

УДК 621.165

К вопросу термогазодинамического расчета проточной части турбины по средней линии тока

Жариков Артем Андреевич

artemzhrk@gmail.com

Шевелев Денис Владимирович

denis.v.shevelev@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Процесс проектирования паровых турбин достаточно сложен и требует учета различных факторов: конструкторских, прочностных, технологических и экономических. Основой проектирования является термогазодинамический расчет турбины по средней линии тока, который определяет основные геометрические размеры и кинематические параметры потока, а также мощностные и эффективностные показатели турбины и ее ступеней. Данный расчет является базовым для дальнейших подробных вычислений и оптимизации проточной части турбины. Рассматриваются этапы термогазодинамического расчета, начиная с формирования исходных данных, предварительного расчета и расчета по средней линии тока, заканчивая построением 3D-модели ступени и CFD-моделированием, которое позволяет более точно оценить потери энергии в решетках профилей.

Ключевые слова: турбина, проточная часть, методика проектирования, термогазодинамический расчет ступени, потери энергии в решетках профилей

Проектирование паровых турбин является сложной многоуровневой задачей, решение которой требует одновременного учета конструкторских, прочностных, технологических и экономических факторов. Вне зависимости от уровня сложности и многофакторности задач, стоящих перед проектировщиками паровых турбин, их решение начинается с термогазодинамического расчета турбины «по средней линии тока», в ходе которого определяются ключевые геометрические характеристики проточной части, кинематические параметры потока в ключевых сечениях, мощностные параметры и параметры эффективности как отдельных ступеней, так и турбины в целом. Результаты расчета проточной части по средней линии тока ложатся в дальнейшем в основу более детальных конструкторских и газодинамических расчетов, используются при поиске оптимальных решений. В ходе оптимизационных расчетов, термогазодинамический расчет проточной части по средней линии тока выполняется многократно, что делает актуальной задачу создания программных средств и сервисов, автоматизирующих и облегчающих этот этап проектирования турбины, в их основу должны быть положены новейшие достижения в области турбостроения.

Традиционно последовательность термогазодинамического расчета многоступенчатой паровой турбины следующая.

1. На основании термодинамического расчета тепловой схемы ПТУ формируется набор исходных данных для расчета паровой турбины: расход

и параметры пара на входе в турбину, параметры отборов пара, давление в конденсаторе.

2. Предварительный расчет турбины, в ходе которого определяются при заданной частоте вращения ротора: число цилиндров (частей) и количество ступеней на каждый, распределение по ступеням средних диаметров, степеней реактивности, теплоперепадов. Методика предварительного расчета [1] основывается на базовых положениях термодинамики, газодинамики, теории турбомашин и обобщения опыта проектирования и характеристик выполненных конструкций паровых турбин. Предварительный расчет позволяет оценить различные варианты формирования проточной части в первом приближении в зависимости от частоты вращения ротора, формы меридионального сечения проточной части, ключевых геометрических характеристик, например, среднего диаметра первой ступени. Примерный результат выполнения предварительного расчета турбины представлен на рис. 1.

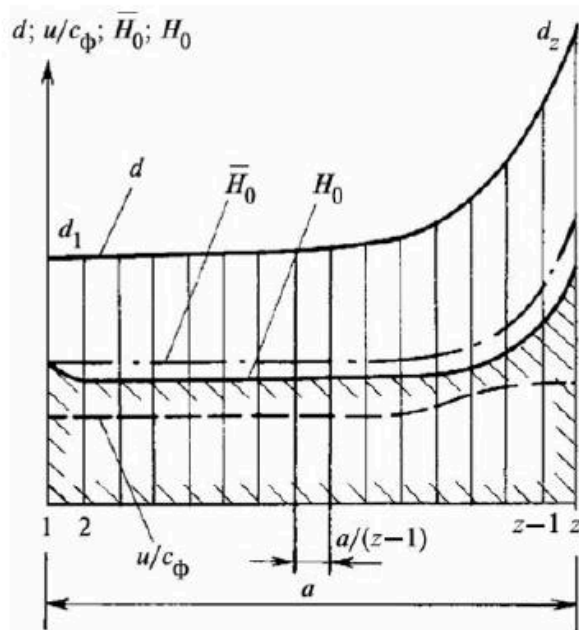


Рис. 1. Диаграмма для определения числа ступеней и распределения теплоперепадов по ступеням

