

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО СОЧЕТАНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАДИАЛЬНОЙ ТУРБИНЫ С УЧЕТОМ ПРОЧНОСТНЫХ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ДРУГИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

© 2011 О. В. Батулин, Л. С. Шаблей

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

В работе описывается алгоритм, позволяющий быстро и наглядно найти сочетание основных переменных, определяющих рабочий процесс турбины, позволяющий достигнуть высокого значения КПД с учетом конструктивных, прочностных и других ограничений.

Радиально-осевая турбина, исходные данные, алгоритм, параметр нагруженности, относительный диаметр, степень реактивности.

Газодинамическое проектирование турбины проводится для того, чтобы найти такие ее геометрические и кинематические параметры, при которых достигаются заданная мощность или КПД при минимальных габаритах, массе, стоимости, а также обеспечиваются высокая эффективность ее работы и надежность в течение заданного ресурса.

Исходные данные для проектирования турбин можно условно разделить на три группы:

- Первая группа – основные исходные данные, такие как полные температура T_{ex}^* и давление p_{ex}^* на входе в турбину, статическое давление на выходе $p_{вых}$, частота вращения ротора n , расход рабочего тела G_{ex} и т.п. Они в основном принимаются по результатам термодинамического расчета установки, в состав которой входит турбина. Часть основных исходных данных (например, частота вращения ротора n), может приниматься по результатам газодинамического проектирования компрессора, для привода которого проектируется турбина, либо определяться частотой вращения приводимого агрегата.

- Вторая группа исходных данных – свойства рабочего тела. К ним относятся в первую очередь изобарная теплоемкость c_p и показатель изэнтропы k . Свойства рабочего тела существенным образом зависят от его температуры, что, по возможности, следует учитывать при расчете.

- Третья группа – параметры, определяющие рабочий процесс непосредственно в турбине.

Рабочий процесс и геометрия турбины любого типа полностью определяется пятью

независимыми переменными: первая из них определяет окружную скорость u , вторая – распределение работ расширения между рабочим колесом (РК) и сопловым аппаратом (СА), третья определяет высоту лопатки на входе в РК, четвертая – высоту лопатки на выходе из РК, пятая – взаимное расположение входного и выходного сечений. В качестве данных переменных могут привлекаться различные размерные и безразмерные параметры.

В отечественной практике проектирования радиальных турбин наиболее часто применяется следующее сочетание переменных: параметр нагруженности $Y_m = u_1/c_s$, степень реактивности p_{ct} , угол потока на входе в РК в абсолютном движении α_1 и в относительном движении на выходе из него β_2 , относительный диаметр выходного сечения $\mu = D_2/D_1$. Все остальные переменные, необходимые для проектного расчета турбины, включая коэффициенты скорости в СА и РК φ_{ca} и $\psi_{рк}$, прямо или косвенно зависят от упомянутых выше пяти независимых переменных.

Последняя группа исходных данных является наиболее важной, поскольку она полностью определяет геометрию турбины (а следовательно её конструкцию, технологичность, напряженно-деформированное состояние и т.п.) и её рабочий процесс, работу (мощность) и КПД. При этом упомянутые пять переменных являются полностью независимыми и их выбор всецело лежит на проектировщике.

Таким образом, задача инженера на первом этапе проектирования турбины со-

стоит в рациональном выборе сочетания пяти основных независимых переменных, определяющих рабочий процесс турбины, которое позволит получить требуемую мощность при ее высоком уровне КПД. При этом турбина должна удовлетворять всем конструкционным, прочностным, технологическим и другим ограничениям. Поэтому процесс поиска рационального сочетания базовых переменных является чрезвычайно важным и нетривиальным. Он осложняется большим числом переменных и их взаимной зависимостью.

При первоначальном выборе исходных данных следует помнить, что в первом приближении их выбор весьма приблизителен и не является окончательным. Они могут быть многократно уточнены в ходе проектирования по результатам аэродинамического, гидравлического, прочностного, экономического расчетов, проработки конструкции и технологии изготовления элементов. По этой причине газодинамические расчеты турбины могут многократно уточняться с учетом результатов последующих расчетов и ограничений, что может потребовать значительного времени и материальных затрат.

С проблемой выбора параметров, определяющих рабочий процесс турбины в условиях большого количества геометрических, прочностных и других ограничений авторы статьи столкнулись при проектировании радиальной турбины регистровой системы наддува дизеля Д21-26ДГ в рамках выполнения договора с ОАО «Пензадизельмаш».

