

УДК 05.04.00; 05.04.12

doi: 10.18698/0536-1044-2018-12-68-73

К вопросу о рациональном проектировании проточной части низкого давления турбины с отопительным отбором пара

А.А. Сидоров

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана

On the Question of Rational Design of the Low-Pressure Flow Channel of Turbines with Heating Steam Extraction

A.A. Sidorov

Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University

Разработка и производство высокоэффективных турбин различного типа является важной задачей энергомашиностроения. Основным оборудованием теплоэлектростанций Российской Федерации служат паровые турбины с отопительным отбором пара. Проточная часть таких турбин состоит из нескольких частей. Одной из них является часть низкого давления, расположенная за камерой отбора. Ее проектирование представляет собой самостоятельную и сложную задачу. Однако в научной литературе этому вопросу не уделено достаточного внимания. Для проектирования необходимы исходные данные, в том числе расход пара, который неизвестен. В связи с этим рассмотрены варианты конструкции части низкого давления турбины, ориентированные на разные расходы пара. С помощью численного анализа переменных режимов работы вариантов конструкции найден наиболее эффективный из них, а также соответствующий ему расчетный расход пара. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании новых турбин для теплоэлектростанций.

Ключевые слова: паровая турбина, отопительный отбор пара, часть низкого давления, рациональное проектирование, варианты конструкции, численный анализ

The development and production of high-performance turbines of various types is an important task of power engineering. The main equipment of thermal power plants in the Russian Federation are steam turbines with heating steam extraction. The flow channel of such turbines consists of several parts, one of which is a low-pressure section that is located behind the extraction chamber. The design of this section is an independent and complex task. In the literature, this issue is given insufficient attention. Raw data including the steam flow rate, which is unknown, is required for designing the low-pressure section. To address this issue, the design versions of the turbine low-pressure section oriented to different steam flow rates are considered in this article. Using the numerical analysis of variable operating modes of the design versions, the most effective design is selected, and a corresponding calculated steam flow rate is determined. The results of the study can be used for designing new turbines for power plants.

Keywords: steam turbines, heating steam extraction, part of low pressure, rational design, variants construct, numerical analysis

Современные теплоэлектроцентрали служат для снабжения внешних потребителей теплом и электроэнергией. Основное оборудование теплоэлектроцентралей состоит из турбоагрегатов, в которых паровая турбина имеет регулируемые отборы пара. Такие установки в широком диапазоне режимов решают указанную задачу. В качестве примера на рис. 1 на общем виде турбины с отопительным отбором пара показана ее проточная часть.

Как видно из рис. 1, камера отбора делит проточную часть турбины на две части. Расположенная после камеры отбора названа частью низкого давления (ЧНД). Отличительной особенностью работы ЧНД по тепловому графику является переход от режима с полным отопительным отбором пара, который условно назовем «зима», к режиму «лето» с существенно меньшим отбором пара, который сопровождается тем, что через ступени ЧНД протекает разное количество пара.

Очевидно, что в этих случаях коэффициенты полезного действия (КПД) ЧНД турбины также различаются. Абсолютные значения КПД будут определяться мерой отклонения расхода пара через ступени ЧНД от расхода, при котором определена геометрия лопаток этих ступеней. Назовем этот расход оптимальным или расчетным. Возникает вопрос: что есть расчетный расход пара через ЧНД? На этот вопрос ответить просто, если заранее знать, на каком режиме преимущественно будет эксплуатироваться турбина, работающая по тепловому графику.

Однако для случая, когда тепловой график изменяется во времени, в технической литера-

туре существуют разные предложения. Так, в книге [1] рекомендовано проектировать ступени ЧНД для расхода, равного 80 % его максимального значения G_{\max} , при верхнем значении давления в отборе. В публикации [2] предложено использовать в качестве расчетного значения расход пара, составляющий 65 % G_{\max} . В книге [3] выбран конденсационный режим работы турбины с максимальной мощностью.

Следует отметить, что во всех перечисленных случаях рекомендации не подкреплены каким-либо доказательством. Такое разнообразие мнений по данному вопросу в настоящее время нельзя считать нормальным, поскольку назначение расчетного расхода пара определяет геометрию проточной части ЧНД (высоту лопаток), а это уже конструкция, которая в свою очередь определяет эффективность работы турбины.

Для дальнейшего анализа данного вопроса рассмотрим ЧНД теплофикационной турбины Т-48/62-7,4/0,12, работающей в составе парогазовой установки. Номинальная электрическая мощность турбины — 48 МВт, максимальная — 62 МВт, отбор пара на тепловое потребление — 129,8 т/ч (36,05 кг/с), частота вращения — 50 с^{-1} [4].

