

УДК 621.311

**ПАРОВАЯ ТУРБИНА КП-77-6,8
STEAM TURBINE KP-77-6,8**

Г.Ю. Витецкая, А.И. Сироткин

Научный руководитель – Н.В. Пантелей, старший преподаватель

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

G. Vitetskaya, A. Sirotkin

Supervisor – N. Panteley, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk

Аннотация: В российском турбостроении непрерывно происходит совершенствование технологий по разработке и модернизации паровых турбин. Это необходимо для того, чтобы иметь возможность предложить заказчикам наиболее энергоэффективное оборудование. Также это позволяет заказчику выбрать агрегат, которое наиболее полно будет удовлетворять его потребности. Одним из передовых производств в данной отрасли является Уральский турбинный завод (УТЗ), который за последнее время провел модернизацию большинства распространенных на постсоветском пространстве паровых турбоагрегатов, таких как Т-250/300-240, К-160-130, ПТ-60/70-130/13 и некоторых других. В данной статье речь пойдет об абсолютно новом проекте УТЗ – паровой турбине Кп-77-6,8 с осевым выхлопным патрубком.

Abstract: In the Russian turbine industry, technologies for the development and modernization of steam turbines are continuously being improved. This is necessary in order to be able to offer customers the most energy efficient equipment. It also allows the customer to choose the turbine that will most fully meet his needs. One of the leading industries in this industry is the Ural Turbine Plant (UTZ), which has recently modernized most of the steam turbine units common in the post-Soviet space, such as T-250/300-240, K-160-130, PT-60/70-130/13 and some others. In this article, we will talk about a completely new UTZ project – the Kp-77-6,8 steam turbine with an axial exhaust pipe.

Ключевые слова: турбина, выхлопной патрубок, паровпускная часть, конструкция, корпус, фундамент, поток пара, модификация.

Keywords: turbine, exhaust pipe, steam compartment, construction, body, foundation, steam flow, modification.

Введение

Паровая турбина – это основной элемент тепловых электростанций. Она позволяет преобразовать тепловую энергию пара в механическую энергию ротора [1]. Это даёт возможность в конечном итоге направить теплоту, полученную при сжигании топлива в котлоагрегате, на выработку электрической энергии. Паровые турбины подразделяются на множество типов и классифицируются по различным признакам. В частности, традиционно принято считать, что конденсационными являются турбины, предназначенные только для выработки электроэнергии и имеющие только нерегулируемые отборы пара на

регенеративный подогрев питательной воды [1, 2]. Однако в последнее время, ввиду потребностей людей в многофункциональной и универсальной технике, возникла необходимость в создании агрегата, который был бы одновременно компактным, манёвренным, но вместе с тем выдавал бы значительную электрическую и тепловую мощности. Так появилась идея создания конденсационных паровых турбин с теплофикационным или производственным отбором нерегулируемого давления. Специалисты УТЗ создали целую линейку таких турбоагрегатов. Головной турбиной этой серии стал агрегат Кп-77-6,8. На его основе были разработаны также турбины К-85-8,0 и Кп-50-6,8 [3]. Все они имеют сравнительно небольшую мощность, однако уже успели зарекомендовать себя ввиду своих конструктивных и технических особенностей. В данной статье на примере паровой турбины Кп-77-6,8 описаны основные достоинства и недостатки, характерные для турбин данного класса, а также возможные варианты их применения.

Основная часть

Турбина Кп-77-6,8 – конденсационная с производственным отбором нерегулируемого давления – является одноцилиндровым агрегатом двухкорпусной конструкции [3]. Её продольный разрез представлен на рисунке 1. Она рассчитана на начальное давление 6,8 МПа и начальную температуру 550 °С [3]. Давление пара в конденсаторе равно 5 кПа. В номинальном режиме, при работающем отборе, электрическая мощность турбоагрегата составляет 77 МВт, а при отключённом отборе турбина может развить выдавать в сеть вплоть до 100 МВт [3]. Всего в турбине выполнено три отбора пара: пар из первого отбора идет на подогреватель высокого давления, пар из второго отбора идет на производственные нужды и в деаэратор, а пар из третьего отбора пар поступает в подогреватель низкого давления.

В турбине Кп-77-6,8 используется дроссельное парораспределение, поэтому в агрегате отсутствует регулирующая ступень. Процесс расширения пара протекает в девятнадцати ступенях давления, которые включают в себя одиннадцать ступеней в части высокого давления и восемь – в части низкого давления турбоагрегата. Пар движется в цилиндре по петлевой схеме. Проточная часть высокого давления находится во внутреннем корпусе. После того, как пар проходит через неё, он разворачивается на 180° и, пройдя пространство между внутренним и внешним корпусом ЧВД, попадает в проточную часть низкого давления во внешнем корпусе. Это достаточно распространённое техническое решение, которое помогает частично компенсировать осевое усилие, действующее на упорно-опорный подшипник [1].

