целевой функции. При решении вариационных задач, где в качестве ограничений присутствуют дифференциальные уравнения в частных производных (например, уравнения Навье-Стокса), применяются оптимизационные схемы, основанные на решении уравнений чувствительности, которые выводятся аналитически для используемых уравнений и решаются численно теми же методами, что и уравнения модели [19]. Как обычно, производится параметризация исследуемой конструкции, затем путем решения уравнений

чувствительности определяются градиенты по параметрам и организуется поиск оптимального решения одним из методов нелинейного программирования. В работе [19] был использован SQP (Sequential Quadratic Programming), представляющий собой наиболее эффективный метод решения нелинейных оптимизационных задач с ограничениями.

Стремление применять трехмерные аэродинамические модели расчета при оптимизации турбомашин неизбежно приводит к необходимости использования все более мощной вычислительной техники. Общей тенденцией является также распараллеливание вычислений на многопроцессорных или кластерных платформах. Примером подобной реализации является система DAKOTA [27], которая предоставляет гибкий интерфейс между кодами анализа и методами итерационного поиска экстремума. В статье приводятся примеры использования системы на суперкомпьютере TeraFLOPS содержащем более 9000 процессоров Intel Pentium Pro (около 1.8 триллионов операций с плавающей точкой в секунду).

В работе [28] для анализа пленочного охлаждения использовался суперкомпьютер Blue Horizon с 256 параллельно работающими процессорами. На сетке из 1.3 млн. элементов расчет занял 1200 часов процессорного времени.

В статье [14] для расчета оптимальной сверхзвуковой решетки с использованием генетического алгоритма на 64-процессорном компьютере SGI Origin2000 потребовалось 7 часов для расчета одной точки или 1550 часов для всего цикла оптимизации.

На фоне приведенных цифр данные некоторых других работ [17], в которых декларируется возможность решения задач оптимизации на трехмерных моделях с использованием рядовых персональных компьютеров, выглядят, по меньшей мере, чересчур оптимистично.

Необходимое программное обеспечение для проведения оптимизационных расчетов элементов проточной части турбомашин включает аэродинамические и другие солверы, построители сетки, блоки оптимизации и вспомогательные программ (пре- и постпроцессоры, программы поддержки параллельных вычислений и пр.).

Аэродинамические решатели выбираются из числа коммерческих программ, таких как Fluent, CFX и др., фирменных программ USM3Dns, TRAF3D (NASA), ITSM3D (Siemens), Stage3D (Alstom), TLNS3D-MB (Renault), EULER3D (General Electric), S3D. Используются также решатели университетских разработок и отдельных специалистов, например, Cobalt [29]. Особо следует отметить отечественные разработки – программы FlowER – рехмерный аэродинамический солвер и FlowER-Optimus – комплекс для решения задач оптимизации турбомашин [4].

Важным элементом системы оптимизации являются построители сеток для параметризованных тем или иным образом конструкций проточной части турбомашин. Зависимость построителей сеток от особенностей решателей является причиной использования во многих случаях построителей, жестко привязанных к конкретным решателям (например, Gambit+Fluent, TurboGrid+CFX TascFlow, VGRIDns+USM3Dns и др.). Из специализированных программ такого рода заслуживает внимания PADRAM фирмы Rolls-Royce – генератор структурированных 2-х и 3-хмерных сеток для решения задач расчета и оптимизации турбомашин [30].

Примером развитой системы программ поддержки оптимизации турбомашин является SOFT (Smart Optimisation for Turbomachinery) фирмы Rolls-Royce, которая включает в себя различные пре- и постпроцессоры, генераторы сетки и другие программы собственной разработки [31].

Как уже указывалось, в программах поиска оптимального решения недостатка не ощущается: это коммерческие продукты, фирменные разработки, программы отдельных авторов и даже многочисленные свободные реализации, исходные тексты которых можно найти в Интернет. В последнее время большой популярностью пользуется пакет iSIGHT, фирмы Engineous [26], который используется многими крупными фирмами, в том числе и General Electric [32].