Для упрощения и повышения качества выбора важнейших переменных, а также отсеечения заведомо «непроходных» по разным критериям вариантов, был разработан алгоритм, позволяющий найти рациональное, с точки зрения достижения максимального КПД при существующих технологических и прочностных ограничениях, сочетание основных параметров рабочего процесса турбины, таких как параметр нагруженности $Y_m = u_1/c_s$, степень реактивности ρ_{cm} , угол потока на входе в РК в абсолютном движении α_1 и в относительном движении на выходе из него β_2 , относительный диаметр μ . Следует подчеркнуть, что созданный алгоритм является универсальным, и аналогичным образом можно искать сочетание любых других переменных (не обязательно

но именно указанных выше), определяющих рабочий процесс турбины.

Алгоритм базируется на методике газодинамического проектирования турбины по среднему диаметру и состоит из двух этапов.

На первом выбираются значения параметра нагруженности $Y_m = u_1/c_s$ и степени реактивности ρ_{cm} , позволяющие получить высокий КПД при существующих прочностных, технологических и других ограничениях. Выбор именно этих переменных для определения в первую очередь обусловлен тем, что они меняются в наиболее широких диапазонах.

На втором этапе выбирается значение относительного диаметра μ и уточняются другие предварительно выбранные исходные данные.

Выбор значений параметра нагруженности $Y_m = u_1/c_s$ и степени реактивности ρ_{cm} производится в следующей последовательности:

1. Выбираются значения коэффициентов скорости во входной системе и РК φ_{ca} и ψ_{pk} из рекомендованных диапазонов.

2. Из рекомендованных диапазонов выбираются значения углов потока на входе в РК в абсолютном движении α_1 и в относительном движении на выходе из него β_2 . Например, при проектировании турбины для регистровой системы наддува дизеля Д21-26ДГ были приняты следующие значения: $\alpha_1 = 16^\circ$ и $\beta_2 = 32^\circ$.

3. Выбирается значение относительного диаметра μ в первом приближении из середины рекомендованного диапазона.

4. Выбираются диапазоны изменения степени реактивности ρ_{cm} и параметра нагруженности $Y_m = u_1/c_s$. Для радиально-осевой турбины ρ_{cm} обычно находится в интервале 0,4...0,55, а $Y_m = u_1/c_s$ – в интервале 0,65...0,75. В каждом диапазоне выбирается по m и n степени реактивности и параметра нагруженности переменной соответственно. Определяются значение КПД η_u при данном сочетании основных переменных, а также остальные геометрические и кинематические параметры турбины. Аналогичная серия расчетов проводится для оставшихся $m-1$ значений степени реактивности ρ_{cm} .

5. На основании полученных данных строится диаграмма $\eta_u=f(\rho_{cm}; u_1/c_s)$. Вид зависимости, полученный для турбины регистровой системы наддува дизеля Д21-26ДГ, при использовании исходных данных, упомянутых выше, приведен на рис. 1. Данная диаграмма была построена с помощью специально написанной инженером каф. ТДЛА СГАУ Шаблием Л.С. подпрограммы. Как видно из рис.1, линии постоянства КПД $\eta_u=const$ на диаграмме образуют концентрические замкнутые фигуры, близкие к овальной форме, четко указывая на область высокой эффективности. Диаграммы $\eta_u=f(\rho_{cm}; u_1/c_s)$, построенные для других значений относительного диаметра μ качественно не отличаются от полученной ранее.

6. На диаграмме наносятся линии, ограничивающие области, существование турбин в которых невозможно по прочностным, технологическим и другим соотношениям. Рекомендуется установить следующие ограничения:

а) По условиям прочности ограничивается величина относительной высоты лопатки на входе b_1/D_1 . Она не должна превышать значения 0,15.

б) По условиям прочности и размещения лопаток в выходной части диска ограничивается величина относительного диаметра втулки РК на выходе $D_{втул} = D_{2втул} / D_{2к}$. Его величина должна быть не меньше, чем $D_{втул} = 0,2 \dots 0,3$.

в) Из условия достижения максимального КПД отношение c_{1r}/c_{2a} должно находиться в интервале 0,7...1,2.

г) Если в соответствии с заданием на проектирование существует необходимость обеспечить какие-либо размеры, вводится ограничение на величину наружного диаметра РК. В частности, для того, чтобы обеспечить геометрические требования, предъявленные при проектировании турбины для регистровой системы наддува дизеля Д21-26ДГ, было введено ограничение $D_1 < 236$ мм.

При необходимости список ограничений может быть скорректирован или дополнен.

Указанные ограничения наносятся на диаграмму $\eta_u=f(\rho_{cm}; u_1/c_s)$, практически однозначно определяют значения степени реактивности и параметра нагруженности, позволяющие получить высокий КПД при существующих ограничениях (рис. 1).

