

УДК 621.3

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБИНЫ

Беляев В.Г., Король Т.И.

Научный руководитель – ст. преподаватель Пантелей Н.В.

Совершенствование турбины – это самый универсальный способ повышения экономичности ТЭС: он всегда дает эффект вне зависимости от параметров пара, тепловой схемы, условий эксплуатации и т.д. Даже наоборот: чем менее совершенна турбоустановка, тем больший относительный эффект от совершенствования турбины.

Если путем совершенствования удастся увеличить мощность паровой турбины на 1 %, то КПД ТЭС возрастет также на 1 %. Если же на той же ТЭС сэкономить 1 % топлива в котле, то ее КПД возрастет только на 0,4 %, так как КПД преобразования теплоты в работу находится на уровне 40 %. Поэтому именно паротурбинной установке ниже уделяется основное внимание.

Низкое значение КПД ПТУ и обуславливает эффективность его первоочередного повышения. Конечно, и уменьшение расхода электроэнергии на привод питательных, циркуляционных и конденсатных насосов, на систему маслоснабжения, охлаждения генераторов, и повышение КПД котла играет большую роль в экономии топлива, однако эффект от этого меньше, чем от повышения КПД ПТУ.

Основным потенциальным методом повышения экономичности ПТУ является аэродинамическое совершенствование паровой турбины.

Часть пара, которую при его протекании в турбине удалось преобразовать в работу, находится на уровне 40%. Часть пара, которую при его протекании в турбине не удалось преобразовать в работу, условно называется потерей энергии.

Наибольшие потери возникают при течении пара в сопловых и рабочих решётках, особенно в ЦВД и ЦНД, где оно носит явно выраженный пространственный характер и точный расчёт которого затруднителен;

Вторыми по значению являются потери с выходной скоростью. Объем выхлопа ЦНД огромен (при давлении 4 кПа объем, который занимает 1 кг пара, составляет почти 30 м^3), а площадь выхода пара из каналов рабочих лопаток последней ступени ограничена. Поэтому средняя скорость пара, покидающего ступень, может превышать 300 м/с, энергия этого пара не используется для выработки мощности и поэтому теряется;

Третьими по значению являются протечки пара мимо сопловых и рабочих решеток: периферийная, корневая (у корня рабочих лопаток), диафрагменная. Пар протечек не поступает на рабочие лопатки ступени и потому не производит работы.

Таким образом, основной путь совершенствования проточной части является уменьшение потерь.

Одним из способов уменьшения потерь является применение саблевидных лопаток. Саблевидные лопатки (“банановые”, “трёхмерные”) – изогнутые и напоминают по внешнему виду саблю (Рис.1)

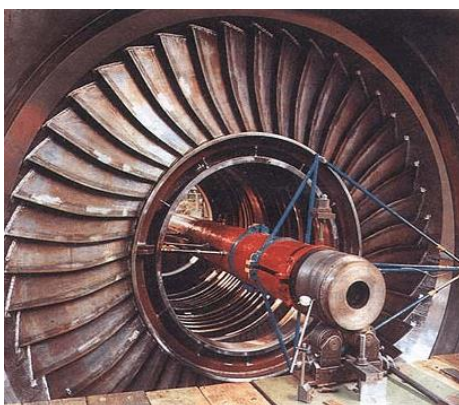


Рисунок 1 – Диафрагма с саблевидными лопатками

Они впервые были предложены в 1962 г. в России (кафедра паровых и газовых турбин МЭИ) профессором М.Е. Дейчем и ныне академиком РАН Г.А. Филипповым, а впервые использованы в мощных турбинах фирмой Siemens в середине 80-х годов прошлого столетия. Первоначально саблевидные лопатки предназначались для ступеней с малыми l/b и умеренными d/l с целью снижения концевых потерь.

При установке саблевидных сопловых лопаток, корневые сечения наклоняют в окружном направлении в сторону вращения рабочего колеса, а периферийные, наоборот, навстречу вращению.

Выигрыш при использовании саблевидных лопаток заключается в следующем:

Во-первых, вследствие уменьшения доли пара, протекающего через корневую и периферийную зоны ступени, где обтекание происходит хуже (рисунок 2)

Во-вторых, увеличение степени реактивности в корневых сечениях (снижается интенсивность концевых потерь) и уменьшение – в периферийных (уменьшаются периферийные утечки).

В-третьих, происходит выравнивание поля выходных скоростей, что снижает потери с выходной скоростью и улучшает условия работы выходного патрубка.

