

Construcción típica de la turbina de vapor

A fin de facilitar la ulterior exposición del material analicemos la construcción de la turbina de condensación en el ejemplo de una turbina de la Fábrica Metalicheski de Leningrado, cuyo corte longitudinal está representado en la fig. 1-4 (véase el suplemento).

La turbina es de 50 MW con 50 s^{-1} y funciona con el vapor que tiene la presión inicial de 8,8 MPa y la temperatura de 535°C .

La *parte fija* de la turbina consta de 22 escalones de acción acoplados en serie. Los primeros 19 discos son forjados solidarios del árbol. Los últimos tres están fijados en el árbol obteniéndose un encaje apretado.

A las llantas de cada uno de los discos se fijan las paletas receptoras. Entre los discos se hallan *diafragmas* intermedios fijos.

En cada diafragma están dispuestas las paletas directrices fijas, pasando entre las cuales el flujo de vapor se acelera y adquiere la dirección necesaria para entrar en los canales formados por las paletas receptoras.

El aumento paulatino de escalón a escalón de la altura de las paletas directrices y receptoras se explica con el hecho de que a medida de la expansión del vapor crece su volumen, lo que requiere aumentar gradualmente las secciones de paso.

Las paletas directrices del primer escalón, el llamado *escalón de regulación*, están fijadas en las *cajas directrices* soldadas en el cuerpo de la turbina.

El vapor se suministra a las toberas del escalón de regulación por cuatro *válvulas reguladoras*, dos de las cuales están dispuestas en la mitad superior del cuerpo, y las dos restantes, de los lados de la parte inferior del cuerpo (véase también la fig. 11-9). La parte de la caja que rodea los escalones de alta presión es de fundición de acero. Los escalones de baja presión se hallan en la parte de la caja que está soldada.

La *tubuladura de escape* de la turbina también está soldada de acero en chapas y mediante la soldadura se acopla al condensador. A cuesta de la condensación del vapor agotado en la turbina, en el condensador se mantiene una presión inferior a la atmosférica. Generalmente esta presión es de 3 a 6 kPa.

En la caja de la turbina hay varias *tubuladuras de toma* de vapor de los escalones intermedios de la máquina. Estas tomas de vapor se utilizan para calentar el agua de alimentación suministrada al generador de vapor.

Al variar la carga, resulta necesario regular el consumo de vapor que pasa por la turbina. Esto se logra mediante la apertura correspondiente de las válvulas reguladoras. Debido a que las válvulas se cierran y se abren sucesivamente, la parte del vapor que pasa por las válvulas abiertas por completo no se estrangula y llega a las toberas del primer escalón con la presión inicial invariable. Solamente la parte del vapor que atraviesa la válvula entreabierta se estrangula en ésta y se proyecta hacia su grupo de toberas con la presión reducida.

El método de regulación de la admisión del vapor en la turbina, en el que el acceso del vapor a los grupos de toberas se abre sucesivamente se llama *distribución del vapor por válvulas*. El primer escalón, que en dependencia de la carga de la turbina recibe el vapor desde diferente número de grupos de toberas se llama escalón de regulación.

A la par con semejante método de distribución del vapor existe también el método de distribución del vapor *por estrangulación* que se distingue por el hecho de que toda la cantidad de vapor suministrado a la turbina pasa por una válvula reguladora común. En el caso de las cargas reducidas de la turbina, el vapor se somete a la estrangulación, debido al cierre parcial de la válvula reguladora de estrangulación. Delante de las válvulas reguladoras se monta la válvula de reten-

ción que se halla, generalmente, en una de las dos posiciones: abierta o cerrada por completo.

El árbol de la turbina se apoya en dos cojinetes que reciben la carga del rotor. El cojinete delantero de la turbina, representado en la fig. 1-4, simultáneamente fija la posición axial del rotor respecto al estator y recibe los esfuerzos axiales que actúan sobre el rotor. De esta manera, el cojinete delantero es combinado radial-axial.