3. Поступенчатый расчет паровой турбины по средней линии тока. Расчет выполняется на основании данных, полученных в ходе предварительного расчета. Каждая последующая ступень считается на основании данных, полученных из расчета предыдущей по ходу рабочего тела. Данный подход, рассматривающий многоступенчатую турбину, как состоящую из одноступенчатых основан еще на идеях Стодолы [2]. В основе расчета лежит изоэнтропная модель расширения рабочего тела в межлопаточных каналах соплового аппарата и рабочего колеса ступени. В настоящее время целесообразно использование не устаревших табличных или графических данных, а аппроксимированных зависимостей свойств воды и водяного пара [3–5]. Учет влияния

потерь на данном этапе достаточно приближенный, так как точную их величину можно получить только в ходе натурного эксперимента [6] или с высокой степенью достоверности оценить с помощью CFD-моделирования [7]. На данном этапе производится детальный расчет термогазодинамических и кинематических параметров потока в характерных сечениях ступени, а также расчет основных геометрических характеристик лопаточных решеток соплового аппарата и рабочего колеса. Методика термогазодинамического расчета ступени широко известна и изложена [8–10]. Ввиду того, что положенная во все вышеуказанные методики изоэнтропная модель расширения газа, физические процессы, термодинамические законы и тригонометрические соотношения одинаковы, отличие заключается только в подходах к оценке и уточнению потерь в лопаточных решетках. Первоначально коэффициенты, характеризующие потери, задаются исходя из опыта проектирования достаточно приближенно, а после определения кинематических параметров потока и геометрических характеристик лопаточных решеток уточняются. Алгоритм расчета ступени иллюстрирует рис. 2.



Рис. 2. Алгоритм расчета ступени по традиционной методике

Подходы к уточнению потерь в ступени различны. Наиболее старый, простой и достаточно достоверный — использование данных, обобщающих результаты экспериментального исследования лопаточных решеток различных типов [11, 12]. Недосток этого метода — ограниченность количества исследованных ступеней, не охватывающих все возможные комбинации гео-

метрических характеристик решеток, возникающих в процессе расчета. Это приводит к необходимости идти на назначение тех или иных углов атаки, снижающих эффективность работы ступени, при этом не учитывается современный опыт проектирования лопаточных решеток.

Второй подход — использование опытных зависимостей, позволяющих учесть те или иные виды потерь в решетках (потери на трение, отрыв потока, кромочные потери, волновые потери) в зависимости от скорости потока, конкретных геометрических характеристик решеток — углов входа и выхода потока, величины хорды, угла установки, высоты лопатки и т. д. Таких данных достаточно много [13–16], они обобщают опыт экспериментаторов различных школ турбостроения, которые не всегда соответствуют друг другу, так как получены в разных условиях, а критерии обобщения недостаточно универсальны.

4. Расчет пространственного течения газа в ступени турбины в соответствии с выбранным законом профилирования и построение профилей плоских сечений лопаточных решеток соплового аппарата и рабочего колеса. Профили лопаток могут выбираться по атласам профилей [11, 12] или строиться по тем или иным методикам [17, 18]. Итогом этого этапа является построение проточной части ступени турбины, образованной лопатками соплового аппарата и рабочего колеса конкретной конфигурации.

Корректность расчета ступени турбины во многом зависит от правильности выбора методики расчета потерь. Как отмечалось выше, результаты расчета потерь по разным методикам могут быть достаточно противоречивы. Построение 3D-модели ступени турбины, по данным полученным на 4 этапе расчета, дает возможность выполнить исследование рабочего процесса ступени турбины методами CFD-моделирования в двумерной или трехмерной постановке. Анализ результатов моделирования даст возможность выбрать из множества методик расчета потерь наиболее подходящую, которая может быть положена в создаваемую компьютерную программу поступенчатого расчета проточной части турбины по средней линии тока.