Все последующие расчеты проведены с ориентацией на номинальную (полную) мощность турбины. В общем случае турбина может иметь множество режимов по отбору пара, причем каждому из них соответствует вполне конкретный пропуск пара в конденсатор (в ЧНД). Выделим два (упомянутых ранее) характерных режима работы турбины по тепловому графику:

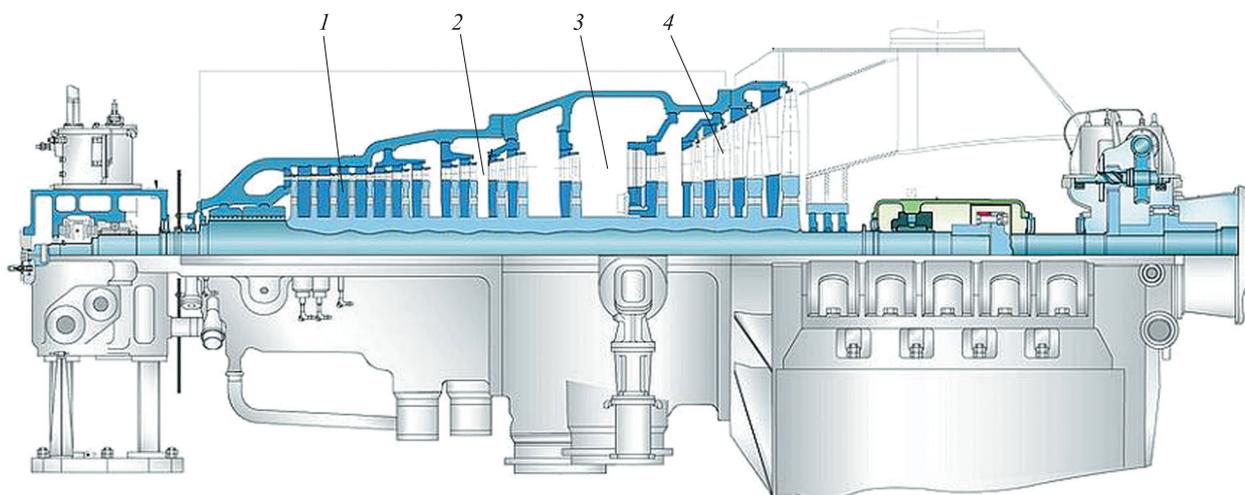


Рис. 1. Общий вид турбины с отопительным отбором пара:

1 — часть высокого давления; 2 — часть среднего давления; 3 — камера отбора; 4 — часть низкого давления

Таблица 1

Исходные данные для расчета вариантов конструкции проточной части ЧНД

Вариант	Расход пара в конденсатор G , кг/с	Средний диаметр ступени № 1, м	Давление на входе в ступень p_0 , МПа	Энтальпия на входе в ступень i_0 , кДж/кг	Теплоперепад ступени H_0 , кДж/кг	Отношение скоростей u/c_ϕ ступени № 1
1	41,0	1,22	0,15	2693	71,56	0,50
2	30,0	1,22	0,12	2683	70,24	0,40
3	19,4	1,22	0,12	2683	69,32	0,51

Примечание: u — окружная скорость; c_ϕ — фиктивная скорость пара на выходе из сопла.

с минимальным («зима») и с максимальным («лето») пропуском пара в ЧНД. Следует отметить, что режим «лето» требует повышения давления в камере отбора. В дальнейшем будем его называть конденсационным режимом работы турбины с полной мощностью.

Оба режима можно проиллюстрировать с помощью диаграммы [1, 3]. Так как расчетные характеристики турбины известны, вычислим значения расхода в конденсатор для указанных режимов, используя формулы, приведенные в книге [1]. Результаты расчета показали, что на режиме «зима» расход пара в конденсатор $G = 19,4$ кг/с, а на режиме «лето» $G = 41,0$ кг/с. Эти значения определяют диапазон пропусков пара в конденсатор при работе турбины по тепловому графику.

Выясним, как должна быть построена ЧНД турбины, чтобы работать в этом диапазоне наиболее эффективно. Для решения вопроса о расчетном для ЧНД пропуске пара спроектируем три независимых варианта конструкции этой части турбины для расхода пара: $G = 19,4$, $30,0$ и $41,0$ кг/с. Расход пара $G = 30,0$ кг/с принят произвольно как один из возможных. Достаточно большая разница в значениях расхода пара нужна для получения различий проходных сечений ступеней ЧНД.

