

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

70-72

WARSZAWA-POZNAŃ 1976
PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPLYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW
MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

KOMITET REDAKCYJNY – EXECUTIVE EDITORS
KAZIMIERZ STELLER – REDAKTOR – EDITOR
JERZY KOŁODKO · JÓZEF ŚMIGIELSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA – EDITORIAL OFFICE
Instytut Maszyn Przepływowych PAN

ul. Gen. Józefa Fiszerza 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright

by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1976

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE – ODDZIAŁ W POZNANIU

Wydanie I. Nakład 630+90 egz. Ark. wyd. 63,25 Ark. druk. 49,25 Papier druk. sat. kl. V, 65 g., 70×100. Oddano do składania 4 VII 1975 r. Podpisano do druku w czerwcu 1976 r. Druk ukończono w czerwcu 1976 r. Zam. 528/118. H-16/245.

Cena zł 190,–

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU

III KONFERENCJA NAUKOWA

na temat

TURBINY PAROWE WIELKIEJ MOCY

Gdańsk, 24 - 27 września 1974 r.

*

IIIrd SCIENTIFIC CONFERENCE

on

STEAM TURBINES OF GREAT OUTPUT

Gdańsk, September 24 - 27, 1974

*

III НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

на тему

ПАРОВЫЕ ТУРБИНЫ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Гданьск, 24 - 27 сентября 1974 г.

ЙОСЕФ ДРАГИ

Чехословакия*

**Современное положение в исследовании,
разработке и выпуске паровых турбин ШКОДА****Введение**

Как вытекает из анализов потребности установленной мощности в тепловых электростанциях чехословацкой энергосистемы, а также из прогнозов выпуска главными мировыми заводами-изготовителями, в период 1980 - 1990 г. можно предусматривать дальнейший длительный рост мощности паровых турбин приблизительно до 2500 Мвт. Длительный рост мощности относится не только к конденсационным турбинам в электростанциях, работающих на классическом и ядерном топливах, но и к специальным типам крупных паровых турбин, как например, для комбинированного производства электрической энергии и тепла в теплофикационных электростанциях (с конденсационными турбинами с регулируемыми отборами пара или турбинами с противодавлением), а также к т. наз. пиковым паровым турбинам, работающими в упрощенных паровых электростанциях, в частности в комбинации с газотурбинными установками в парогазовых циклах с упрощенным соединением.

В противоположность этому, не изменяются температуры входного и промперегретого пара, даже появляется тенденция к их понижению. Это результат экономических анализов эксплуатации, когда, в особенности у паровых котлов, при повышенной температуре пара проявляется снижение работоспособности. Температура входного и промперегретого пара 535/535°C превосходит сегодня на большей части крупных турбин электростанций и нельзя предполагать ее повышение. Сверхкритическое давление входного пара применяется на крупнейших единицах, предназначенных для покрытия основной нагрузки. Однако, рост установленной мощности в атомных электростанциях, которые нельзя часто останавливать, требует высокой эластичности работы и возможности ежедневной остановки с последующим быстрым пуском и нагружением даже блоков наибольших мощностей в электростанциях, работающих на твердом топливе, что приводит к применению докритического давления на входе, преимущественно в пределах 160 - 190 кгс/см².

При циркуляционном охлаждении с применением градирен на „холодном” конце турбины наблюдается длительный рост температуры охлаждающей воды.

* ШКОДА Турбостроительный завод, г. Пльзень.

На оптимизационные расчёты пока имеют влияние главным образом цены градирен и теплообменных поверхностей конденсаторов, однако, в дальнейшем необходимо будет учитывать недостаток охлаждающей воды вообще. Можно ожидать, что по этой причине в будущих единицах давление в конденсаторах будет увеличиваться, что с одной стороны дает возможность увеличения предельной мощности турбины с определенным сечением на выходе, но с другой стороны повышает требования к лопаткам с точки зрения допустимых напряжений.

В системе регенерации произошло изменение материала теплообменных поверхностей подогревателей низкого давления с последующим значительным повышением цен. Оптимизация системы регенерации вызывает уменьшение числа регенеративных подогревателей и приводит к упрощению регенеративной системы подогрева конденсата.

Важным вмешательством в концепцию, прежде всего вспомогательного оборудования, является переход к полной автоматизации пуска, нагрузки и эксплуатации, которая требует уменьшения числа запасного оборудования и часто также изменения его конструкции.

Значительно изменяется также порядок требований, предъявляемых свойствам вновь создаваемых крупных паровых турбин. С повышаемой единичной мощностью агрегата требуется, вместе с высоким тепловым коэффициентом полезного действия, также высокая работоспособность с минимальными выходами из строя из-за аварий при одновременном обеспечении эластичности эксплуатации. В зависимости от этих требований направляются научно-исследовательские работы и принимается соответствующая концепция решения машин.

Базовые типы в турбостроении

С точки зрения выпускаемых типов, период после второй мировой войны можно разделить на две части. До 1956 года выпускались турбины всех мощностей и типов. Пределы мощностей определялись Соглашением о распределении производства в ЧССР, по которому Первый брненский машиностроительный завод. Заводы им. К. Готвальда Брно, выпускают все типы турбин мощностью до 50 Мвт, а народное предприятие ШКОДА Пльзень — турбины мощностью свыше 50 Мвт.

Данное распределение производства оказалось правильным и выгодным в экономическом отношении, так как каждый из заводов-изготовителей мог обратить своё внимание на более совершенную разработку и проверку эксплуатационных свойств ограниченного числа типов, оборудоваться производственными установками специального назначения и, в результате увеличения числа повторяемых типов, повышать производительность труда и производственную мощность.

С этого года на народном предприятии ШКОДА произошло изменение структуры выпускаемых турбин в том смысле, что некоторое время в производстве преобладает т. наз. базовый тип, представляющий около 50% годового объема производства. Этим базовым типом становились постепенно конденсационные турбины мощностью порядка 55 - 110 Мвт, в настоящее время — это конденсационная па-

ровая турбина 200 Мвт на параметры пара 165 кгс/см², 535/535°С, а в дальнейшем это будет единица 500 Мвт с одинаковыми параметрами входного и промперегретого пара.

До половины 1974 года было изготовлено 57 турбин 55 Мвт и 59 турбин 110 Мвт, относящихся к базовым единицам, причем в состав не входят все компоненты для обеспечения начала производства на новом заводе в Хайдерабаде (Индия), который был построен при помощи чехословацких специалистов по производству турбин и генераторов, по чехословацким лицензиям. В общем было изготовлено 19 турбин мощностью 200 Мвт, а первая единица мощностью 500 Мвт будет построена в 1975 году.

Дальнейшая часть турбиностроения — это другие типы, выпускаемые преимущественно для экспорта. Еще недавно каждая турбина разрабатывалась отдельно, а сегодня по агрегатной концепции.

Агрегатная концепция паровых турбин ШКОДА с промежуточным перегревом пара

Важным обстоятельством для получения высокой эксплуатационной надежности, определяемой, как правило, коэффициентом применяемости, является ограниченное применение новых по концепции и конструкции элементов, не проверенных в эксплуатации. Особую роль играет естественно также качество производства и его контроль. Поэтому турбины ШКОДА с промежуточным перегревом пара решены по т. наз. агрегатной концепции, которая в возможно наибольшей степени применяется не только относительно конденсационных турбин, но также относительно турбин специального назначения, например турбин для комбинированного производства электрической энергии и тепла в центральных теплоэлектростанциях (ТЭЦ), турбин для упрощенных, т. наз. пиковых, электростанций, или же парогазовых установок. Данная агрегатная концепция основана на ограниченном числе единичных частей многокорпусных паровых турбин. Её успешное использование требует разработки ряда мощности, включая единицу, предусматриваемую в перспективе (как правило, мощностью в два раза больше, чем крупнейшая единица, находящаяся в производстве), а также основательной проверки свойств нового члена ряда с точки зрения исследования и эксплуатации.

Агрегатная концепция паровых турбин ШКОДА с промежуточным перегревом пара основана на:

- 3 основных типах части высокого давления,
- 3 основных типах части среднего давления.

В состав стандартных частей входят двухпоточные части низкого давления, которые отличаются, прежде всего, длиной лопатки последней ступени.

Схема основных типов агрегатной концепции изображена на рис. 1.