En los lugares, donde el árbol atraviesa la caja de la turbina se hallan empaquetaduras que se llaman *juntas terminales*. La junta delantera del árbol sirve para evitar o disminuir la fuga del vapor del cuerpo de la turbina a la sala de máquinas. La junta trasera evita la posibilidad de la succión del aire atmosférico en la tubuladura de escape y el condensador de la turbina. La penetración del aire en el condensador elevaría la presión en éste y reduciría el rendimiento económico de la turbina. Para excluir la penetración del aire en el condensador, a la junta trasera se suministra el vapor a presión algo superior a la atmosférica. En los lugares, donde el árbol pasa por los orificios centrales de los diafragmas se montan juntas intermedias que limitan la fuga del vapor de los canales de las paletas directrices.

La caja de la turbina, los diafragmas y los cuerpos de los cojinetes tienen un desacoplamiento horizontal al nivel del eje del árbol de la turbina. Para desarmar la turbina es necesario destornillar la unión de las bridas del desacoplamiento horizontal de la caja de la turbina y de los cuerpos de los cojinetes.

La turbina se apoya en la cimentación con la tubuladura de escape mediante sus patas laterales y por el cuerpo del cojinete delantero. Los cuerpos de la turbina y del cojinete delantero no están acoplados rígidamente, lo que permite sus desplazamientos térmicos recíprocos.

El extremo derecho del árbol de la turbina mediante un acoplamiento se une con el rotor del generador, uno de cuyos cojinetes va montado en el cuerpo de la tubuladura de escape de la turbina.

El extremo delantero del árbol de la turbina está unido mediante un acoplamiento flexible con el árbol de la *bomba de aceite* centrífuga, que con su tubuladura de aspiración se apoya en la orejeta del carter del cojinete delantero. El aceite se suministra a la cavidad de aspiración de la bomba a una pequeña sobrepresión mediante un inyector.

La bomba de aceite asegura el suministro de aceite (a presión de 2 MPa) a los órganos del sistema de regulación, y, mediante un inyector, a los cojinetes del generador y de la turbina (a presión de 0,15 MPa). En el extremo del árbol de la bomba va montado un *regulador de velocidad* rápido flexible.

En la parte delantera del árbol de la turbina se hallan los *interruptores de seguridad*, que actuando sobre las válvulas de retención y reguladora cortan por completo el suministro de vapor a la turbina en el caso de que se eleve en un 10-12% la frecuencia de su rotación.

En las turbinas de gran potencia se monta un *dispositivo girador*, mediante el cual se puede girar lentamente el árbol de la turbina parada. El girador consta de un motor eléctrico acoplado con una transmisión por tornillo sin fin. El tornillo sin fin mediante la rueda de tornillo sin fin hace girar un eje intermedio, en el cual se fija con una chaveta de tornillo el piñón conductor. Este último puede desplazarse en el sentido axial y engranar con la rueda dentada grande fijada en el semiacoplamiento que une los árboles de la turbina y del generador. Al arrancar la turbina, cuando su árbol se acelera por el vapor, el piñón conductor rueda por la chaveta de tornillo y se separa automáticamente de la rueda dentada, encajada en el semiacoplamiento de la turbina.

Las turbinas que accionan los generadores de corriente eléctrica se calculan para el funcionamiento con una frecuencia de rotación invariable. La frecuencia de rotación se mantiene constante mediante la *regulación automática*.

Para el rotor de la turbina y el del generador acoplado con éste se puede escribir la siguiente ecuación de momentos:

$$J \frac{d\omega}{d\tau} = M_T - M_G,$$

donde J es el momento de inercia total de los rotores de la turbina y del generador; ω , la frecuencia de rotación; M_T , el momento de rotación desarrollado por el vapor en el rotor de la turbina; M_G , el momento aplicado al rotor del generador que depende de la carga de este último.

Como desprende de la ecuación, la frecuencia de rotación es constante si $M_T^H = M_G$. Si el momento de la turbina es superior al del generador, la frecuencia de rotación ω crece y, al contrario, si $M_T < M_G$, disminuye. Para mantener la ω invariable, el sistema de regulación automática debe actuar sobre el momento de la turbina M_T de modo que se conserve la igualdad $M_T = M_G$.