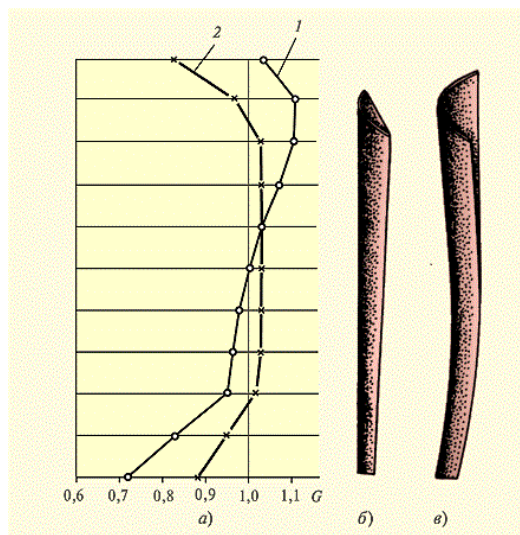


Рисунок 2 – Распределение относительного расхода пара по высоте ступени (а), традиционная сопловая лопатка (б), саблевидная сопловая лопатка (в)

Наиболее эффективно применение саблевидных лопаток для последних ступеней цилиндра низкого давления мощных паровых турбин. Если все ступени ЦНД выполнить саблевидными сопловыми лопатками, то КПД ЦНД возрастает на 1,5-2,5%, что с учётом доли выработки мощности в ЦНД даст выигрыш в экономичности всей турбины в 0,5-0,8%.

Можно использовать аналогичные “трёхмерные” лопатки так же для ЦВД и ЦСД, где лопатки имеют малую длину, но зато относительно большую зону высоких потерь в корневой и периферийных зонах. Использование пространственных лопаток в ЦВД и ЦСД позволяет увеличить их КПД на 1-2%. В настоящее время ступени с саблевидными лопатками применяют все ведущие зарубежные фирмы-производители турбин (“Сименс”, “Мицубиси”, “Альстом”). В вариантах, модернизированных ЧНД турбин К- 300-23,5 и новых турбин ЛМЗ также применяются сопловые саблевидные лопатки.

Еще одним способом повышения экономичности ПТУ является применение меридионального профилирования. Это мероприятие является существенным для лопаток малой высоты. Для увеличения КПД решеток с такими лопатками еще в 60-е года XX в. кафедра паровых и газовых турбин МЭИ предложила так называемое меридиональное профилирование сопловых каналов, при котором верхний (меридиональный) обвод канала выполняется не цилиндрическим, а суживающимся.

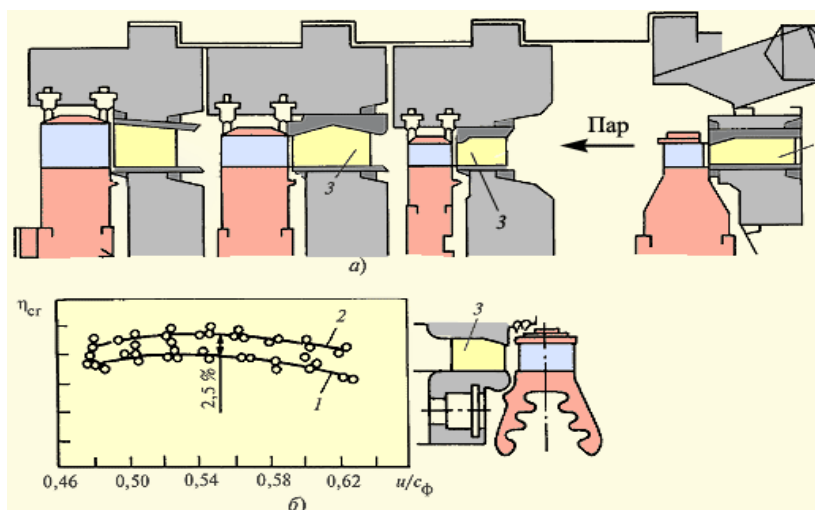


Рисунок 3 – Использование меридионального профилирования в первых ступенях паровых турбин фирмой General Electric (а), выигрыш в КПД ступени (б)

Для решёток малой высоты (меньше 25 мм) меридиональное профилирование дает относительное повышение КПД ступени более 2%, а для высоты 10 мм относительное повышение КПД около 3%. Промышленное применение меридионального профилирования осуществлено в 90-х годах фирмами Toshiba и General Electric (рисунок 3). Для реализации меридионального профилирования требуется специальная технология изготовления сопловых решёток.

Следующий способ совершенствования турбин является реактивное облопачивание. Детальный анализ возможных повышений КПД ЦВД показал, что при переходе к конструкции ЦВД современных паровых турбин с реактивным облопачиванием можно увеличить экономичность турбины на номинальном режиме работы на 5 – 8% в зависимости от типа турбины.