Часть высокого давления с течением пара в проточной части в одном направлении (тип А-1) применяется до пропускной способности 550 т/час. Корпус — двухстенный; это исполнение применяется в определенном диапазоне во всех основных типах частей ВД и СД.

Тип А-2 применен до сих пор до пропускной способности 1600 т/час. Решение с поворотом потока за ступенями, размещенными во внутреннем корпусе, дает возможность, с одной стороны целесообразного распределения ступеней во внутреннем корпусе и последующих носителей, с другой стороны, возможность охлаждения внутреннего корпуса и его соединительных болтов в плоскости разъема и частях на входе пара. Расстояние между подшипниками несколько удлиняется, однако места наибольшей температуры ротора находятся на достаточном расстоянии от подшипников. Внутренние поверхности внутреннего корпуса необходимо предохранять для снижения температурного градиента в его стенке.

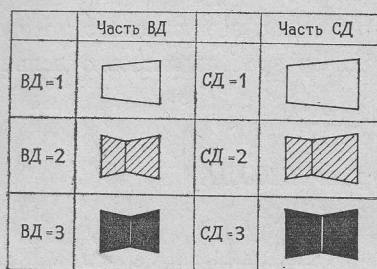


Рис. 1. Схема и исполнение отдельных типов агрегатной концепции частей ВД и СД с промежуточным перегревом пара

Двухпоточная часть высокого давления типа А-3 до сих пор не использована в турбинах для электростанций, работающих на твердом топливе, но принимается в расчет на единицах мощностью порядка 1000 Мвт.

Часть среднего давления без поворота потока (тип Б-1) применена вполне исключительно, главным образом в специальных типах турбин. Преобладает тип Б-2 с поворотом направления потока за внутренним корпусом, предусматриваемый для единиц мощностью 125 - 350 Мвт. Для больших единиц разработана двухпоточная часть СД типа Б-3, которая впервые была использована в турбине 500 Мвт.

В турбинах разных мощностей в максимальной мере используется геометрическое подобие отдельных типов, чтобы по подробно экспериментально определенным характеристикам типа определенного размера можно было точно предусматривать свойства создаваемого типа.

Корпусы всех приведенных типов частей ВД и СД изготовлены из низколегированной хромистой стали CrMoV. Из аналогичной стали выполнены также соответствующие цельнокованные роторы.

Двухпоточные части НД отличаются длиной лопатки последней ступени. Для турбин на скорость вращения 3000 об/мин применен ряд лопаток, созданный таким образом, чтобы отношение выходных сечений двух друг за другом следующих ступеней равнялось в среднем 1,30.

Главные данные этих степеней приведены в таблице 1.

Обзор применения агрегатной системы частей ВД и СД в выпускаемых и перспективных типах турбин, на скорость вращения 3000 об/мин, для электростанций и ТЭЦ на твердом топливе дается на рис. 2.

Приведенные виды частей ВД и СД хорошо видны на рис. 3, на котором показан разрез базового типа — турбины 200 Мвт, и далее, крупнейшей изготавливаемой

Таблица 1

Длина лопатки (мм)	Средний диаметр (мм)	Выходное сечение (м ²)	Окружная скорость (м/сек)
480	1880	2,84	370
570	2070	3,71	415
715	2215	4,97	460
840	2440	6,42	515
1050	2650	8,75	582

турбины 500 Мвт для конденсационных электростанций. Обе машины сконструированы для параметров входного пара 165 кгс/см², 535/535°С и температуры охлаждающей воды 20 - 26°С. Видно, что часть ВД турбины 500 Мвт в значительной мере является увеличенной моделью части ВД турбины 200 Мвт, а в части СД обе единицы отличаются в результате перехода от части СД типа Б-2 (200 Мвт) к части СД типа Б-3 (500 Мвт). Облопачивание частей СД образовано сходными лопатками в обеих единицах; лопатка последней ступени части НД длиной рабочей части 840 мм одинакова в обеих машинах, однако количество выходных сечений в единице 500 Мвт в два раза больше. Доля прототипных частей в единице 500 Мвт минимальна. Внимание в развитии и исследовании направлено, прежде всего, на новую по концепции двухпоточную часть среднего давления.

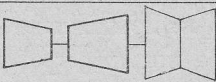
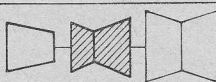
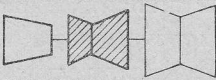
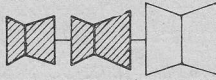
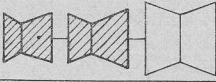
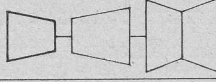
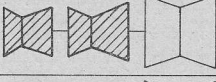
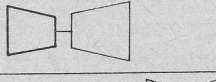
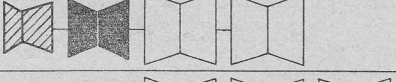

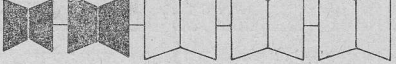
Тип	Мощность	Схема	Тип	Мощность	Схема
А	100-125		Б	100-160	
	130-160			200-250	
	200-250		В	135-150	
	300-350		Г	120	
	500		Д	200-350	
	(1000)				

Рис. 2. Обзор применения агрегатной системы частей ВД и СД у разных типов турбин с числом оборотов 3000 в минуту

А — конденсационные турбины, Б — конденсационные турбины с регулируемым отбором пара (для ТЭЦ), В — конденсационные турбины с двумя регулируемыми отборами пара (для промышленности и для ТЭЦ), Г — турбины с противо-давлением, Д — пиковые турбины для упрощенных паровых электростанций и для парогазовых циклов

На рис. 2 тонкими линиями изображены специально сконструированные части, относительно которых нельзя использовать агрегатную концепцию. В конденсационной турбине с двумя регулируемым отборами (группа В) из части СД выведен относительно большой регулируемый отбор пара. В турбине с противодавлением 120 Мвт давление за частью СД ниже 1 кгс/см^2 , что требует специальной конструкции.

Использование агрегатной системы в теплофикационных турбинах

В конденсационных теплофикационных турбинах с промежуточным перегревом пара нормального исполнения регулируемый отбор пара давлением $0,7 - 2,5 \text{ кгс/см}^2$ расположен, как правило, между частями СД и НД. У конденсационных турбин для электростанций давление между частями СД и НД находится обычно в пределах $3,5 - 6 \text{ кгс/см}^2$. Использование агрегатной концепции относительно теплофикационных конденсационных турбин было обусловлено размещением регулируемого отбора в проточной части двухпоточной части НД. Механизмом для регулирования давления служит т. наз. поворотная диафрагма, которая при конденсационном режиме представляет собой направляющий аппарат нормального типа, а в случае работы с регулируемым отбором — регулирующий дроссельный орган. Приведенный эффект заключается во взаимном передвижении двух половин поворотной диафрагмы с разъемными лопатками.

Эта концепция реализована в двух турбинах, установленных в ТЭЦ столицы Дании — Амагер. Основные параметры этих турбин: номинальная мощность 135 Мвт, пар на входе 141 кгс/см^2 , 535°C , температура промперегретого пара 535°C , температура охлаждающей воды 11°C , наибольший теплофикационный отбор 125 Гкал/час. Агрегатная концепция данных турбин хорошо видна из продольного разреза на рис. 3. Снимок турбины, установленной на испытательном стенде Турбостроительного завода ШКОДА приведен на рис. 4. На рис. 5 показано облопачивание последней ступени части НД с лопаткой длиной 715 мм. Положительный вклад агрегатной концепции виден из результатов эксплуатации. Эксплуатационная применимость обеих турбин в течение около 17 000, или же 11 000 рабочих часов находится в пределах 99%. Другой агрегат в этой ТЭЦ оснащен автоматикой для пуска, нагружения и остановки, которая обеспечивает автоматический разгон агрегата до заранее определенной мощности при регулировании термических напряжений ротора в пределах допустимых величин.

Аналогичный тип представляет собой единица 135 Мвт для ТЭЦ в Бухаресте. В период 1973 - 1974 г. построены в общем 4 турбины этого типа. От турбин для ТЭЦ для Амагер они отличаются увеличенным отбором тепла для теплофикации — 160 Гкал/час, далее, большей пропускной способностью, а также более высокой температурой охлаждающей воды — 20°C , что приводит к снижению числа ступеней в каждом потоке части НД с пяти до четырех и сокращению лопатки последней ступени с 715 мм до 525 мм. Снимок ротора НД данных турбин показан на рис. 6.