Литература

- [1] Костюк А.Г., Фролов В.В., Булкин А.Е., Трухний А.Д. *Паровые и газовые турбины для электростанций*. Москва, Издательский дом МЭИ, 2016.
- [2] Стодола А. *Паровые турбины*. Санкт-Петербург, Столичная скоропечатня, 1904, 253 с.
- [3] Александров А.А., Агапова Р.К. Расчет термодинамических свойств воды и водяного пара на ЭЦВМ методом интерполяции. *Теплоэнергетика*, 1972, № 8, с. 83–85.
- [4] REFPROP. *Программа для расчета свойств воды, водяного пара, газов и смесей газов*. URL: <https://www.nist.gov/srd/refprop> (дата обращения 22.04.2024).
- [5] CoolProp. *Программа для расчета свойств воды, водяного пара, газов и смесей газов*. URL: <http://www.coolprop.org/> (дата обращения 22.04.2024).
- [6] Дорфман Л.А. Исследование натурных ступеней паровых турбин с полным и парциальным подводом. *Энергомашиностроение*, 1956, № 10, с. 18–20.
- [7] Amaral L.G.F., Diaz R.B., Tomita J.T. Optimization based on 3D CFD simulations of an axial turbine from a small gas turbine engine. *Aeron Aero Open Access J.*, 2019, vol. 3 (4), pp. 198–211. <https://doi.org/10.15406/aaaj.2019.03.00098>

- [8] Щегляев А.В. *Паровые турбины. Теория теплового процесса и конструкции турбин*. Москва, Энергоатомиздат, 1993, 384 с.
- [9] Шнеэ Я.И. *Теория газовых турбин*. Москва, Машгиз, 1950, 387 с.
- [10] Кириллов И.И., Кантор С.А. *Теория и конструкции паровых турбин*. Москва, Машгиз, 1947.
- [11] Афанасьева Н.Н., Бусурин В.Н., Гоголев И.Г. *Аэродинамические характеристики ступеней тепловых турбин*. Ленинград, Машиностроение, 1980, 263 с.
- [12] Дейч М.Е., Филиппов Г.А., Лазарев Л.Я. *Атлас профилей решеток осевых турбин*. Москва, Машиностроение, 1965.
- [13] Гольцов В.В., Кадетов А.П. Обобщение экспериментальных зависимостей для определения коэффициентов профильных потерь в турбинных решетках. *Сб. тр. ЦИАМ*, 1977, № 786, с. 1–3.
- [14] Дронник Ю.М. Анализ методов расчета профильных потерь в турбинных решетках. *Энергомашиностроение*, 1982, вып. 34, с. 9–14.
- [15] Зысина-Моложен Л.М. *Приближенный метод расчета профильных потерь в решетках*. Москва, Энергия, 1960, с. 48–87.
- [16] Шубенко-Шубин Л.А., Стоянов Ф.А. Об оценке профильных потерь в турбинной решетке, обтекаемой нестационарным потоком. *Энергомашиностроение*, 1972, № 1, с. 24–28.
- [17] Аронов Б.М. *Профилирование лопаток авиационных газовых турбин*. Москва, Машиностроение, 1975, 192 с.
- [18] Шевелев Д.В., Жариков А.А. Использование КОМПАС-3D для параметрического построения профилей рабочих лопаток турбин. *Научно-технологические инновации в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: регион. науч.-техн. конф.: сб. матер.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024, т. 1, с. 176–179.

On the issue of thermogasodynamic calculation of the flow part of the turbine along the middle current line

Zharikov A.A. artemzhrk@gmail.com

Shevelev D.V. denis.v.shevelev@bmstu.ru

BMSTU (KB), Kaluga, Russia

The design process of steam turbines is quite complex and requires consideration of various factors: design, strength, technological and economic. The basis of the design is the thermogasodynamic calculation of the turbine along the mean current line, which determines the basic geometric dimensions and kinematic parameters of the flow, as well as the power and efficiency indicators of the turbine and its stages. This calculation is the basic one for further detailed calculations and optimization of the flow part of the turbine. The stages of thermogasodynamic calculation are considered, starting with the formation of initial data, preliminary calculation and calculation along the average current line, ending with the construction of a 3D model of the stage and CFD modeling, which allows more accurately estimating energy losses in profile grids.

Keywords: turbine, flow part, design methodology, thermogasodynamic calculation of the stage, energy loss in profile grids