

**А. М. Леонков, А. Д. Качан, В. К. Балабанович, В. Г. Даценко,
Н. В. Муковозчик**

(Белорусский политехнический институт)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТУПЕНЕЙ БОЛЬШОЙ ВЕРНОСТИ ПРИ МАЛЫХ ОБЪЕМНЫХ ПРОПУСКАХ ПАРА

Режимы работы турбинных ступеней с малым объемным пропуском пара характерны для проточной части низкого давления (ЧНД) теплофикационных турбин при номинальных величинах отопительных отборов, для ступеней ЧНД турбин, переведенных на теплофикационное противодавление (ухудшенный вакуум), последних ступеней конденсационных турбин на нагрузках холостого хода, ступеней заднего хода судовых турбин. При уменьшении объемного расхода пара происходит значительное снижение экономичности ступени, в основном за счет роста потерь с выходной скоростью и дополнительных потерь в рабочей решетке из-за нерасчетного угла входа потока. При некоторых малых значениях объемного пропуска пара ступень переходит на вентиляторный (с потреблением мощности) режим работы.

Течение пара в ступенях при малых объемных расходах пара характеризуется значительной нестационарностью и неравномерностью потока по радиусу и связано с появлением отрывного (вихревого) течения пара. В первую очередь возвратно-вихревое течение захватывает корневую область рабочих лопаток, в которой течение характеризуется нарастанием продольных положительных градиентов давления. Появление отрыва потока в корневой зоне рабочих лопаток ступени при уменьшении расхода пара объясняется диффузорным характером течения пара при больших отрицательных углах атаки. Развитию корневого отрыва способствуют также слабokonфузорная форма межлопаточных каналов (малая расчетная степень реактивности) в корневых сечениях и отжатие потока к периферии за счет действия центробежных сил.

В режимах с малым объемным расходом пара происходит снижение не только экономичности, но и надежности работы ступеней, связанное с появлением дополнительных динамических усилий парового потока и температурных напряжений в рабочих лопатках.

В наибольшей степени развитые вентиляторные режимы характерны для последних ступеней современных теплофикационных турбин, рассчитанных на подогрев в конденсаторе сетевой или добавочной воды (Т-50-130, Т-100-130). Исследование таких режимов имеет большое значение для установления оптимальных условий использования теплофикационных пучков в конденсаторе, в том числе и при частичных тепловых нагрузках турбины, когда подогрев сетевой воды в конденсаторе вытесняет отопительные отборы турбины; оно также позволит разработать рекомендации по профилированию и выбору расчетного режима ступеней ЧНД.

Некоторые данные об особенностях течения пара в ступенях ЧНД турбины Т-100-130 при работе ее с минимальным пропуском пара в конденсатор и ухудшенным вакуумом (давление в конденсаторе изменялось в пределах 0,04—0,2 бар) получены нами в ходе натурных испытаний,

выполненных на Минской ТЭЦ-3. Измерение газодинамических параметров пара при испытаниях осуществлялось с помощью многоканальных зондов ВТИ с дисковыми насадками [1]. В качестве вторичных приборов при измерении давления были использованы ртутные и батарейные водяные манометры, при измерении температуры — потенциометры типа ЭПП-09 и ПП-63. Во время опытов турбина работала с включенным впрыском конденсата для охлаждения выхлопного патрубка и с включенной рециркуляцией конденсата.

Характерной особенностью течения пара в исследованных режимах является возникновение отрицательного перепада на ступень по полным параметрам, что объясняется подводом к пару в рабочих лопатках энергии, снимаемой с вала турбины. Протяженность зоны возвратно-вихревого течения пара в рабочих лопатках последней ступени во время опытов достигала 70% высоты лопатки, а искривление линий тока в меридиональной плоскости превышало 60°. Эти результаты подтверждаются также другими работами [2—5].

Была отмечена большая неравномерность потока как по радиусу ступени, так и по окружности (рис. 1, 2). По замерам в двух траверсах

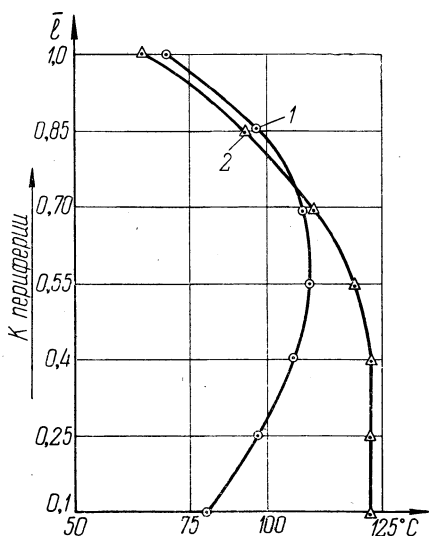


Рис. 1. Изменение температуры вдоль радиуса на входе в 25-ю ступень (турбина Т-100-130) на вентиляторном режиме:

1 — в правой траверсе горизонтального разреза; 2 — в левой траверсе.