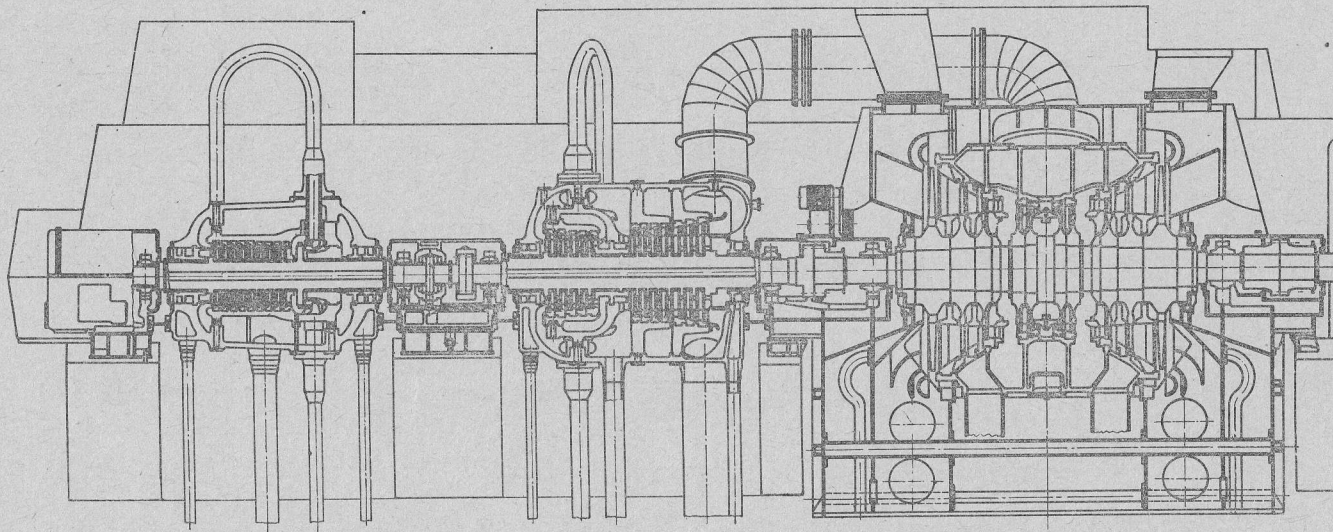


Рис. 3. Разрез теплофикационной конденсационной паровой турбины 135 Мвт с регулируемым отбором пара из обоих потоков части низкого давления (Амагер, Дания)

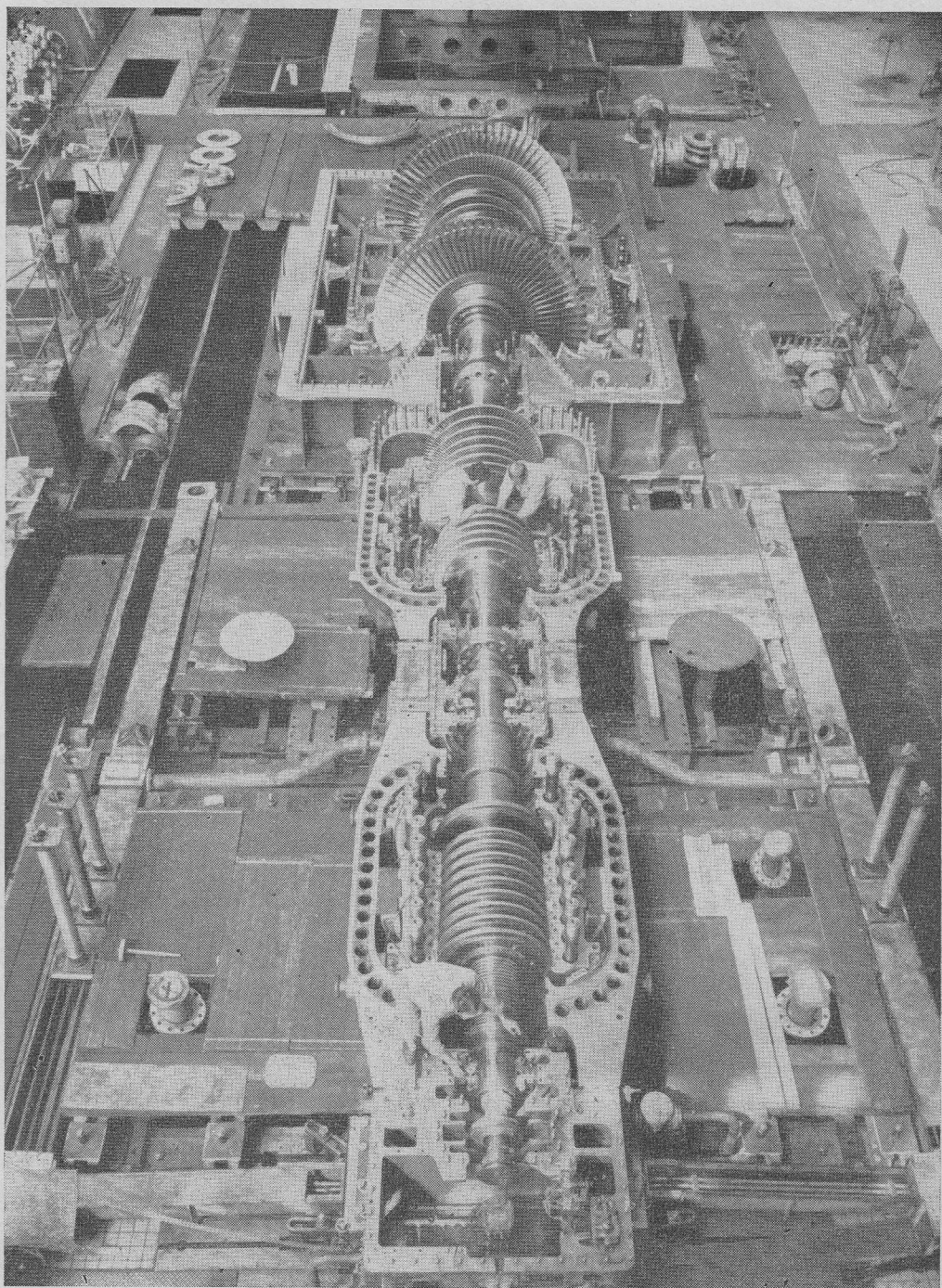


Рис. 4. Снимок теплофикационной конденсационной турбины 135 Мвт, смонтированной на испытательном стенде завода-изготовителя

Совсем особым типом теплофикационной турбины с промежуточным перегревом пара является турбина с противодавлением мощностью 114 Мвт (в эксплуатации с отсоединенными подогревателями высокого давления 125 Мвт) для ТЭЦ Ганассари в столице Финляндии Хельсинки. Первая из двух заказанных турбин была введена в эксплуатацию в начале 1974 г. Она была сконструирована для пара 151 кгс/см^2 , $535/535^\circ\text{C}$, максимальной мощностью 181,8 Гкал/час при подогреве отопительной воды теплофикационной сети до 90°C , не более 120°C . Наименьшее противодавление данной турбины составляет $0,25 \text{ кгс/см}^2$.

Из разреза турбины на рис. 7 видно применение части ВД типа А-1 по агрегатной концепции; часть НД специально конструирована с массивным цельнокованым ротором и очень массивными рабочими лопатками двух последних ступеней, см. рис. 8.

