



УДК 621.165 001.2

*К.Л. Лапшин***ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК
РЕГУЛИРУЮЩЕЙ СТУПЕНИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ***K.L. Lapshin***GAS-DYNAMIC CALCULATION OF THE CHARACTERISTICS
OF REGULATORY STAGE STEAM TURBINE**

Рассмотрены особенности формирования математических моделей и компьютерных программ, предназначенных для газодинамического расчета характеристик регулирующей ступени паровой турбины. Представлены основные результаты проверочных расчетов регулирующей ступени теплофикационной паровой турбины в широком диапазоне режимов.

ПАРОВАЯ ТУРБИНА. РЕГУЛИРУЮЩАЯ СТУПЕНЬ.

Considered are the peculiarities of creation of mathematical models and computer programs intended for gas-dynamic calculation of characteristics of the stage steam turbine. Main results of test calculations regulatory stage steam turbine in a wide range of modes.

STEAM TURBINE. REGULATORY STAGE.

Современные мощные паровые турбины тепловых электрических станций с сопловым парораспределением обычно в качестве первых имеют регулирующие ступени, работающие в широком диапазоне режимов с переменными параметрами пара за счет его дросселирования в клапанах на входе в сегменты сопел и с переменной степенью парциальности. На этапе проектирования турбины важно иметь возможность выполнить газодинамический расчет характеристик регулирующей ступени в заданном диапазоне режимов.

В последнее время бурное развитие получили трехмерные (3D) методики для расчета потока пара в проточных частях паровых турбин, использующие систему уравнений газовой динамики в форме Навье — Стокса. На основе этих методик можно даже создавать виртуальные стенды для исследования характеристик турбин. Уместно, однако, отметить, что 3D методики пока недостаточно применяются для расчета характеристик парциальных регулирующих ступеней; в основном это связано с необходимостью решать нестационарную задачу, сложностью создания расчетной сетки и трудностями корректной постановкой граничных условий.

Кроме того, такие расчеты требуют значительных вычислительных ресурсов и больших затрат машинного времени, т. е., по существу, являются штучными. Поэтому до сих пор не потеряли своего значения для инженерной практики традиционные одномерные проверочные газодинамические расчеты характеристик регулирующей ступени паровой турбины.

Инженерные одномерные проверочные газодинамические расчеты регулирующей ступени в контрольных сечениях перед и за лопаточными венцами, предназначенные для определения ее характеристик в широком диапазоне режимных параметров, также представляют собой сложную вычислительную задачу. Существенные сверхзвуковые скорости за направляющими лопатками (НЛ) при пропуске пара через один или два клапана и значительные градиенты параметров пара во всей области течения при переменной парциальности осложняют построение устойчивого вычислительного алгоритма, обеспечивающего стабильный процесс сходимости последовательных приближений в расчетных сечениях.

В этой связи целесообразно построить проверочный газодинамический расчет парциальной регулирующей ступени «с хвоста», т. е. от

выходного сечения к входному, против направления движения пара, и применить оригинальные способы достижения сходимости итерационных процессов. В одномерном проверочном расчете используется система уравнений и математическая модель потерь кинетической энергии, изложенные в работах [1, 2]. В монографии [1] представлены результаты экспериментальных исследований профильных потерь в широком диапазоне углов атаки, вторичных потерь, концевых потерь у периферии необандаженных рабочих лопаток, потерь от протечек у корня перед НЛ, через уплотнение диафрагмы и над бандажом РЛ для турбинных ступеней как обычного типа, так и со сниженным градиентом степени реактивности. На основе этих исследований, выполненных в натуральных или в близких к натурным условиям и учитывающих эффекты от неравномерности, нестационарности и турбулентности набегающего на лопаточные венцы потока, сделаны полуэмпирические и эмпирические обобщения, которые составляют основу универсальной методики расчета потерь в проточной части паровой турбины. На основе этой методики разработаны алгоритмы и программы расчета характеристик парциальных ступеней паровых турбин в одномерной постановке задачи. При этом потери, обусловленные наличием парциального подвода пара, вычислялись по методике МЭИ [3]. При формировании математической модели учитывались также результаты экспериментальных исследований парциальных турбинных ступеней, выполненных в БИТМ [4]. В этих опытах было установлено, что при уменьшении степени парциальности уменьшается степень реактивности на активном участке подвода пара. Свойства водяного пара определялись по методике ВТИ.

Для выполнения проверочных газодинамических расчетов регулирующей парциальной ступени паровой турбины в контрольных сечениях перед и за лопаточными венцами в широком диапазоне режимных параметров автором были разработаны математические модели, алгоритмы и программы в среде ТУРБО ПАСКАЛЬ для персонального компьютера.

Программа PARZ1 предназначена для выполнения одномерного проверочного газодинамического расчета регулирующей ступени паровой турбины при условии полного открытия

одного или нескольких регулирующих клапанов при заданных начальных параметрах пара (давление и температура торможения) перед соплами и противодавлении за ступенью. Массовый расход пара через регулируемую ступень определяется в результате расчета.