На основании проведенного литературного обзора можно сделать следующие выводы:

1. Начатые в свое время в Советском Союзе работы по оптимальному проектированию проточной части осевых турбин и полученные результаты не только не потеряли своей актуальности, но в настоящее время широко развиваются. Оптимизация проточных частей турбомашин является приоритетным направлением научно-исследовательских разработок ведущих зарубежных фирм и университетов. Без использования аппарата оптимизации невозможно говорить о прогрессе в области создания высокоэффективных проточных частей турбомашин, конкурентных на мировом рынке.

2. Проектирование турбоустановки, как сложной технической системы, представляет собой многоуровневый процесс оптимизации. Каждый из уровней характеризуется только ему свойственными моделями и, как следствие, применяемыми методами оптимизации. Все более широко применяются мультидисциплинарный анализ и мультидисциплинарная оптимизация.

3. Используемые методы оптимизации должны выбираться в зависимости от постановки оптимизационной задачи. Для гладких функций целесообразнее применять методы планирования эксперимента, для функций общего вида следует использовать разновидности случайного поиска (например, генетические алгоритмы).

4. Наличие коммерческих программ по расчетам трехмерного структурного анализа, вычислительной аэродинамики, прикладных и специализированных оптимизационных пакетов приводит к выводу о целесообразности создания с их использованием программной среды, позволяющей организовать процесс поиска оптимального решения. Эта задача весьма сложная и в зависимости от области применения требует разработки специализированных модулей, которые должны включать процедуры параметризации объекта проектирования, пре- и постпроцессоров для обмена данными между коммерческими программами (солверами или решателями) и, возможно, специализированные построители (генераторы) сеток.

5. Бурное развитие трехмерных методов аэродинамического расчета заметно опережает их экспериментальную проверку. Причем, нередко высказывается недостаточно обоснованный тезис о возможности уже сегодня полной замены физического эксперимента вычислительным. Такое заключение представляется преждевременным.

6. Развитие разработок в области оптимального проектирования турбомашин требует значительных затрат на приобретение вычислительной техники и программного обеспечения, а также объединения усилий специалистов в различных областях знаний (турбиностроение, аэродинамика, структурный анализ, вычислительная техника и др.).

Литература

1. Бойко А.В. Оптимальное проектирование проточной части осевых турбин. Харьков: Вища школа, 1982. – 150 с.
2. Шубенко-Шубин Л.А., Стоянов Ф.А. Автоматизированное проектирование лопаточных аппаратов тепловых турбин. Л.: Машиностроение, 1984. – 236 с.
3. А.В.Бойко, А.В.Гаркуша. Аэродинамика проточной части паровых и газовых турбин: расчеты, исследования, оптимизация, проектирование. Харьков, ХГПУ, 1999. - 390 с.
4. А.В.Бойко, Ю.Н.Говорущенко, С.В.Ершов, А.В.Русанов, С.Д.Северин. Аэродинамический расчет и оптимальное проектирование проточной части турбомашин. Харьков, НТУ «ХПИ», 2002. – 356 с.
5. J. Sobieszczanski-Sobieski, R. T. Haftka. Multidisciplinary Aerospace Design Optimization: Survey Of Recent Developments.
6. Shahpar, S., 2001, «Three-dimensional Design and Optimisation of Turbomachinery Blades using the Navier-Stokes Equations», ISABE 2001-1053, proceedings of 15<sup>th</sup> ISABE conference, Bangalore, India.
7. Ершов С.В. Частное сообщение.
8. Rolf Dornberger, Dirk Büche, Peter Stoll. Multidisciplinary Optimization In Turbomachinery Design. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS 2000 Barcelona, 11-14 September 2000.
9. Rolf Dornberger, Peter Stoll and Dirk Büche, Multidisciplinary Turbomachinery Blade Design. Optimization, 38th AIAA Aerospace Science Meeting, Reno, 2000.
10. Harvey, N.W., Rose, M.G., Taylor, M.D., Shahpar, S. and Gregory-Smith, D.G., 2000, «Nonaxisymmetric Turbine Endwall Design, Part I-3D Linear Design system», Journal of Turbomachinery, 122, number 2, pp. 286-294.
11. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование, Пер. с англ. М.: Мир. 1975.- 535 с.
12. T. Rogalsky, R. W. Derksen, S. Kocabiyik. Differential Evolution in Aerodynamic Optimization.
13. David E. Goldberg. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
14. Akira Oyama, Meng, Sing Liou, Shigeru Obayashi. Transonic Axial-flow Blade Shape Optimization Using Evolutionary Algorithm and Three-dimensional Navier-Stokes solver. AIAA 2002-5642
15. Akira Oyama, Meng-Sing Liou. Multiobjective optimization of a multi-stage Compressor using evolutionary algorithm. AIAA 2002-3535.
16. George S. Dulikravich, Brian H. Dennis, Thomas J. Martin, Igor N. Egorov Multi-Disciplinary Analysis And Design Optimization. Brazilian Congress on Applied and Computational Mathematics, Sept. 10-13, 2001, Belo Horizonte, Brazil.
17. Чупин П.В., Карелин Д.В., Старков Р.Ю., Шмотин Ю.Н., Ершов С.В., Русанов А.В. Оптимизация ступени турбины ГТД с использованием программ FLOWER-Optimus и TASCflow. В сб. Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования. Харьков, 2003, с.193-197.
18. Hou, G.J.-W., Taylor, A.C., Korivi, V.M., Discrete Shape Sensitivity Equations for Aerodynamic Problems, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 37, 1994, pp. 2251-2266.