Для ТЭЦ в Братыславе изготавливается первая из четырех заказанных турбин 135 Мвт с двумя регулируемым отборами пара. Параметры пара на входе: 130 кгс/

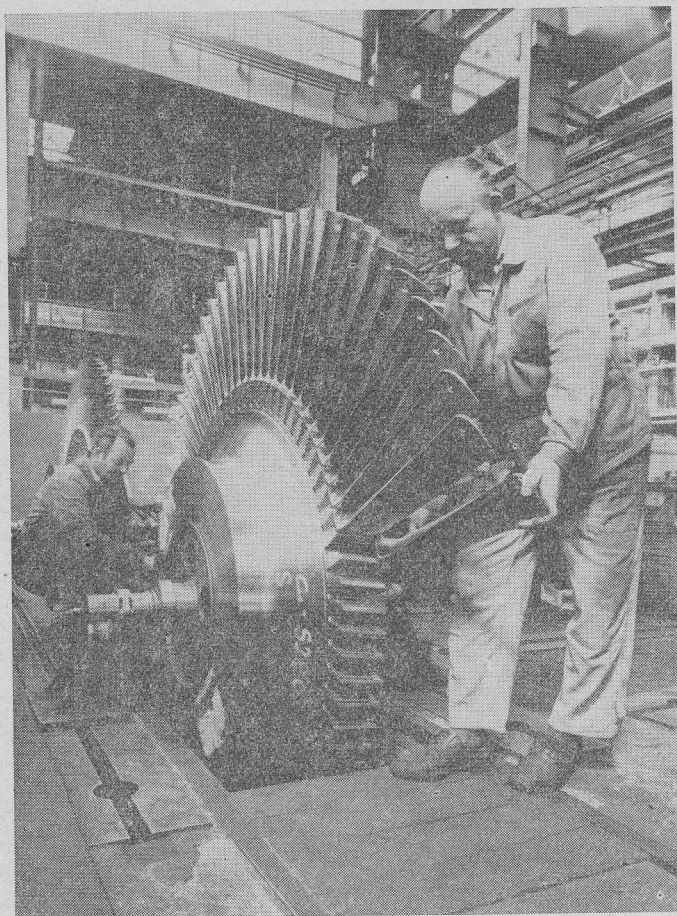


Рис. 5. Лопатка последней ступени теплофикационной турбины 135 Мвт — длина рабочей части 715 мм

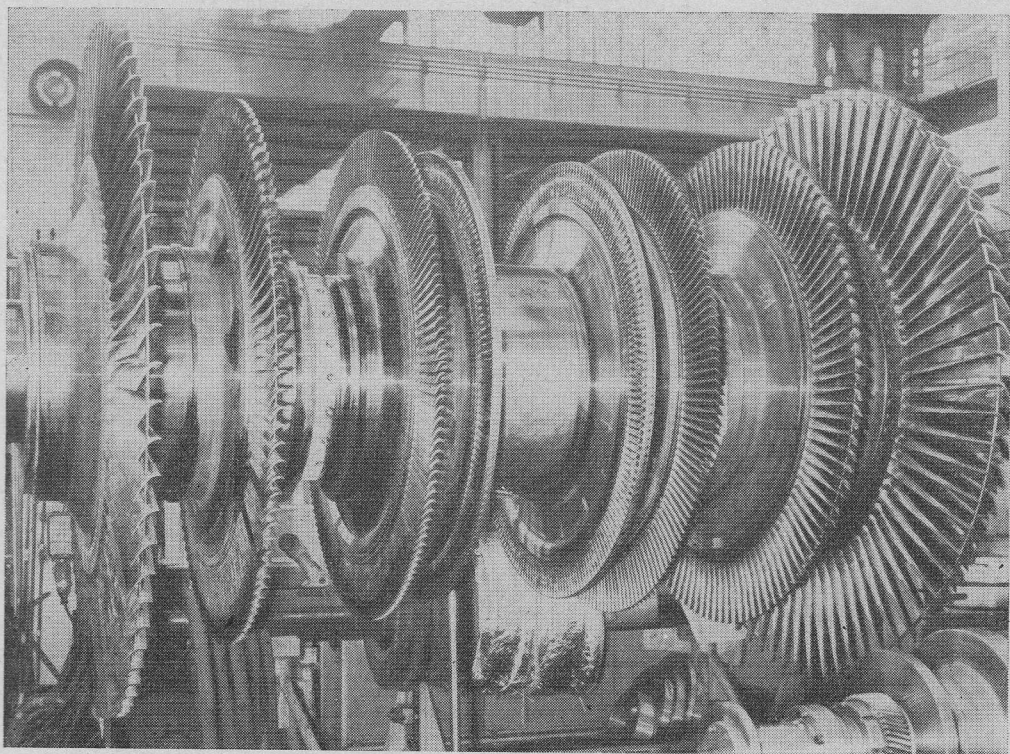


Рис. 6. Ротор низкого давления теплофикационной турбины 135 Мвт — Бухарест

/см², 525/525°С, температура охлаждающей воды 10°С. Для промышленных целей можно отобрать не более 125 т/час пара при регулируемом давлении в пределах 14 - 20 кгс/см², для отопления микрорайонов города отопительной водой при температуре не более 115°С, теплофикационный отбор не более 100 Гкал/час. Части ВД и НД для данной турбины выполнены на базе турбин для ТЭЦ Амагер, часть СД имеет специальную конструкцию. Пропускная способность увеличена до 560 т/час.

Турбины насыщенного пара для атомных электростанций

Как относительно турбин для электростанций, работающих на твердом топливе, рассматривалась возможность разработки агрегатной концепции для турбин насыщенного пара, которые принимаются во внимание для вторичного контура легководных реакторов мощностью 440 Мвт_e и позднее 1000 Мвт_e. Когда разность энтальпий на входе и выходе этих турбин для применяемого давления насыщенного входного пара 44 кгс/см², или же 60 кгс/см² имеет приблизительно половинное значение по сравнению с турбинами обыкновенных электростанций, наоборот весовой расход пара приблизительно в два раза больше. При этом же давлении в конденсаторе турбина насыщенного пара должна иметь двойное число выходных сечений, что

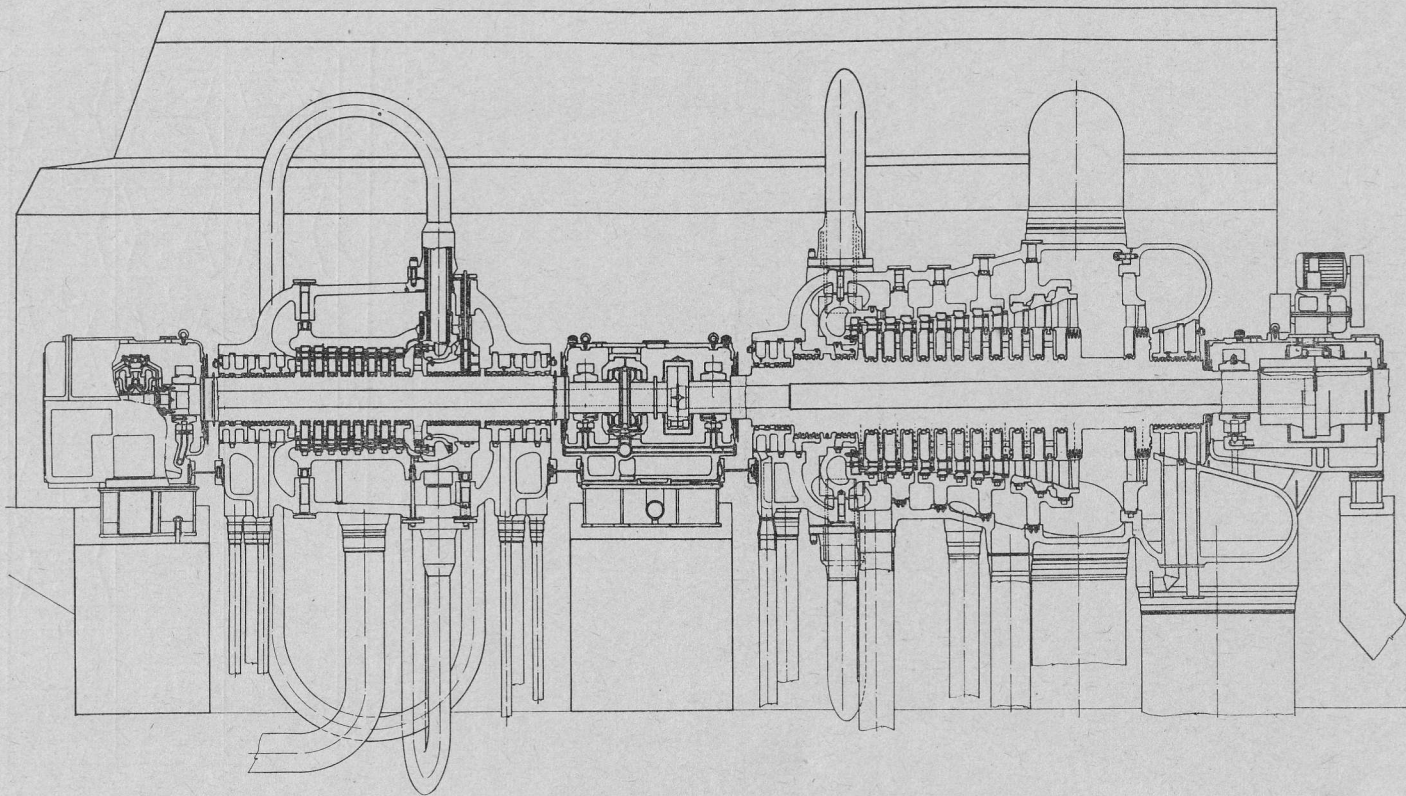


Рис. 7. Разрез теплофикационной турбины с противодавлением 114/125 Мвт, 151 кгс/см², 535/535°С (Ханасари В — Финляндия)