Программа PARZ2 служит для определения массового расхода пара, протекающего через сегмент сопел с дросселированием пара (или без него) в клапане, при заданных начальных параметрах пара (давлении и температуре торможения) перед соплами и противодавлении за ступенью.

Программа PARZ3 определяет давление торможения пара перед соплами при заданных значениях энтальпии торможения перед соплами, противодавления за ступенью и массового расхода пара.

Комбинация этих программ открывает возможность проверочного газодинамического расчета регулирующей ступени паровой турбины в широком диапазоне режимных параметров.

В качестве объекта расчетных исследований была принята одновенечная регулирующая ступень теплофикационной паровой турбины средней мощности.

На этапе 1 проводились проверочные газодинамические расчеты характеристик регулирующей ступени при полностью открытых одном, двух, трех и четырех клапанах. Для этой цели привлекалась программа PARZ1. Для получения дроссельных характеристик давление и температура торможения перед соплами на всех режимах поддерживались постоянными, а давление в потоке за регулирующей ступенью варьировалось.

Основные результаты расчетов иллюстрируют зависимости массового расхода пара G перед соплами и внутреннего КПД η регулирующей ступени от противодавления p_2 за ступенью (рис. 1).

На рисунке видно, что для всех рассмотренных режимов работы регулирующей ступени точки, соответствующие уровню внутреннего КПД η , удовлетворительно располагаются на одной кривой.

На этапе 2 выполнялись проверочные газодинамические расчеты характеристик регулирующей ступени при дросселировании пара в клапанах. Для этой цели привлекались программы PARZ2 и PARZ3.

Практически последовательность расчетов характеристик регулирующей ступени осуществлялась следующим образом. Сначала по программе PARZ2 выполнялся расчет потока пара от клапана 1. Затем, если работают два клапана, то для расчета потока пара от клапана 2 привлекалась программа PARZ3. Если включены три клапана, то для расчета потоков пара от клапанов 1 и 2 использовалась программа PARZ2, а для расчета потока пара от клапана 3 — программа PARZ3. И, наконец, если включены четыре клапана, то для расчета потоков пара от клапанов 1, 2 и 3 привлекалась программа PARZ2, а для расчета потока пара от клапана 4 — программа PARZ3.

Для определения осредненных показателей регулирующей ступени на переменных режимах с дросселированием применялась программа PARZSUM. Программа PARZSUM предназначена для осреднения потоков пара, когда одна или несколько групп сопел открыты полностью, а перед одной или несколькими группами сопел пар дросселируется, или когда перед всеми включенными группами сопел пар дросселируется. Для вычисления параметров осредненного потока используется система уравнений сохранения массы, импульса и энергии при условии полного смешения потоков пара за ступенью.

Основные результаты выполненных расчетов представлены на рис. 2. На нем выделены режимы, начиная с которых в расчетах

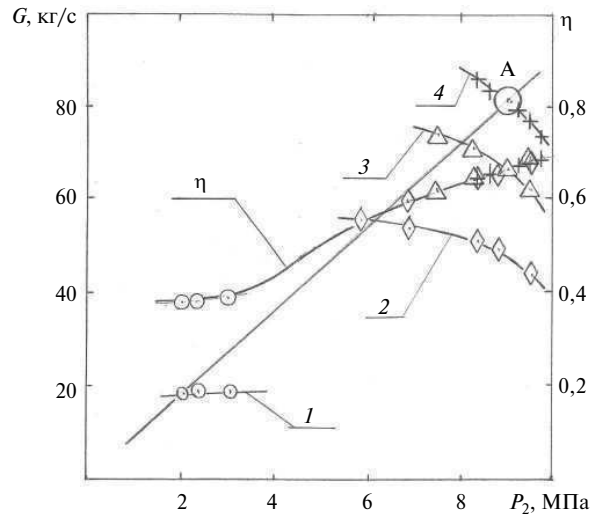


Рис. 1. Дроссельные характеристики регулирующей ступени при разном числе полностью открытых клапанов:
 × — 4 клапана; Δ — 3 клапана; ◇ — 2 клапана;
 ○ — 1 клапан; А — номинальный режим

учитывалось открытие следующего клапана: второго, третьего и четвертого. Естественно, что после открытия клапана внутренний КПД η регулирующей ступени уменьшается, в основном из-за значительного дросселирования пара в открывающемся клапане. При полностью открытых двух, трех и четырех клапанах внутренние КПД практически совпадают с уровнем КПД на режимах с дросселированием (см. рис. 1), хотя и вычислены различными