Si la turbina funciona en paralelo con otras instalaciones en una red común, y la potencia generada resulta menor que la consumida, la diferencia de las potencias se cubre a cuenta de la energía cinética de todas las máquinas giratorias que funcionan en la red. En este caso, igual que para una sola instalación, la frecuencia de

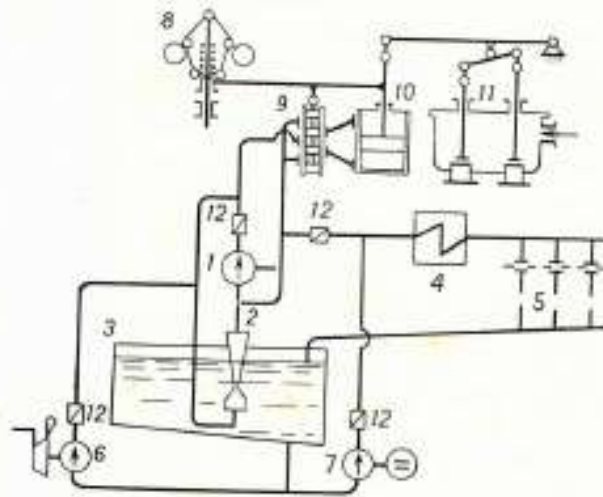


Fig. 1-5. Esquema principal de regulación y de suministro de aceite.

1, bomba de aceite centrífuga principal; 2, inyector; 3, tanque de aceite; 4, enfriador de aceite; 5, arandelas dosificadoras; 6, bomba de aceite auxiliar de alta presión; 7, bomba de aceite auxiliar de baja presión; 8, regulador de velocidad centrífuga; 9, distribuidor del servomotor; 10, servomotor; 11, válvulas reguladoras; 12, válvula de retención.

rotación y, por consiguiente, la frecuencia de la corriente alterna se bajarán. Al contrario, la frecuencia de la corriente crece, si la energía generada supera a la consumida.

Los órganos de regulación son accionados por el aceite. Por eso el sistema de regulación se combina frecuentemente con el de lubricación.

En los cojinetes de la turbina se desprende una gran cantidad de calor que debe evacuarse. La extracción del calor del cojinete se efectúa por medio del sistema de engrase por circulación, en el que el aceite no sólo disminuye el rozamiento, creando una película entre el árbol y el casquillo del cojinete, sino que sirve para enfriar este último. El aceite calentado que sale del cojinete, una vez refrigerado vuelve a utilizarse para el engrase.

El elemental esquema principal de regulación y suministro de aceite de la turbina de condensación está representado en la fig. 1-5.

La bomba de aceite centrífuga principal 1 está acoplada directamente con el árbol de la turbina. A fin de elevar la seguridad del funcionamiento de la bomba, en su línea de aspiración se mantiene una pequeña sobrepresión creada por el inyector 2 sumergido por debajo del nivel de aceite en el tanque 3.

El aceite del inyector se dirige también al enfriador de aceite 4 y luego, por las arandelas dosificadoras 5, a los cojinetes de la turbina y del generador. El aceite agotado y calentado en los cojinetes vuelve a escurrir en el tanque de aceite.

Para accionar los sistemas de regulación y de engrase durante el arranque y la parada de la turbina, el esquema incluye una bomba de aceite auxiliar de alta presión 6 movida por una pequeña turbina de vapor o un motor eléctrico de corriente alterna.

A fin de que en el caso de avería de la bomba de aceite principal los cojinetes no queden sin lubricación, en el circuito de suministro de aceite va montada una bomba de aceite auxiliar de baja presión 7, accionada por un motor eléctrico de corriente continua.

El acoplamiento del regulador de velocidad centrífugo 8 acoplado con el árbol de la turbina está unido con el distribuidor 9 que controla el suministro de aceite al cilindro del servomotor 10. Este último acciona las válvulas reguladoras de la turbina 11.

En el caso de bajar la carga del generador crecerá la frecuencia de rotación ω , como se puede deducir de la ecuación de momentos. Entonces, los pesos del regulador centrífugo, superando la tensión del muelle, harán subir el acoplamiento y el distribuidor unido con este último. El aceite suministrado por la bomba a la cámara del distribuidor obtendrá el acceso a la cavidad superior del cilindro del servomotor y bajando el émbolo de éste reducirá la apertura de las válvulas reguladoras, disminuirá la admisión del vapor en la máquina y el momento de la turbina M_T hasta que éste se iguale al del generador M_G .