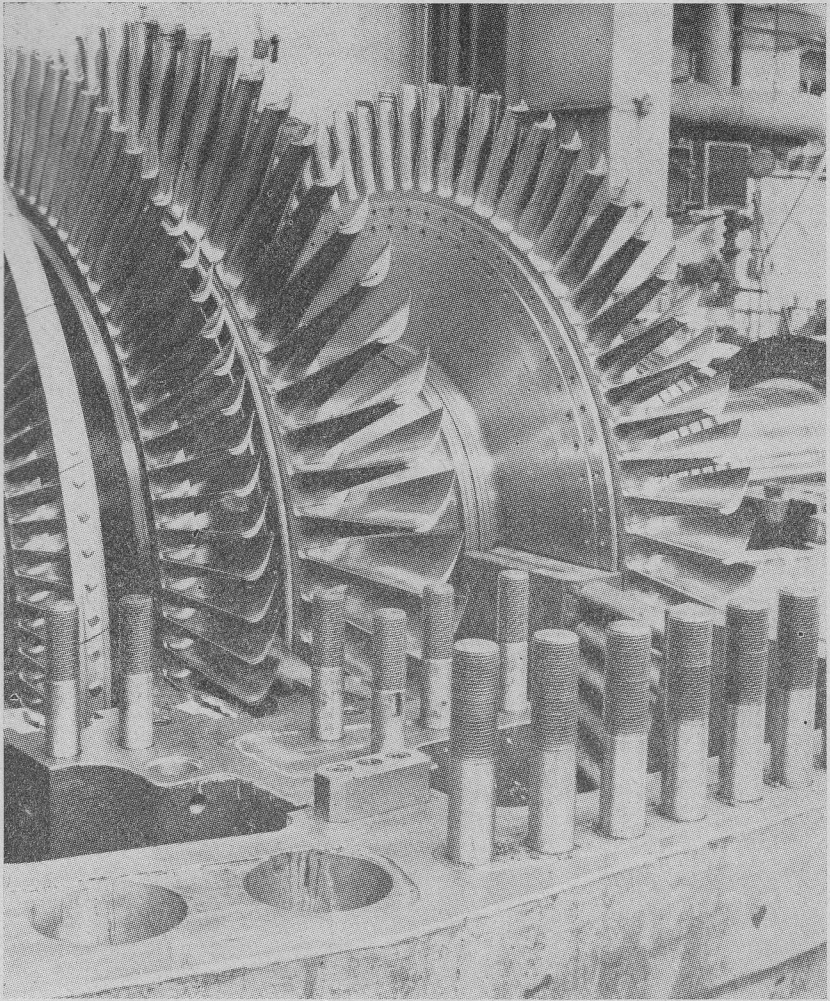


Рис. 8. Ротор низкого давления турбины с противодавлением 114/125 Мвт

Мощность Мвт	Схема
440	
500	
1000	

Рис. 9. Агрегатная концепция турбин насыщенного пара с числом оборотов 3000 в минуту
 А — Часть низкого давления с лопаткой последней ступени 840 мм, Б — Часть низкого давления с лопаткой последней ступени 1050 мм

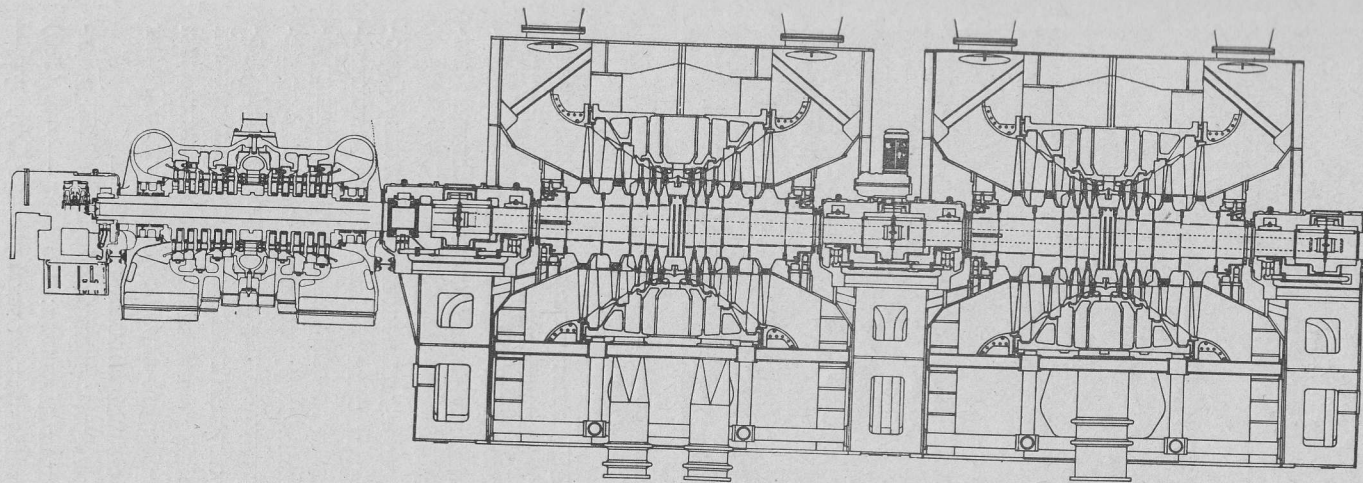


Рис. 10. Разрез турбины насыщенного пара мощностью 220 Мвт, 44кгс/см², 3000 об/мин

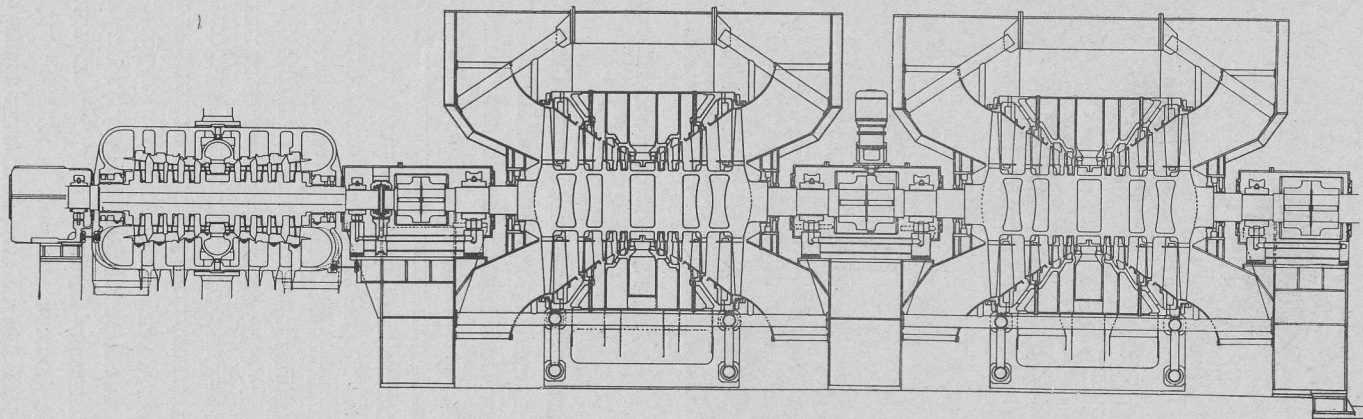


Рис. 11. Разрез турбины насыщенного пара мощностью 500 Мвт, 60 кгс/см², 3000 об/мин (длина лопатки последней ступени низкого давления 1050 мм)