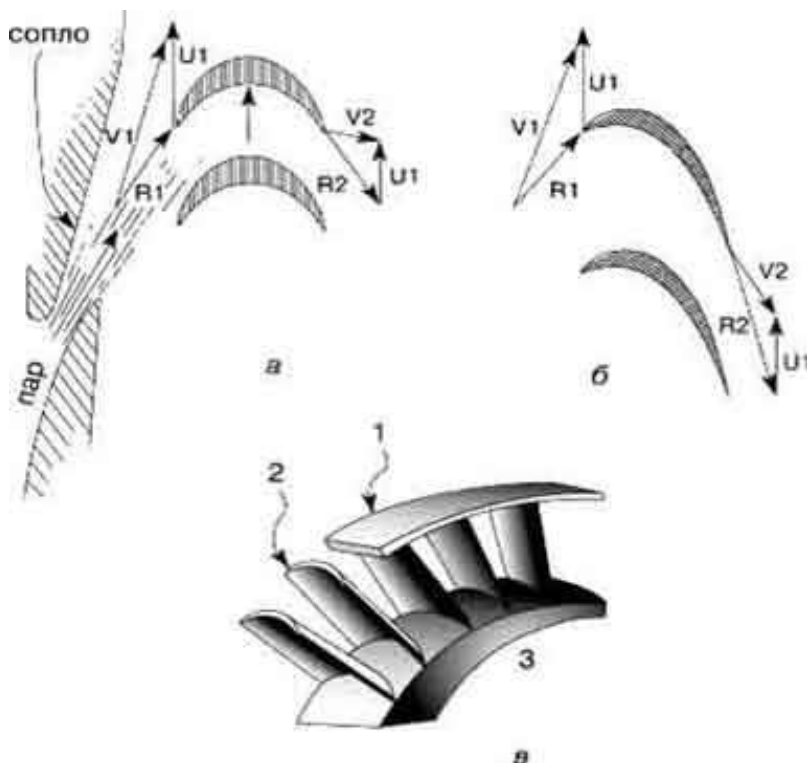


Рисунок 4 – Рабочие лопатки турбины: а) активная рабочее колесо; б) реактивное рабочее колесо.

Увеличение КПД ЦВД при реактивном облопачивании обусловлено следующими факторами:

За счет увеличения коэффициента возврата тепла из-за увеличения количества ступеней.

В связи с уменьшением теплоперепада на ступень из-за снижения скоростей пара в проточной части, снижаются потери в соплах и на рабочих лопатках.

Увеличивается высота лопаток (особенно первых ступеней), что снижает дополнительные потери.

Однако при реактивном облопачивании повышаются потери от утечек и стоимости агрегата. Позиция фирм и заводов в выборе облопачивания разная, как правило, в странах СНГ более распространено активное, а на Западе реактивное облопачивание.

Повышения экономичности так же можно добиться повышением мощности турбоустановки. Так еще в 1917 году для повышения предельной мощности было предложено применение двухъярусных лопаток последней ступени – полуторный выхлоп (ступень Баумана). Ступень Баумана применялась в первых модификациях турбины К-200-12,8. В настоящее время не устанавливается в связи с появлением лопаток с большой высотой для этой турбины.