Рассмотрим отличительные конструктивные особенности данной турбины, анализируя разрез цилиндра (рис. 1) и его внешний вид, представленный на рисунке 2. Компоновка цилиндра имеет два варианта исполнения. В первом варианте он состоит всего из двух частей: паровпускной и выхлопной – в которых находятся ЧВД и ЧНД соответственно [3]. Во втором случае в цилиндре присутствует еще и средняя часть (ЧСД), которая выбирается в зависимости от начального давления и длины проточной части. Паровпускная часть представляет собой конструкцию с наружным и внутренним корпусами. Для

закрепления внутреннего корпуса используются продольные и вертикальные шпонки, а четыре лапы надежно фиксируют его в наружном корпусе [3]. Это позволяет агрегату выдерживать неравномерное тепловое расширение лап, чтобы исключить боковые и поворачивающие усилия на корпусе переднего подшипника.

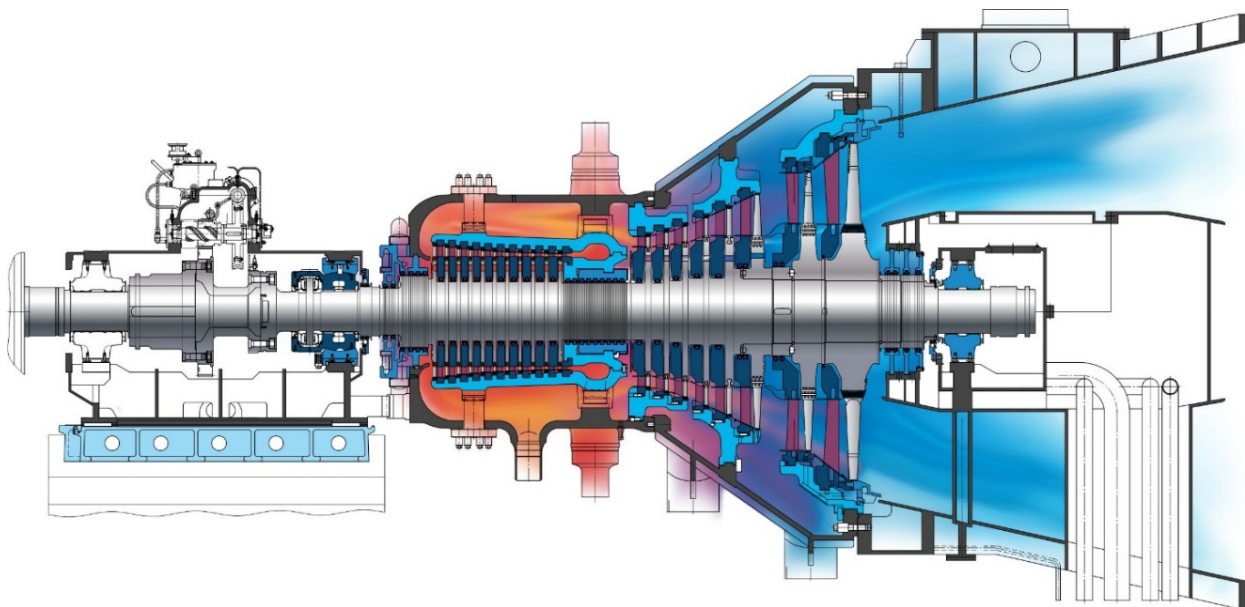


Рисунок 1 – Продольный разрез турбины Кп-77-6,8 [4]

При создании Кп-77-6,8 было решено, что картеры подшипников не будут опираться на фундамент напрямую. Это связано с тем, что выхлопной патрубок паровой турбины осевой, а значит, картер подшипника полностью располагается внутри цилиндра, что помогает потокам пара обтекать его со всех сторон. Из этого следует, что полное опирание на фундамент невозможно. В качестве решения данной проблемы было предложено подвесить картер в нижней части цилиндра через систему стяжек. Маслопроводы подшипника расположены под картером, а рядом с ними в шахте находятся паропроводы. Всего в турбине имеется два подшипника: опорный и упорно-опорный. Упорно-опорный подшипник находится перед ЧВД турбины и предназначен для восприятия не только радиальных, но осевых усилий, действующих на ротор турбины.