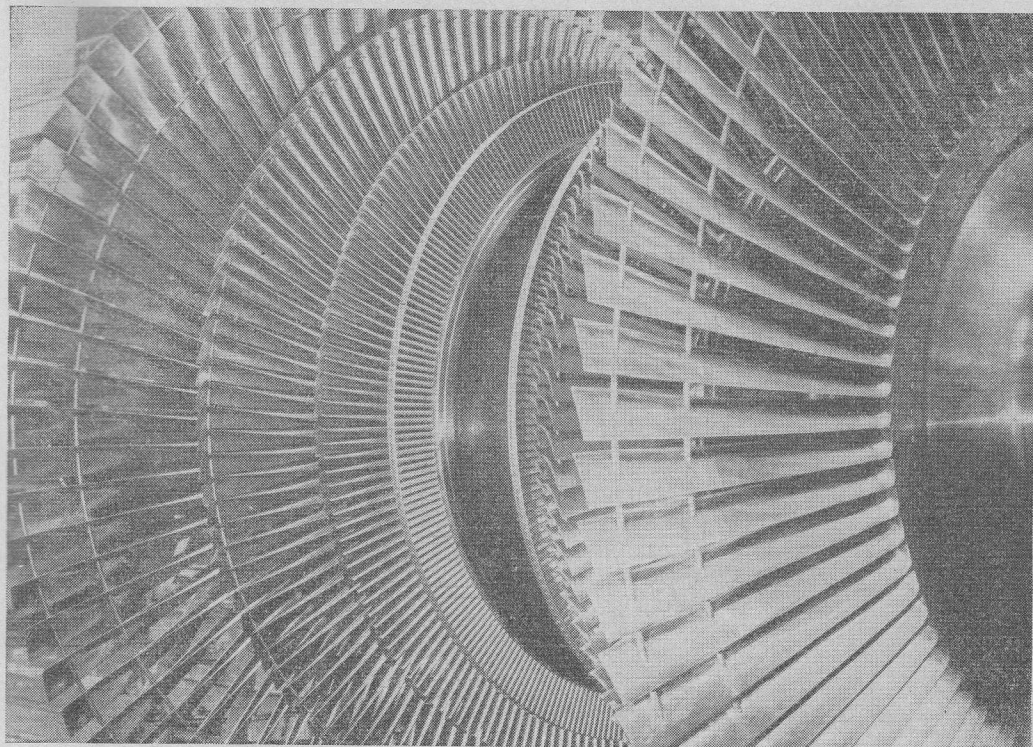


Рис. 12. Лопатка последней ступени длиной рабочей части 840 мм

при уменьшении числа двухпоточных частей НД к четырем значительно ограничивает предельную мощность. Поэтому турбины насыщенного пара до сих пор преимущественно выполняются для числа оборотов 1500 об/мин, ввиду чего двукратное увеличение размеров дисков и лопаток дает возможность увеличения выходных сечений последней ступени в четыре раза.

Исследования турбоагрегатов насыщенного пара для половинного числа оборотов, т.е. 1500 об/мин в чехословацких условиях показали необходимость значительных капиталовложений в машиностроительную и металлургическую промышленности (производство поковок генераторов), а также затруднения, связанные с транспортом и сборкой купноразмерных тяжелых деталей, так как вес ротора НД турбины доходит до 200 тонн. С учетом оптимальной температуры охлаждающей воды при циркуляционном охлаждении 22 - 26°C, в чехословацких климатических условиях можно конструировать турбины насыщенного пара до мощности 1000 Мвт с числом оборотов 3000 в минуту, т.е. без требований капиталовложений.

Агрегатная концепция турбин насыщенного пара с числом оборотов 3000 в минуту изображена на рис. 9. Она базируется на трех единицах: 220 Мвт — 440 (500) Мвт - 1000 Мвт. Каждый из этих типов состоит из двухпоточной части ВД и двух — четырех двухпоточных частей НД, которые отличаются длиной лопатки последней ступени. В турбине 220 Мвт (разрез на рис. 10) применена лопатка последней ступени

леса длиной 840 мм, проверенная в эксплуатации большого числа турбин 200 Мвт на классических электростанциях. Синмок данной лопатки приведен на рис. 12. Для единицы 500 Мвт будет применена стальная лопатка последней ступени длиной рабочей части 1050 мм, закрепленная в сварном роторе НД посредством елечного хвоста с дуговым заводом.

Разрез турбины 500 Мвт насыщенного пара 60 кг/см^2 изображен на рис. 11. Вариантное исполнение мощностью 440 Мвт может быть использовано взамен существующего решения с 2-мя турбинами по 220 Мвт.

Исследовательская и производственная база

В половине 60-х годов был построен новый современный турбинный цех достаточной производственной мощностью для покрытия потребностей как отечественной энергетики, так и зарубежных заказчиков. Кроме оборудования для производства крупных паровых турбин мощностью до 1000 Мвт в цехе находятся испытательные стенды для испытания регулирующих механизмов, измерения вибрации лопаток, испытания комплектных роторов в вакууме при повышенных числах оборотов в тоннеле для испытания на разнос и т.п. Испытательный стенд комплектно собранных машин дает возможность одновременной сборки двух трехкорпусных единиц; пар для испытаний подводится от недалеко расположенной ТЭЦ в количестве не более 68 тонн/час.

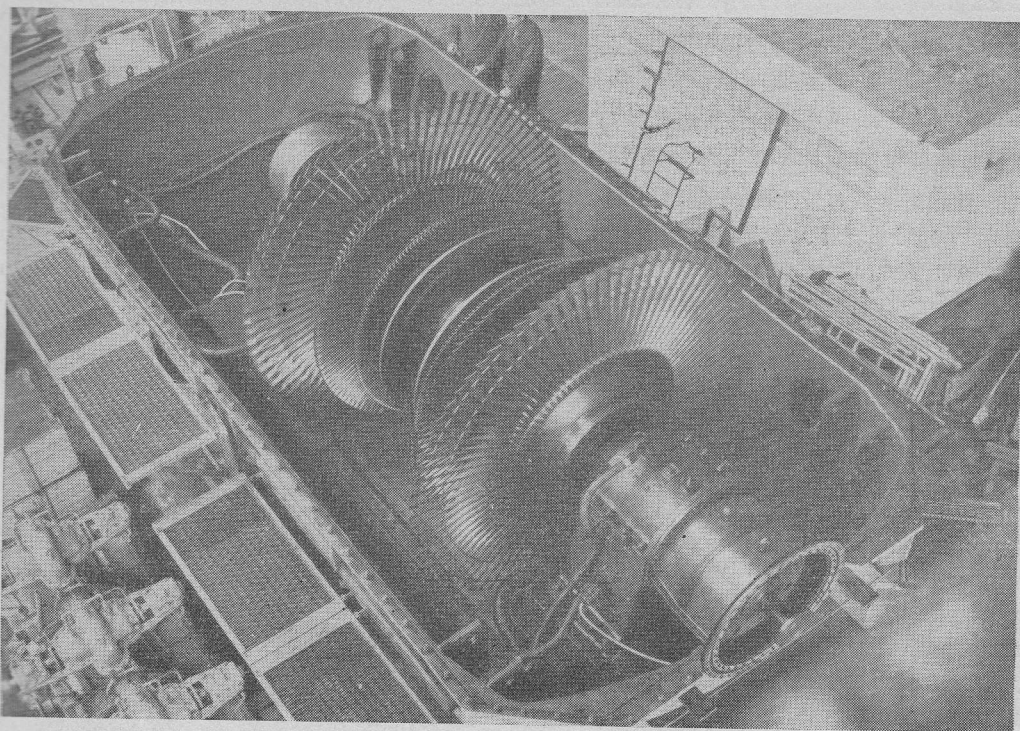


Рис. 13. Тоннель для испытания роторов на центробежные усилия при повышенном числе оборотов.