Далее задаемся исходными данными для расчета трех вариантов конструкции проточной части ЧНД, часть которых приведена в табл. 1.

Расчет геометрии ЧНД выполнен по программам, рекомендованным в работе [5]. Полученные расчетные параметры вариантов проточной части ЧНД приведены в табл. 2.

Как и ожидалось, результаты расчета показали, что изменение расхода пара влияет на высоту лопаток, число ступеней и КПД ЧНД. При проектировании вариантов ЧНД учитывались общие рекомендации, приведенные в работах [6–10, 14].

Для выбора наиболее эффективной конструкции ЧНД турбины проведены численные исследования полученных вариантов ЧНД при частичных режимах по расходу пара. Отметим, что расходы пара в конденсатор, приведенные в табл. 2, являются частичными для одной проточной части ЧНД. Если проточных частей несколько (в данном случае три), то для них каждый из этих расходов пара является расчетным.

Отсюда следует, что найденные варианты должны быть исследованы для расходов пара, отличных от расчетного значения. Например, ЧНД, спроектированную для расхода пара $30,0$ кг/с, рассчитывали на пропуск пара $19,4$ и $41,0$ кг/с. Исследования при пониженных нагрузках проведены по программам [11], а при повышенных — согласно методике [9] и рекомендациям [12, 13 15].

Результаты расчета представлены на рис. 2, где видно, что во всем диапазоне расходов пара, характерных для ЧНД турбины, наибольшей

Таблица 2

Расчетные параметры вариантов конструкции проточной части ЧНД

Вариант	Расход пара в конденсатор G , кг/с	Число ступеней	Размеры последней ступени, м		Внутренний относительный КПД ЧНД
			Диаметр D	Высота L	
1	41,0	5	1,712	0,578	0,83
2	30,0	6	1,513	0,434	0,81
3	19,4	7	1,603	0,501	0,79

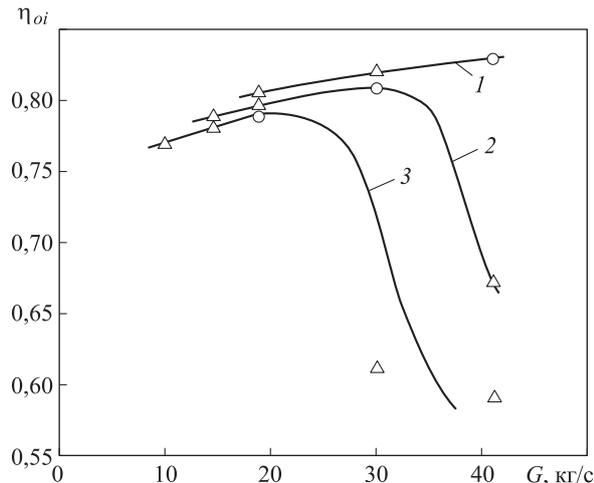


Рис. 2. Зависимость КПД вариантов проточных частей ЧНД от расхода пара:

1 — режим «лето»; 2 — промежуточный режим; 3 — режим «зима»; ○ — расчетные режимы: $G = 41,0$ (1), $30,0$ (2) и $19,4$ (3) кг/с; △ — нерасчетные режимы

эффективностью обладает вариант, спроектированный для режима «лето» (кривая 1). Остальные варианты проточной части ЧНД имеют меньшие КПД, особенно при работе на повышенных нагрузках.

Предложенный общий подход к проектированию ЧНД турбин с отопительным отбором пара нуждается в проверке. В рассматриваемом случае такой проверкой может быть сравнение проточной части ЧНД турбины Т-48/62-7,4/0,12

с расчетным вариантом ЧНД, полученным в режиме «лето». Сравнение показало практически полное соответствие проточных частей по числу ступеней и высоте лопаток. Это свидетельствует о правильности решения задачи.

На рис. 3 приведена схема наиболее эффективной проточной части ЧНД турбины, найденной при сравнении вариантов расчета.

Следует отметить, что полученный результат не учитывает присущей всем теплофикационным турбинам особенности, заключающейся в том, что конденсационный расход пара при их полной мощности вызывает некоторое повышение давления в конденсаторе. С учетом указанной особенности лопатки последней ступени можно сделать короче. Это приведет, с одной стороны, к удешевлению конструкции турбины, а с другой — к уменьшению эффективности ЧНД при переменных режимах вследствие увеличения потерь с выходной скоростью. Таким образом, выбор длины лопаток последней ступени становится предметом технико-экономического обоснования.