Картер подшипника состоит из двух частей [3]. Рассмотрим составляющие обеих частей. Внутренняя часть состоит из масляной системы и вкладыша ротора. Наружная часть включает в себя концевые уплотнения. Пространство между внутренней и наружной частями соединено с атмосферой с помощью технологической шахты. Подобное расположение благотворно влияет на нормализацию работы концевых уплотнений. Оно не допускает обводнение масла и попадание масла в паровой поток. Для своевременного доступа к картеру в крышке цилиндра выполнен люк. Он необходим при демонтаже крышек подшипника и при обслуживании краном.

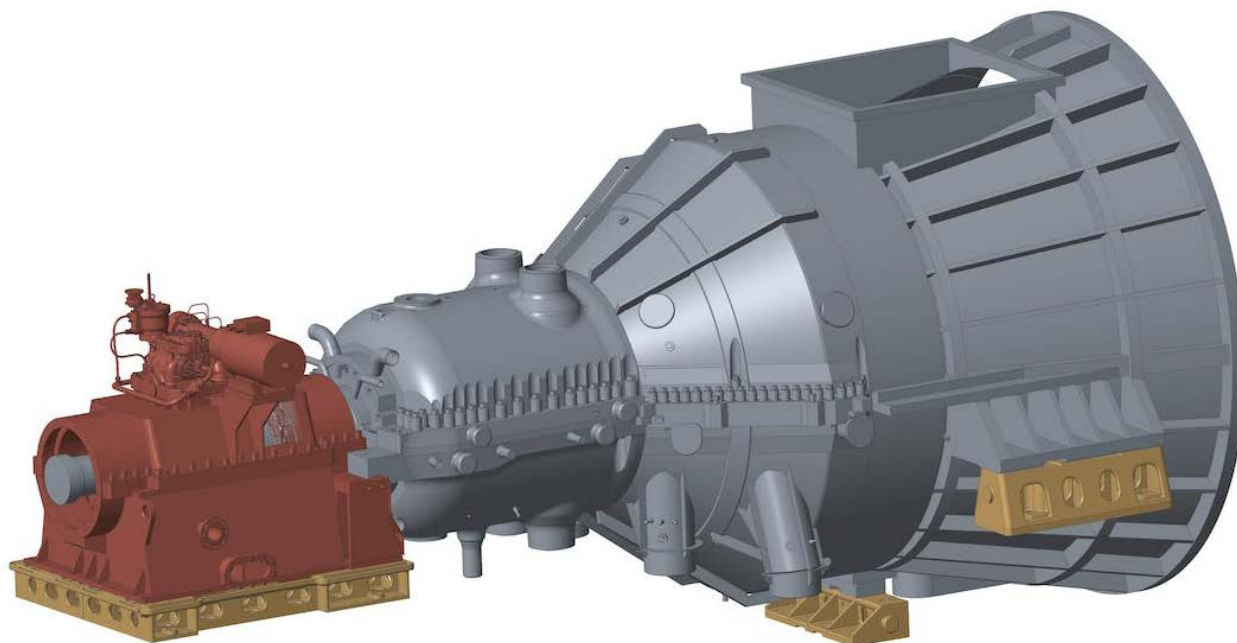


Рисунок 2 – Внешний вид турбины Кп-77-6,8 [4]

Турбины этого класса имеют нестандартное расположение валоповоротного устройства и приводимого генератора. Оба этих устройства находятся перед турбиной, что обусловлено её конструктивными особенностями, главной из которых является применение осевого выхлопного патрубка, о котором будет сказано ниже. В связи с вышесказанным генератор этих турбин имеет левое вращение своего ротора. По этой же причине в турбоагрегате отсутствует главный маслонасос. Ему просто не хватило места, так как в блоке системы авторегулирования помимо неё самой находится муфта, соединяющая роторы турбины и генератора, и упорно-опорный подшипник. Вместо главного масляного насоса подача масла осуществляется тремя электронасосами, один из которых обычно находится в резерве.