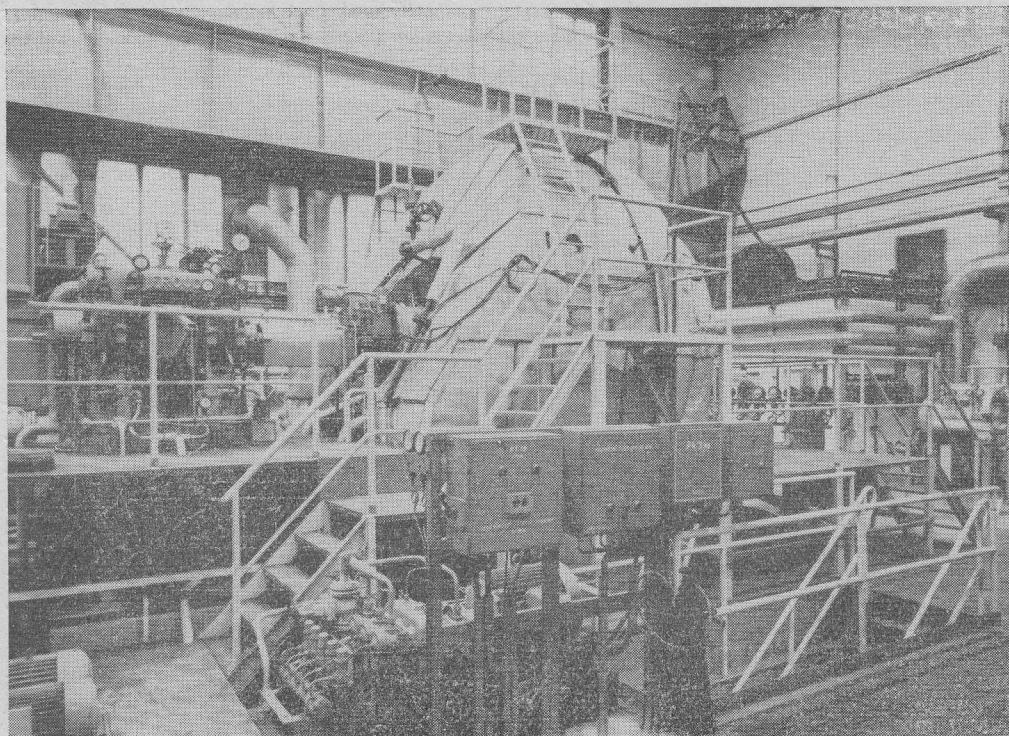


Рис. 14. Опытная паровая турбина мощностью 10 Мвт

На рис. 13 приведен снимок тоннеля для испытания на разнос, соединенного с производственным цехом при помощи рельса. Ротор, подвергаемый испытанию, устанавливается на вакуумную тележку и после перемещения в пространство тоннеля соединяется с валом приводного агрегата.

Параллельно с новым производственным цехом, в его тесной близости, была построена новая экспериментальная лаборатория. Она состоит из двух главных объектов. Большая лаборатория площадью 30 м × 50 м оснащена прежде всего стендами для исследования течения, регулирования и теплообменников. Другая лаборатория, связанная с объектом тоннеля для испытания на разнос, служит исследованию прочности вращающихся частей. Экспериментальные стенды турбостроительного завода направлены, прежде всего, на исследование частей турбин в натурном масштабе 1 : 1 с большим расходом энергии. В большой лаборатории, кроме аэродинамических труб, главным объектом является опытная паровая турбина с тормозом, мощностью до 10 Мвт (рис. 14). Речь идет об установке двойного назначения: для исследования к.п.д. частей НД во влажном паре и для измерения спектра динамических частот вновь разработанных последних ступеней с облопачиванием до внешнего диаметра 4000 мм. Снимок опытного ротора с ведущим и измеряемым колесами представлен на рис. 15. Другой важной установкой является паровая турбина мощностью 1 Мвт для исследования к.п.д. двухступенчатого ротора с корот-

кими лопатками, соответствующими облопачиванию частей ВД турбин больших мощностей. Мощность ступеней можно определять отдельно. В лаборатории установлено также устройство для исследования отдельных элементов и динамических функций регулирования турбин мощностью 200 Мвт.

Главными установками лаборатории прочности являются шахта для испытания дисков на разнос и тоннель для исследования напряжений на вращающихся частях.

Измерения в большой лаборатории в значительной мере автоматизированы; автоматическая вычислительная машина обрабатывает результаты испытаний уже в процессе их выполнения.

Турбостроительный завод обеспечивает около одной трети требуемого объема исследовательских работ. Благодаря долгосрочному сотрудничеству с внезаводскими научно-исследовательскими учреждениями, а также с Центральным научно-исследовательским институтом народного предприятия ШКОДА, удалось создать целесообразно организованную систему исследования, которая представляет собой крепкую базу для развития отрасли. Главным партнером из ряда внезаводских организаций является Государственный научно-исследовательский институт машиностроения в Веховицах, решающий для области паровых турбин больших мощностей проблемы течения и действий влажного пара, теплообменников, резких перепадов

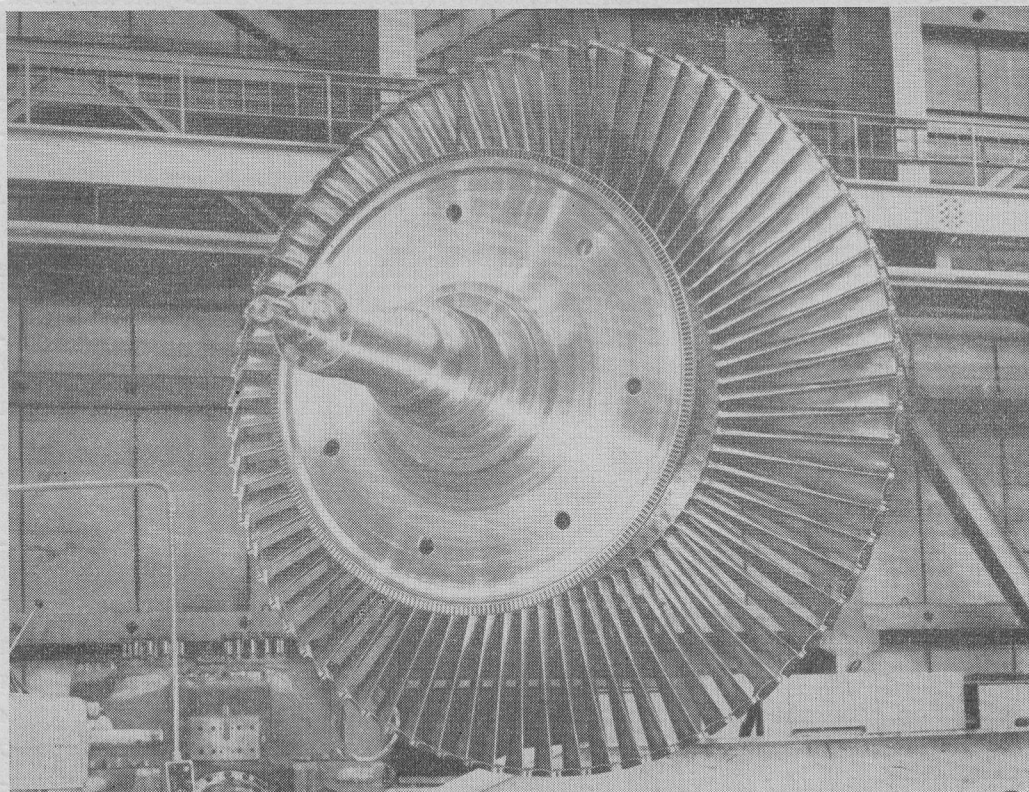


Рис. 15. Опытный ротор для измерения спектра динамических частот лопаток последней ступени части низкого давления

температур и ряд теоретических заданий из области упругости и прочности. Значительное участие в развитии отрасли имеют исследовательские работы Центрального научно-исследовательского института ШКОДА, в котором главное внимание уделяется созданию и исследованию новых материалов, новым технологическим методам, в особенности в области сварки, динамики проточной части и роторных систем, а также созданию новых элементов для регулирования и автоматизации.