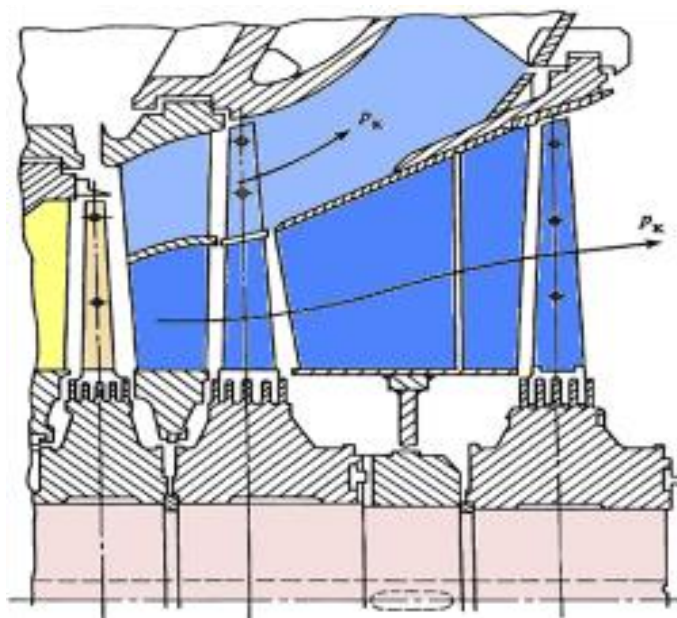


Рисунок 5 – Ступень Баумана

На верхнем ярусе ступени Баумана срабатывается теплоперепад, равный сумме теплоперепадов нижнего яруса и последней ступени. Через верхний ярус одна треть расхода пара $G_{в.я}$ направляется непосредственно в конденсатор, минуя последнюю ступень, предельную по прочности. В результате предельная мощность полуторного выхлопа увеличивается в 1,5 раза. Таким образом при трёх ЦНД мощность турбины, по параметрам идентичной турбине К-1200-23,5, можно увеличить до 1800 МВт.

Однако использование ступени Баумана сопровождается снижением экономичности проточной части ЦНД по следующим причинам:

В решётках сопловых и рабочих лопаток верхнего яруса возникают большие числа Маха и соответственно повышение потерь энергии;

Снижается эффективность выходного патрубка из-за стеснённости выхода из верхнего яруса;

Повышаются концевые потери в решётках, так как уменьшается их относительная высота. Это относится не только к решёткам ступени Баумана, но и к сопловой решётке

последней ступени, в которой увеличивается осевой размер между ступенью Баумана и рабочими лопатками последней ступени;

Возникают дополнительные потери от перетечек пара из нижнего яруса в верхний в зазоре между соплами и рабочими лопатками ступени Баумана.

В настоящее время ступени Баумана не находят применения по следующим причинам:

Снижение экономичности;

Сложность изготовления;

Трудность обеспечения вибрационной надёжности.

Увеличение длины лопаток последних ступеней – одна из мер поддержания экономичности морально стареющей турбин. Поэтому для повышения мощности необходимо увеличивать кольцевую площадь выхода пара из турбины. Еще один плюс данного мероприятия – уменьшение потерь с выходной скоростью.

Максимальную площадь выхода $11,3\text{м}^2$ долгое время имела турбина К-1200-23,5, высота рабочей лопатки которой составляет 1,2 м при среднем диаметре 3 м. Выполнить лопатку такой высоты позволило изготовление ее из титанового сплава, который вдвое легче стали и, в то же время, не уступает стали в прочности. Эта лопатка долгое время была рекордсменом, пока несколько лет назад фирма Siemens не создала новую лопатку с площадью выхода $12,5\text{м}^2$ (рисунок 6).

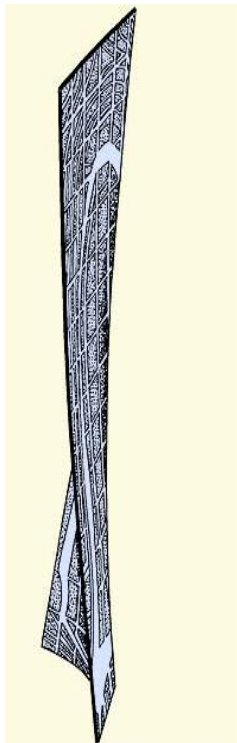


Рисунок 6 – Профильная часть рабочей лопатки последней ступени Siemens

А затем совместно с ЛМЗ и кафедрой ПГТ МЭИ была разработана проточная часть ЦНД повышенной пропускной способности, отличающаяся не только уникальной для частоты 50 Гц размерами последней лопатки в 1,5 м и площадью выхода $17,9\text{м}^2$, имеющая нестандартное распределение теплоперепадов между ступенями и необычной конфигурацией профилей.

При таком комплексном усовершенствовании общее повышение экономичности, по существу, получается суммированием экономических эффектов от отдельных рассмотренных мер. Кроме перечисленных мер, направленных на улучшение экономичности турбины, можно указать на совершенствование аэродинамики пароподводящего тракта, стопорных и регулирующих клапанов, внутренних перепускных трактов, систем паровпуска и выпуска пара из цилиндров, повороты и т.д., выполнение регулирующей ступени (первой ступени с переменной дугой подвода пара).

Литература

1. «Современная теплоэнергетика», Трухний А.Д., 2004 г.
2. Турбины тепловых и атомных электрических станций / Под ред. А.Г. Костюка, В.В. Фролова. М.: Издательство МЭИ, 2001. 488 с
3. Трухний А.Д. Стационарные паровые турбины. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 640 с.
4. «Повышение эффективности эксплуатации паротурбинных установок ТЭС и АЭС » – Том 1, Хоменок Л.А., Ремезов А.Н., Ковалёв И.А., 2001г.