Одной из самых важных частей при проектировании турбины Кп-77 считается расчет теплового прогиба цилиндра. Он состоит из двух частей. В первой части произвели расчеты по состоянию цилиндра при рабочих нагрузках в температурном поле. Вторая часть включает в себя расчеты, проведенные при номинальных условиях без давления. Это состояние называется монтажным. В процессе расчётов была проведена оценка собственных частот и форм колебаний выхлопного патрубка. В результате этого были определены основные параметры, влияющие на систему «фундамент – опоры – подшипник – ротор». Все расчеты производились при диапазоне частот 20-60 Гц [3]. По результатам исследований можно определить следующую закономерность: при частотах менее 32 Гц цилиндру характерны оболочечные формы колебаний, что не несет существенного вреда всей конструкции, но при частоте от 32 Гц возникают изгибные формы [3]. А вот они уже могут привести к поступательным и вращательным колебаниям встроенного корпуса подшипников, что может привести к негативным последствиям при эксплуатации агрегата вплоть до аварии. Поэтому в руководстве по эксплуатации было указано, что при пуске или

останове агрегата диапазон частот от 29 Гц до 35 Гц надо проходить как можно быстрее.

Конечная часть паровой турбины – выхлопной патрубок [1]. От его конструкции во многом зависит эффективность турбины в целом. Основной задачей выхлопного патрубка является минимизация потерь при подводе потока к конденсационной установке. Важным условием, при котором протекает данный процесс является восстановление части статического давления. Это происходит благодаря кинетической энергии рабочего тела, поступающего в патрубок. Значительным преимуществом данного метода считается получение дополнительной мощности ступени за счет повышения давления за ней. Поэтому во время проектировки турбины газодинамической обработке выхлопных патрубков уделяется особое внимание. В случае турбины Кп-77 имеет место осевой выхлопной патрубок [3]. Это значительно облегчает поиск решения для нетиповых конденсационных установок, так как подвод пара к ним выполняется с помощью труб большого диаметра. Но кроме преимуществ в компоновке важно отметить, что такой выхлопной патрубок также и более экономичен по сравнению с более классическими вариантами конструкций.

Для выбора наиболее совершенного выходного патрубка важно учитывать его энергетические характеристики. Наиболее точно его эффективность описывает коэффициент полных потерь ξ_p [1]. Его можно найти, просуммировав относительные основные и дополнительные потери агрегата. И от значения полных потерь энергии в турбине будет зависеть форма течения пара через выхлопной патрубок. Диапазоны значений коэффициента ξ_p для различных типов выхлопных патрубков представлены в таблице 1. Анализируя представленные в ней данные можно заметить, что осевой выхлопной патрубок имеет наименьшее значение коэффициента полных потерь, что создает наиболее равномерный выходящий поток.

Таблица 1 – Диапазоны значений коэффициента полных потерь энергии в турбине в зависимости от конструкции её выхлопного патрубка [3]

Тип конструкции выхлопного патрубка	Диапазон значений коэффициента полных потерь
Осерадимальный выхлопной патрубок с подвальной компоновкой конденсатора	1,1...1,6
Осевой выхлопной патрубок	0,5...0,6
Осерадимальный выхлопной патрубок с боковой компоновкой конденсатора	0,7...0,9

Однако несмотря на положительный эффект от установки осевого патрубка, производители мощных отечественных турбин придерживаются более традиционных конструкций [1]. Это связано с определёнными сложностями при проектировании патрубка. Во-первых, скорости потока пара распределяются неравномерно по высоте лопатки при выходе из патрубка, что требует учёта особенностей течения пара еще и в последней ступени турбины. Во-вторых, осевой выхлопной патрубок не симметричен, его пришлось моделировать в полном виде [3]. В-третьих, течение пара вдоль диаметра патрубка неравномерно, так как опорные конструкции вносят возмущение в его поток,

который восстанавливается лишь за пределами встроенного корпуса подшипника. Для устранения сложностей, возникающих при расчётах осевого патрубка для турбины Кп-77, была спроектирована его модель и модель проточной части. Это позволило значительно сократить время, затрачиваемое на конструирование и расчёты возможных вариантов исполнения цилиндра и патрубка, так как большую часть работы стало возможно выполнить с помощью систем автоматизированного проектирования.

В данном случае осевой патрубок эргономично вписался в корпус турбины и хорошо зарекомендовал себя при её работе. Его применение позволило сэкономить место и установить вместе с турбиной воздушный конденсатор. Это очень важно в том случае, когда вблизи места эксплуатации агрегата нет крупного источника технического водоснабжения. Кроме того, использование воздушного конденсатора позволяет избавиться от проблем с отложениями, коррозией и, как следствие, механическим износом трубок теплообменника, так как обычно охлаждающая вода не обладает высоким качеством. Данный конденсатор конструктивно выполнен в виде башен, очень похожих на градирни. Внутрь этих башен подводится отработавший пар и подаётся в специальные коллекторы, откуда он попадает в трубные пучки, расположенные специальным образом для обеспечения лучшего теплообмена с воздухом. Форма башни позволяет обеспечить естественную циркуляцию воздуха, поэтому для работы воздушного конденсатора не требуются тягодутьевые механизмы. Отсутствие системы технического водоснабжения снижает затраты на строительство станции, её площадь, а также позволяет избежать возможное негативное влияние на окружающую среду.