Главные проблемы исследования и разработки

Главные направления работ по исследованию исходят из перспективы развития и производства новых типов турбин, выпускаемых в последующем десятилетии, а также из предусматриваемых трендов параметров и технических требований заказчиков. В сжатом виде можно привести их в следующем порядке:

— комплексное решение проблем влажного пара как условие успешного создания паровых турбин больших мощностей насыщенного пара для атомных электростанций с легководными реакторами,

— исследование температурных полей и термических напряжений частей, подвергаемых высоким температурам пара, которое позволит уточнить условия нестационарных состояний во время пуска и быстрых изменений нагрузки, при соблюдении требуемого срока службы,

— исследование систем регулирования, завершение агрегатной концепции и обеспечение перехода от автоматизации пуска к управлению эксплуатацией автоматическими вычислительными машинами,

— улучшение к.п.д. превращения энергии, прежде всего, в частях ВД и НД паровых турбин больших мощностей,

— углубление знаний в области динамики лопаток и роторных систем, которые имеют решающее влияние на обеспечение безаварийной эксплуатации,

— усовершенствование теплообменников для конденсации и системы регенерации турбин.

Важным предметом разработки и исследования является ротор низкого давления с лопаткой последней ступени предельного размера.

Возможен выбор одного из трех вариантов решения:

— цельнокованный ротор,

— составной ротор из вала и отдельных дисков, насаженных в горячем состоянии,

— сварной ротор из несверленных дисков.

Так как у отечественных заводов-изготовителей не созданы предпосылки для производства цельнокованных роторов диаметром 1400 - 1600 мм, применялся до сих пор, главным образом, составной ротор низкого давления. Его достоинством то, что поковки дисков выполнены с относительно небольшими размерами и хорошо контролируемые свойствами и установка лопаток в отдельные диски менее трудоемка в технологическом отношении. Недостатком является меньшая жесткость и органичная величина допустимого напряжения, принимая во внимание отвер-

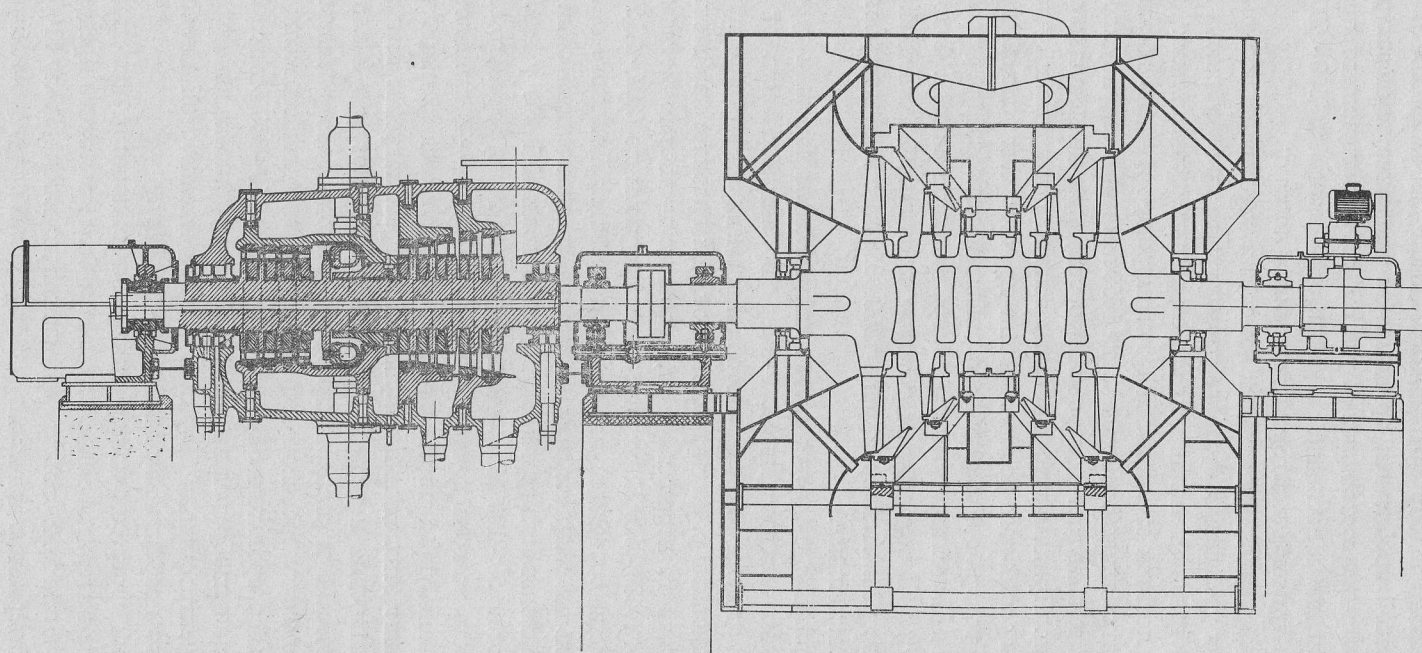


Рис. 16. Разрез пиковой паровой турбины мощностью 250 - 300 Мвт. Состояние пара на входе: 80 - 120 кгс/см², 480 - 520°С

предприятию ШКОДА была освоена технология производства поковок и обработки лопаток из титанового сплава типа Ti—5Al—2,5Sn. Опытные лопатки одной турбины мощностью 55 Мвт, были подвергнуты эксплуатации в течение более чем 40 000 часов и после этого было обнаружено отсутствие изменений технических свойств материала. Эрозия этих лопаток в результате присутствия капель влажного пара практически совпадала с эрозией стальных лопаток с закаленной входной кромкой и явилась значительно меньшей, чем у незащищенных стальных лопаток.

В связи с применением лопаток из титанового сплава, работающих с окружной скоростью выше 600 м/сек. необходимо решить защиту от эрозии. Рассматриваются два пути — пайка стеллитовых пластинок в защитной атмосфере и нанесение покрытия из очень твердого титанового сплава.

Заводы-изготовители турбин с интересом ожидают эксплуатационного опыта применения лопаток длиной рабочей части 1200 мм из титанового сплава, которые будут применены в единице 1200 Мвт в СССР на электростанции, работающей на твердом топливе. Результаты эксплуатации в значительной мере будут влиять на решение более широкого распространения лопаток из титанового сплава.

Rozwój turbin parowych Škody

Streszczenie

Koncepcja dużych turbin parowych Škody opiera się na zastosowaniu ograniczonej liczby znormalizowanych podzespołów turbin wielokadłubowych. Dlatego mają one szeroki zakres zastosowań jako turbiny kondensacyjne lub turbiny specjalne np. dla elektrociepłowni. Znormalizowana konstrukcja turbin z przegrzewem międzystopniowym obejmuje trzy podstawowe typy części wysokoprężnej i trzy podstawowe typy części średnioprężnej. Te typowe części są łączone z dwustrumieniowymi częściami niskoprężnymi, różniącymi się przede wszystkim długością łopatki ostatniego stopnia.

Obecnie rozpoczęto budowę pierwszej z ośmiu zamówionych turbin o mocy 220 MW na parę nasyconą, przeznaczonych dla siłowni jądrowych z reaktorami chłodzonymi zwykłą wodą. Dla czeskosłowackich warunków klimatycznych, przy stosowaniu chłodni kominowych i temperaturze wody chłodzącej równej 20 - 25°C, jest możliwa budowa turbin na nasyconą parę wodną, o obrotach znamionowych 3000 obr/min i mocy ponad 500 MW. Turbina 500 MW na parę nasyconą składa się z części wysokoprężnej na ciśnienie wlotowe 60 atm i dwóch dwustrumieniowych części niskoprężnych z łopatkami stalowymi o długości 1050 mm.

Development of Škoda Steam-Turbines

Summary

The concept of large Škoda-steam turbines is based upon a limited number of standardized individual parts of multicasing turbines. Hence, they are applicable in a wide extent as condensing or special turbines e.g. turbines for district heating plants. The standardized design of the reheat turbines consists of 3 basic types of the high-pressure section and 3 basic types of the intermediate-pressure section. These typical parts are joined together with the double-flow low-pressure sections differing, first of all, by the length of the stage blade.

The first of eight ordered 220 MW saturated steam turbines for nuclear power stations with light water reactors is now under manufacturing. It is possible to build the saturated steam turbines rated at 3000 rpm with the output of above 500 MW for the Czechoslovakian weather conditions where the tower cooling is used and the cooling water temperature ranges at 20...25°C. The 500 MW saturated steam turbine consists of a high-pressure part for the admission pressure of 60 atm and two double-flow low pressure parts with steel blades of 1050 mm length.