Las piezas del rotor de la turbina de vapor (paletas y discos), incluso a una frecuencia de rotación normal, se hallan sometidas a altas tensiones provocadas por las fuerzas centrífugas. El crecimiento de la frecuencia de rotación de la turbina por encima del valor nominal hace aumentar las fuerzas centrífugas de modo que éstas pueden causar la avería de la máquina. Para asegurar la turbina contra el aumento inadmisibles de la frecuencia de rotación en el caso del funcionamiento defectuoso del sistema de regulación principal, las instalaciones modernas van provistas de interruptores de seguridad que se disponen en el árbol de la turbina. En el caso de que la frecuencia de rotación de la turbina supere a la frecuencia nominal en un 10-12%, el interruptor de seguridad hará cerrar rápidamente la válvula de retención de la máquina, parándola.

1-3

Ciclo térmico de la instalación de turbina y la influencia de los parámetros del vapor en el rendimiento absoluto

La turbina de vapor es uno de los elementos de la *instalación termoenergética*. El elemental esquema principal de semejante instalación está representado en la fig. 1-6. El cambio del estado del vapor en el ciclo de Rankine, al pasar éste por diferentes eslabones de la instalación se ilustra en el diagrama TS .

La bomba de alimentación 1 hace subir la presión del agua hasta la presión P_0 y la pasa al generador de vapor 2 gastando en este caso por 1 kg de agua de alimentación el trabajo L_B . El proceso de compresión isoentrópica del agua por la