В результате инженерам УТЗ удалось создать агрегат, который при относительно небольших габаритах может выдавать приличную для своего класса электрическую мощность и вместе с этим дополнительно снабжать потребителя тепловой энергией. Изначально Уральский турбинный завод разрабатывал турбину Кп-77 для построенных в Москве мусороперерабатывающих заводов [5]. После окончания строительства были поставлены первые машины, которые работали в блоках с котлами, предназначенными для сжигания мусора. Это дало возможно с пользой утилизировать мусор, отказавшись от организации новых полигонов ТБО, а трёхступенчатая очистка дымовых газов позволила сделать влияние этих предприятий на окружающую среду минимальным. А указанные ранее преимущества турбины сделали возможным строительство таких заводов в пределах города, что значительно сократило время транспортировки мусора и дало возможность сделать город чище.

Вместе с тем турбоагрегат Кп-77-6,8 может применяться и в составе парогазовой установки (ПГУ) [1]. В этом случае ТЭС состоит из паровой и газовой частей. Газовая часть включает в себя компрессор и газовую турбину. В камеру сгорания газовой турбины подаётся топливо и сжатый в компрессоре воздух. Топливо сгорает, образуются дымовые газы, которые вращают ротор газовой турбины. Поскольку температура этих газов даже после срабатывания в газовом турбоагрегате остаётся достаточно высокой (на уровне 550 °С-600 °С)

[1], целесообразно использовать их теплоту для получения дополнительного количества электроэнергии. Поэтому после газовой турбины дымовые газы попадают в котёл-утилизатор, где отдают свою теплоту воде, превращая её в пар. Этой теплоты достаточно, чтобы обеспечить требуемую температуру пара перед входом в турбину Кп-77. В итоге с помощью котла-утилизатора связываются между собой в один цикл паросиловой и газотурбинный циклы. КПД такого цикла примерно в 2 раза выше обычного паротурбинного, так как в данном случае электроэнергия вырабатывается на электрогенераторах как паровой, так и газовой турбины. Вместе с этим потери теплоты с уходящими газами, которые на традиционной ТЭС занимают одно из первых мест по объёмам, здесь намного ниже за счёт рационального использования этой теплоты в котле-утилизаторе. В результате термический КПД блока ПГУ получается на уровне 60...68 % [1].

Заключение

Уральский турбинный завод непрерывно совершенствует разработку и производство паровых турбин, что позволяет надеяться на постоянное повышение качества в области российского турбостроения. Спроектированная на этом заводе турбина Кп-77-6,8 полностью оправдала все заложенные в неё конструкторские решения и подтвердила свои показатели в ходе испытаний [3, 4]. Благодаря инновационным технологиям производства и уникальной конструкции выходного патрубка эта турбина, как уже было указано выше, способна развивать мощность вплоть до 100 МВт, что является достойным результатом для турбины средних габаритов.

В период конструирования разработчики применяли верифицированные методики, учитывающие различные состояния турбины как на сборке при монтаже, так и при разных эксплуатационных нагрузках. Это позволяет повысить гарантийный срок покупателям на качество и срок службы произведенных на Уральском турбинном заводе агрегатов. В частности, для турбины Кп-77-6,8 срок эксплуатации может достигать до 30 лет [3].

Литература

1. Паровые и газовые турбины: учебник для вузов / А.М. Трубилов, [и др.]; под ред. А.Г. Костюка, В.В. Фролова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.
2. Бродов, Ю.М. Теплообменники энергетических установок / Ю.М. Бродов. – Екатеринбург: Сократ, 2003. – 965 с.
3. Одноцилиндровая паровая турбина Кп-77-6,8 // Турбины и дизели. Специализированный научно-практический журнал. – 2023. – № 5. – С. 38-43.
4. Кп-77 [Электронный ресурс] / Уральский турбинный завод. – Режим доступа: <https://www.utz.ru/customer/catalog/parovye-turbiny/turbiny-dlya-proizvodstvennogo-tekhnologicheskogo-tsikla-i-musoropererabotki/kp-77/> /. – Дата доступа: 19.10.2024.
5. Презентация первой российской турбины для мусоросжигательных заводов [Электронный ресурс] / ZAVODFOTO.RU. – Режим доступа: <https://dzen.ru/a/XMiTg3rp7QCzoX7M> /. – Дата доступа: 19.10.2024.