Выводы

1. Анализ результатов расчета показал, что если турбина работает в широком диапазоне тепловых нагрузок, то проточную часть ЧНД

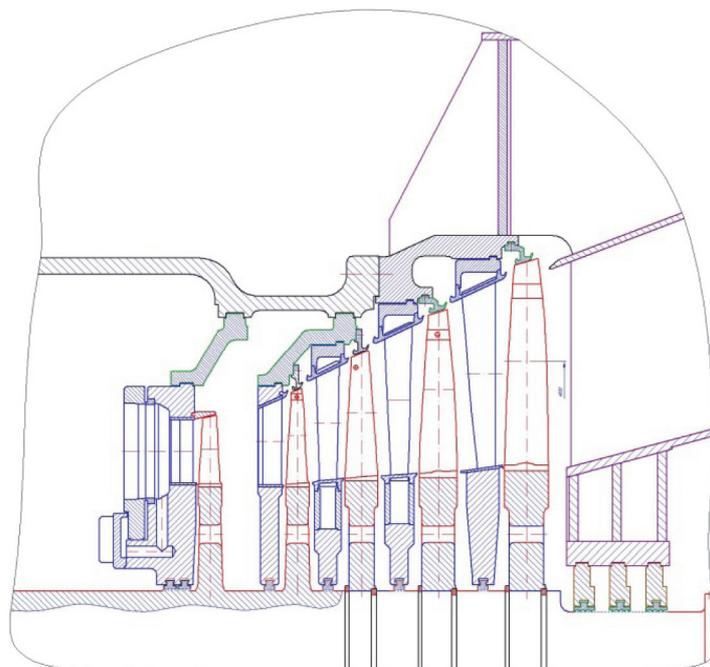


Рис. 3. Схема наиболее эффективной проточной части ЧНД турбины ($G = 41,0$ кг/с)

выгоднее проектировать для конденсационного расхода пара при полной мощности турбины.

2. Проточная часть ЧНД с большими проходными сечениями (с относительно высокими

соплами) лучше приспособлена к нерасчетной нагрузке, так как имеет более высокие КПД при всех режимах.

Литература

- [1] Щегляев А.В. *Паровые турбины*. Кн. 1, кн. 2. Москва, Энергоатомиздат, 1993. 796 с.
- [2] Кириллов И.И., Иванов В.А., Кириллов А.И. *Паровые турбины и паротурбинные установки*. Ленинград, Машиностроение, 1978. 276 с.
- [3] Бененсон Е.И., Иоффе Л.С. *Теплофикационные паровые турбины*. Москва, Энергоатомиздат, 1986. 264 с.
- [4] *Паровые турбины и турбоустановки*. ОАО «Калужский турбинный завод». URL: www.aoaktz.ru (дата обращения 2 сентября 2018).
- [5] Жинов А.А. *Комплекс программ для расчета осевой паровой турбины по среднему диаметру*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 20 с.
- [6] Елисеев Ю.С., Манушин Э.А., Осипов М.И. *Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 640 с.
- [7] Трухний А.Д., Крупенников Б.И., Петрунин С.В. *Атлас конструкций деталей турбин*. Москва, Издание МЭИ, 2000. 148 с.
- [8] Трухний А.Д., Ломакин Б.В. *Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки*. Москва, Издание МЭИ, 2002. 539 с.
- [9] Костюк А.Г., Фролов В.В., Булкин А.Е., Трухний А.Д. *Турбины тепловых и атомных электростанций*. Москва, Изд-во МЭИ, 2001. 488 с.
- [10] Булкин А.Е., Костюк А.Г., Трухний А.Д., Фролов В.В. *Паровые и газовые турбины для электростанций*. Москва, Издательский дом МЭИ, 2016. 557 с.
- [11] Жинов А.А. *Расчет ступеней давления паровой турбины на переменном режиме*. Калуга, КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 7 с.
- [12] Касилов В.Ф. *Переменные режимы эксплуатации паровых турбин энергоблоков ТЭС*. URL: <http://5fan.ru/wievjob.php?id=1092> (дата обращения 10 сентября 2018).
- [13] Сахаров А.М. *Тепловые испытания паровых турбин*. Москва, Энергоатомиздат, 1990. 233 с.
- [14] Трухний А.Д., Поваров О.А., Изюмов М.А., Малышенко С.П. *Основы современной энергетики. Т. 1. Современная теплоэнергетика*. Москва, Издательский дом МЭИ, 2010. 493 с.
- [15] Бойко Е.А., Баженов К.В., Грачев П.А. *Тепловые электрические станции (Паротурбинные энергетические установки ТЭС)*. Красноярск, ИПЦ КГТУ, 2006. 153 с.