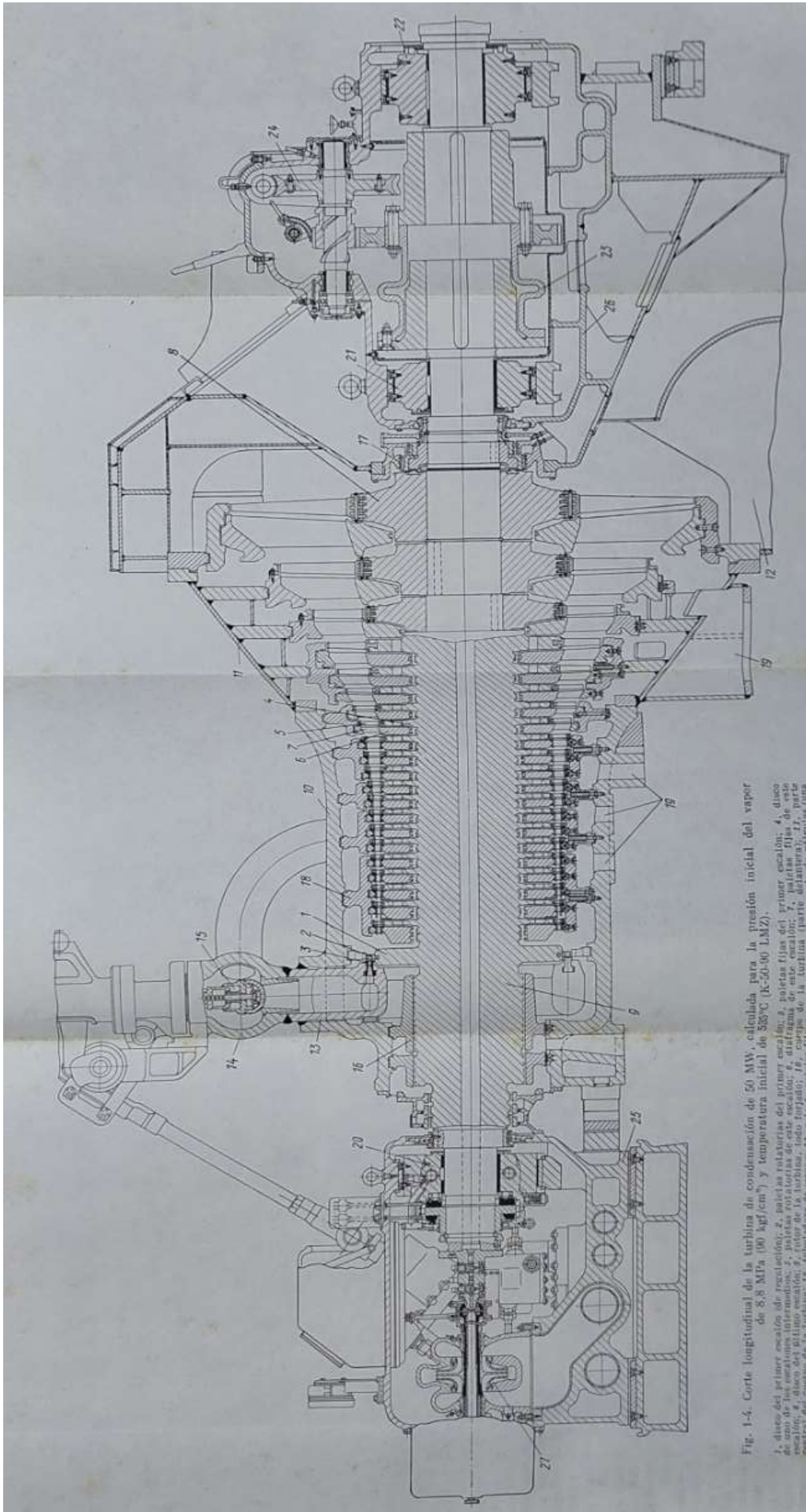


Fig. 1-4. Corte longitudinal de la turbina de condensación de 50 MW, calculada para la presión inicial del vapor de 8,8 MPa (90 kgf/cm²) y temperatura inicial de 335°C (K-50-90 LMZ).

1, disco del primer escalón de regulación; 2, paletas rotatorias del primer escalón; 3, paletas fijas del primer escalón; 4, disco de uno de los escalones intermedios; 5, paletas rotatorias del primer escalón; 6, paletas fijas del primer escalón; 7, parte central del cuerpo de la turbina; 8, rotor de la turbina, todo forjado; 9, cuerpo de la turbina, todo forjado; 10, parte central del cuerpo de la turbina; 11, válvula de regulación (una de las cuatro); 12, junta terminal delantera; 13, caja de válvulas (una de las cuatro); 14, junta terminal delantera; 15, junta terminal delantera; 16, junta terminal delantera; 17, junta terminal delantera; 18, uno de los collares que sostienen los diafragmas; 19, tubuladuras de la toma de vapor para el calentamiento regenerativo del agua de alimentación; 20, cojinete radial-axial (delantero); 21, cojinete de apoyo trasero; 22, cojinete de apoyo del generador; 23, acoplamiento semiflexible que une el rotor de la turbina con el del generador; 24, dispositivo girador; 25, cuerpo (cárter) del cojinete delantero; 26, cuerpo de los cojinetes traseros (solidario de la tubuladura de escape); 27, bomba de aceite centrífuga.

Fig. 1-4. Corte longitudinal de la turbina de condensación de 50 MW, calculada para la presión inicial del vapor de 8,8 MPa (90 kgf/cm²) y temperatura inicial de 335°C (K-50-90 LMZ).

1, disco del primer escalón (de regulación); 2, paletas rotatorias del primer escalón; 3, paletas fijas del primer escalón; 4, disco de uno de los escalones intermedios; 5, paletas rotatorias de este escalón; 6, diafragma de este escalón; 7, paletas fijas de este escalón; 8, disco del último escalón; 9, rotor de la turbina, todo forjado; 10, cuerpo de la turbina (parte delantera); 11, parte central del cuerpo de la turbina; 12, tubuladura de escape; 13, caja de paletas fijas (una de las cuatro); 14, junta terminal delantera; 15, junta terminal delantera; 16, junta terminal delantera; 17, junta terminal delantera; 18, uno de los collares que sostienen los diafragmas; 19, tubuladuras de la toma de vapor para el calentamiento regenerativo del agua de alimentación; 20, cojinete radial-axial (delantero); 21, cojinete de apoyo trasero; 22, cojinete de apoyo del generador; 23, acoplamiento semiflexible que une el rotor de la turbina con el del generador; 24, dispositivo girador; 25, cuerpo (cárter) del cojinete delantero; 26, cuerpo de los cojinetes traseros (solidario de la tubuladura de escape); 27, bomba de aceite centrífuga.