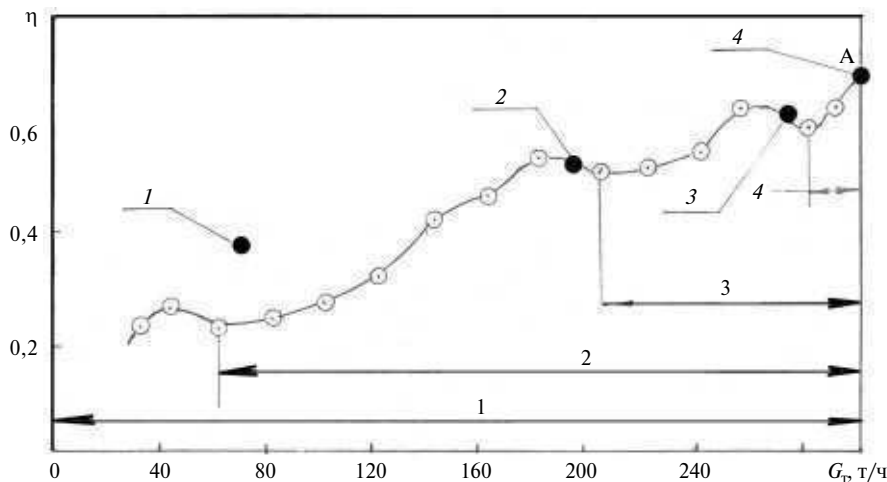


Рис. 2. Зависимость внутреннего КПД η регулирующей ступени от расхода пара G_t на турбину:
 ○ — режимы с дросселированием, ● — клапаны полностью открыты

способами. Полностью открытый клапан 1 развивает более высокий КПД, чем клапаны 1 и 2 при совместной работе со значительным дросселированием. Зато при полностью открытом клапане 1 изгибные напряжения в рабочих лопатках регулирующей ступени достигают максимальных значений.

Выполненные детальные газодинамические расчеты характеристик регулирующей ступени на переменных режимах позволили получить неочевидные результаты. Так, например, в диапазоне массовых расходов пара $G_T = 140-180$ т/ч число Маха за сопловыми лопатками сегмента сопел клапана 2 изменяется в диапазоне $M_{c1} = 1,4-1,5$, а термодинамическая степень реактивности на этом сегменте приобретает глубоко отрицательные значения $\rho_T = -(0,5-0,6)$. Последнее обстоятельство приводит к тому, что давление p_1 перед рабочими лопатками оказывается существенно ниже, чем давление p_2 за ними, что полезно учитывать при расчете осевых усилий, действующих на ротор турбины на режимах дросселирования.

Анализируя результаты проверочных газодинамических расчетов регулирующей ступени

в широком диапазоне режимных параметров, можно сделать следующие выводы:

Внутренний КПД η регулирующей ступени на номинальном режиме, вычисленный двумя различными способами (первый — программой PARZ1 при полностью открытых четырех клапанах, второй — программами PARZ2 и PARZ3 по каждому из клапанов по отдельности с последующим осреднением программой PARZSUM) практически одинаков (см. рис. 1 и 2). Этот расчетный факт указывает на корректность и эффективность методики, развитой для определения характеристик регулирующей ступени паровой турбины в широком диапазоне изменения режимных параметров.

Наибольшие изгибные напряжения в рабочих лопатках регулирующей ступени, как и следовало ожидать, будут возникать на режимах работы с одним и двумя открытыми клапанами.

На режимах расхода пара на турбину от 140 до 180 т/ч на секторе подвода пара от второго клапана давление p_1 перед рабочими лопатками существенно ниже, чем давление p_2 за ними. Это обстоятельство следует учитывать при оценке осевых усилий, действующих в этих режимах на ротор турбины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лапшин, К.Л. Оптимизация проточных частей паровых и газовых турбин [Текст]: Монография / К.Л. Лапшин.— СПб., 2011.— 177 с.
2. Лапшин, К.Л. К расчету осевых тепловых турбин на переменных режимах [Текст] / К.Л. Лапшин, В. Рисс // Теплоэнергетика.— 1992. №5.— С. 64–66.

3. Щегляев, А.В. Паровые турбины [Текст]: Монография / А.В. Щегляев.— М., 1976.— 368 с.
4. Гоголев, И.Г. Аэродинамические факторы и надежность турбомашин [Текст]: Монография / И.Г. Гоголев, А.М. Дроконов, А.Е. Зарянкин.— Брянск, 1993.— 168 с.

REFERENCES

1. Lapshin K.L. Optimization of flowing parts of steam and gas turbines [Text]: Monograph / Kirill L. Lapshin.— SPb., 2011.— 177 s. (rus.)
2. Lapshin K.L., Riss W. To the Calculation of the axial thermal turbine at variable modes [Text // Теплоэнергетика.— 1992. №5.— S. 64–66. (rus.)

3. Sheglaev A.W. Steam turbines [Text]: Monograph.— 1976.— 368 s. (rus.)
4. Gogolev I.G., Drokonov A/M., Zarjankin A.E. Aerodynamic factors and reliability of turbo machines [Text]: Monograph.— Brjansk, 1993.— 168 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

ЛАПШИН Кирилл Леонидович — доктор технических наук профессор кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kirill.lapshin@gmail.com

LAPSHIN Kirill L. — St.Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str,29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kirill.lapshin@gmail.com