References

- [1] Shcheglyayev A.V. *Parovyye turbiny* [Steam turbines]. В. 1, б. 2. Moscow, Energoatomizdat publ., 1993. 796 p.
- [2] Kirillov I.I., Ivanov V.A., Kirillov A.I. *Parovyye turbiny i paroturbinnyye ustanovki* [Steam turbines and steam turbine units]. Leningrad, Mashinostroyeniye publ., 1978. 276 p.
- [3] Benenson E.I., Ioffe L.S. *Teplofikatsionnyye parovyye turbiny* [Heating steam turbines]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1986. 264 p.
- [4] *Parovyye turbiny i turboustanovki* [Steam turbines and turbo-installations]. ОАО "Kaluzhskiy turbinniy zavod". Available at: www.aoaktz.ru (accessed 2 September 2018).
- [5] Zhinov A.A. *Kompleks programm dlya rascheta osevoy parovoy turbiny po srednemu diametru* [A set of programs for calculating an axial steam turbine on an average diameter]. Moscow, Bauman Press, 1997. 20 p.
- [6] Eliseyev Yu.S., Manushin E.A., Osipov M.I. *Teoriya i proyektirovaniye ga-zoturbinnyykh i kombinirovannykh ustanovok* [Theory and design of gas turbine and combined plants]. Moscow, Bauman Press, 2004. 640 p.
- [7] Trukhniy A.D., Krupennikov B.I., Petrunin S.V. *Atlas konstruktsey detaley turbin* [Atlas of the details of turbines]. Moscow, MEI publ., 2000. 148 p.

- [8] Trukhniy A.D., Lomakin B.V. *Teplofikatsionnyye parovyie turbiny i turbo-ustanovki* [Heating steam turbines and turbine units]. Moscow, MEI publ., 2002. 539 p.
- [9] Kostyuk A.G., Frolov V.V., Bulkin A.E., Trukhniy A.D. *Turbiny teplovykh i atomnykh elektrostantsiy* [Turbines of thermal and nuclear power plants]. Moscow, MEI publ., 2001. 488 p.
- [10] Bulkin A.E., Kostyuk A.G., Trukhniy A.D., Frolov V.V. *Parovyie i gazovyie turbiny dlya elektrostantsiy* [Steam and gas turbines for power plants]. Moscow, MEI publ., 2016. 557 p.
- [11] Zhinov A.A. *Raschet stupeney davleniya parovoy turbiny na peremennom rezhime* [Calculation of pressure stages of a steam turbine in variable mode]. Kaluga, KF BMSTU publ., 2009. 7 p.
- [12] Kasilov V.F. *Peremennyye rezhimy ekspluatatsii parovykh turbin energoblokov TES* [Variable modes of operation of steam turbines of power units TPP]. Available at: <http://5fan.ru/wievjob.php?id=1092> (accessed 10 September 2018).
- [13] Sakharov A.M. *Teplovyie ispytaniya parovykh turbin* [Thermal testing of steam turbines]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1990. 233 p.
- [14] Trukhniy A.D., Povarov O.A., Izyumov M.A., Malysenko S.P. *Osnovy sovremennoy energetiki. T. 1. Sovremennaya teploenergetika* [Fundamentals of modern energy. Vol. 1. Modern power system]. Moscow, MEI publ., 2010. 493 p.
- [15] Boyko E.A., Bazhenov K.V., Grachev P.A. *Teplovyie elektricheskiye stantsii (Paroturbinnyye energeticheskiye ustanovki TES)* [Thermal power plants (Steam turbine power plants TPP)]. Krasnoyarsk, IPTS KGTU publ., 2006. 153 p.

Статья поступила в редакцию 01.10.2018

Информация об авторе

СИДОРОВ Альберт Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые двигатели и теплофизика». Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (248000, Калуга, Российская Федерация, Баженова ул., д. 4, e-mail: alb.sidoroff2017@yandex.ru).

Information about the author

SIDOROV Albert Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Thermal Engines and Thermal Physics. Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (248000, Kaluga, Russian Federation, Bazhenova St., Bldg. 4, email: sidpol1@rambler.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Сидоров А.А. К вопросу о рациональном проектировании проточной части низкого давления турбины с отопительным отбором пара. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 12, с. 68–73, doi: 10.18698/0536-1044-2018-12-68-73

Please cite this article in English as:

Sidorov A.A. On the Question of Rational Design of the Low-Pressure Flow Channel of Turbines with Heating Steam Extraction. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 12, pp. 68–73, doi: 10.18698/0536-1044-2018-12-68-73