19. Newman, J.C., Taylor, A.C., Three-Dimensional Aerodynamic Shape Sensitivity Analysis and Design Optimization Using the Euler Equations on Unstructured Grids, AIAA Paper 96-2464, June 1996.
20. S.Kammerer and J. F. Mayer M. Paffrath and U. Wever A. R. Jung. Three-dimensional optimization of turbomachinery bladings using Sensitivity analysis. Proceedings of ASME Turbo Expo 2003 Power for Land, Sea, and Air. June 16–19, 2003, Atlanta, Georgia, USA.
21. Nilay Papila, Wei Shyy, Lisa Griffin, Daniel J. Dorney. Shape optimization of supersonic turbines using global approximation methods.
22. Serhat Hosder, Layne E. Watson, Bernard Grossman, William H. Mason, Hongman Kim Raphael T. Haftka, Steven E. Cox. Polynomial Response Surface Approximations for the Multidisciplinary Design Optimization of a High Speed Civil Transport.
23. Melih Papila, Nilay U. Papila, Wei Shyy, Raphael T. Haftka, Norman Fitz-Coy Error-Based Design Space Windowing. AIAA 2002-0539.
24. Synaps Epoxy. Advanced Computer-Aided Exploration Software for Engineers
25. Egorov I. N. Indirect Optimization Method on the Basis of Self-Organization, Curtin University of Technology, Perth, Australia., Optimization Techniques and Applications (ICOTA'98), Vol.2, pp. 683-691. 1998.
26. R. Tappeta, S. Nagendra, J.E. Renaud, K. Badhrinath. Concurrent Sub-Space Optimization (CSSO) MDO Algorithms in iSIGHT. CSSO in iSIGHT: Validation and Testing.
27. M.S. Eldred, W.E. Hart. Design and implementation of multilevel parallel optimization on the intel teraflops. AIAA-98-4707.
28. Subrata Roy, Sagar Kapadia James D. Heidmann. Film Cooling Analysis Using Des Turbulence Model. Proceedings of ASME Turbo Expo 2003. Power for Land, Sea, and Air. June 16–19, 2003, Atlanta, Georgia, USA.
29. Strang, W. Z., Tomaro, R. F., and Grismer, M. J., 1999, The Defining Methods of Cobalt60 : A Parallel, Implicit, Unstructured Euler/Navier-Stokes Flow Solver. AIAA Paper 99-16635.
30. Shahrokh Shahpar, Leigh Lapworth Padram: Parametric Design And Rapid Meshing System For Turbomachinery Optimisation. Proceedings of ASME Turbo Expo. 2003 June 16–19, 2003, Atlanta, Georgia, USA.
31. Shahrokh Shahpar, David Giacche , Leigh Lapworth. Multi-objective design and optimisation of bypass outlet-guide Vanes. Proceedings of ASME Turbo Expo 2003 June 6–19, 2003, Atlanta, Georgia, USA.
32. John I. Cofer, IV, John K. Reinker, William J. Sumner. Advances in Steam Path Technology. GE Power Generation, GER-3713E.