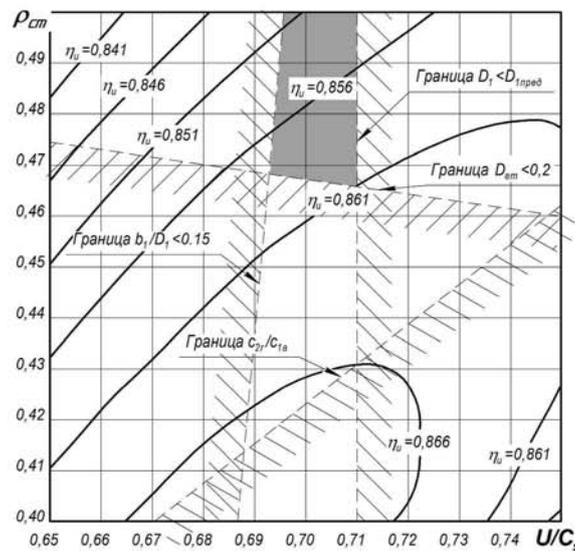


Рис. 1. Зависимость $\eta_u=f(\rho_{cm}; u_1/c_s)$, полученная для турбины для регистровой системы наддува дизеля Д21-26ДГ

Например, из рис. 1 видно, что оптимальное, с точки зрения достижения максимального значения КПД при имеющихся ограничениях значение параметра нагруженности находится в интервале 0,695...0,71, а значение степени реактивности превышает 0,47. При этом видно, что КПД турбины из-

за существующих ограничений не может быть выше, чем 0,861. Основываясь на этих данных, при проектировании турбины для регистровой системы наддува дизеля Д21-26ДГ были приняты следующие значения основных параметров: $u_1/c_s=0,7$; $\rho_{cm}=0,48$.

На следующем этапе при принятых значениях основных параметров рабочего процесса проводится выбор величины относительного диаметра μ . Со снижением этой величины КПД турбины возрастает, но, с другой стороны, уменьшается величина относительного диаметра втулки РК на выходе $D_{\text{втул.}}^{\text{отн.}}$. Поэтому данный этап сводится к поиску такого значения μ , который обеспечит приемлемое значение $D_{\text{втул.}}^{\text{отн.}}$. На этом этапе также следует уточнить значение угла потока на входе в РК в относительном движении β_1 и угла выхода из РК в абсолютном движении α_2 . Следует стремиться, чтобы величина α_2 находилась в интервале 80...120° (следует стремиться, чтобы α_2 было макси-

мально приближено к 90°), а величина β_1 находилась в интервале 100...120°. Последнее решение позволит выполнить рабочие лопатки на входе радиальными, что благоприятно скажется на их прочности и технологичности. Для достижения указанных ограничений, а также повышения КПД возможна коррекция коэффициентов скорости и углов потока на входе в РК в абсолютном движении α_1 и в относительном движении на выходе из него β_2 .

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

DETERMINATION OF A RATIONAL COMBINATION OF THE RADIAL TURBINE BASIC PARAMETERS WITH AN ALLOWANCE FOR STRENGTH, TECHNOLOGICAL AND OTHER CONSTRAINTS

© 2011 O. V. Baturin, L. S. Shabliy

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The paper describes an algorithm allowing to find quickly and intuitively the combination of the main variables that determine the turbine workflows, allowing to achieve high efficiency values with an allowance for the structural, strength and other restrictions.

Radial turbine, initial values, algorithm, loading parameter, relative diameter, degree of reaction.

Информация об авторах

Батурин Олег Витальевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: +7 905-303-90-90. E-mail: oleg.v.baturin@gmail.com. Область научных интересов: рабочие процессы в лопаточных машинах, вычислительная газовая динамика, агрегаты наддува ДВС.

Шаблий Леонид Сергеевич, инженер кафедры теории двигателей летательных аппаратов, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-45-94. E-mail: shelbi-gt500@mail.ru. Область научных интересов: лопаточные машины, турбоприводы, их выходные устройства, численные методы расчёта, гидрогазодинамика, программирование.

Baturin Oleg Vitalievich, Candidate of Technical Sciences, associate professor of the chair of theory of engine for flying vehicle, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: oleg.v.baturin@gmail.com. Area of research: workflows in turbomachines, computational fluid dynamics, turbocharger.

Shabliy Leonid Sergeevich, Engineer of aircraft engines theory department, post-graduate, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-45-94. E-mail: shelbi-gt500@mail.ru. Area of research: blade machines, turbo-drives, turbo-machines nozzles, hydro-gas-dynamic, numerical calculations, programming.