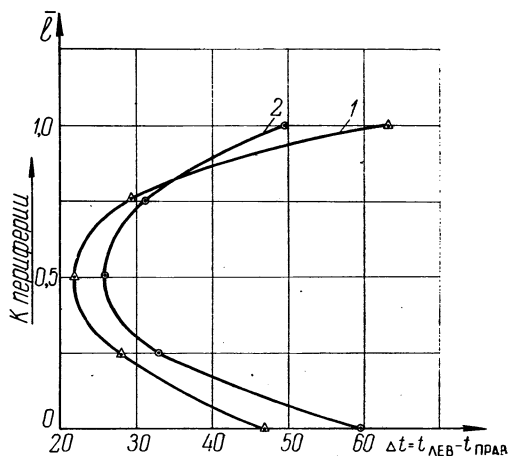


Рис. 2. Разница температур на входе в 25-ю ступень по значениям в левой и правой траверсах (турбина Т-100-130) на вентиляторном режиме:

1 — опыт № 4; 2 — опыт № 5.

разница температур перед последней ступенью достигала 60°. Наблюдалось также пульсационное изменение локальных значений температур. Всплески температур достигали 30—40 град/мин. Температура пара за последней ступенью за счет впрыска конденсата поддерживалась на уровне температуры насыщения по всему объему патрубка, кроме верхней его части, где наблюдался перегрев пара на 40—50°C. При этом было обнаружено слабое влияние количества впрыскиваемой влаги на температуру пара перед последней ступенью. В целом перепад температур на последней ступени достигал 100°C, что говорит о невысокой эффективности примененной системы охлаждения выхлопного патрубка.

Определить с достаточной достоверностью величину потребления мощности в последних ступенях во время испытаний не представилось возможным в связи с тем, что при работе турбины с включенным впрыс-

чем конденсата нельзя определить мощность ЧНД непосредственным замером параметров пара, а оценка потребления мощности в ЧНД балансовым методом дает лишь грубое приближение.

В дальнейшем предполагается повторить испытания ЧНД турбины Т-100-130 с отключенным впрыском конденсата при увеличенном по сравнению с минимальным пропуске пара в конденсатор и соответственно более значительном ухудшении вакуума.

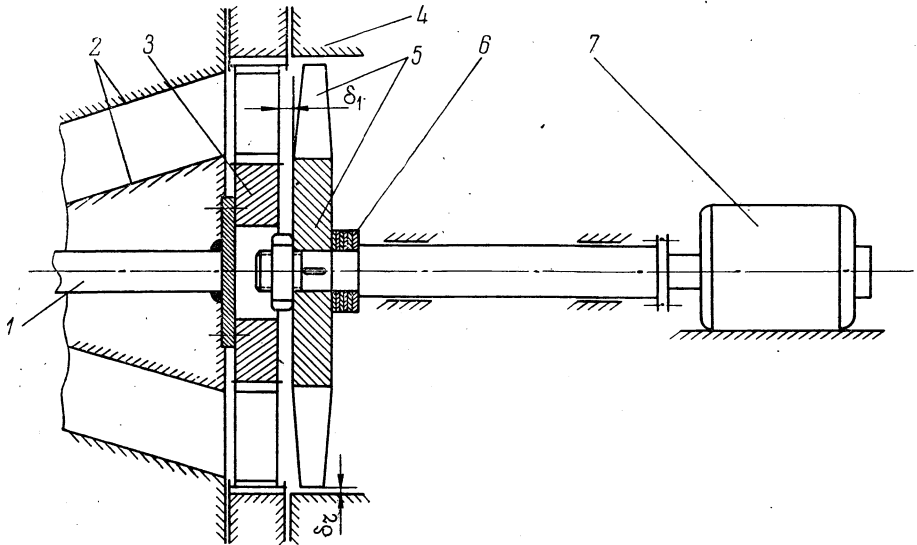


Рис. 3. Схема экспериментальной одноступенчатой воздушной турбины:
1 — привод устройства регулирования навала; 2 — подводящий канал; 3 — диафрагма с переменным навалом сопл; 4 — обечайка сменная; 5 — рабочее колесо; 6 — набор шайб для изменения осевого зазора; 7 — электродвигатель (генератор).

Кроме того, для более детального исследования работы ступеней большой верности в широком диапазоне режимов и определения потребления мощности в них в лаборатории будут выполнены эксперименты на установке, состоящей из одноступенчатой воздушной турбины (модель последней ступени турбины Т-100-130) и обратимой машины постоянного тока. Характеристики машины постоянного тока получены путем тарировки и позволяют с высокой точностью измерять мощность экспериментальной турбины при работе ее как с положительным, так и отрицательным к.п.д. Особенностью установки является также то, что конструкция соплового аппарата позволяет менять радиальный навал сопловых лопаток. Это позволяет исследовать влияние расчетной степени реактивности и характера изменения ее по высоте на величину потерь в ступени в режимах с малыми объемными расходами пара.

На наш взгляд, применение ступеней с повышенной корневой степенью реактивности и малым градиентом изменения ее по высоте лопаток обеспечит уменьшение интенсивности корневой зоны вихревого течения пара и повышение экономичности ступени на переменных режимах. Еще более эффективным представляется создание ступеней с переменным навалом сопловых лопаток, что позволит регулировать радиальное равновесие в зазоре ступени в различных режимах работы и практически полностью исключить радиальные и возвратные перетекания потока.

Экспериментальная установка позволяет также исследовать влияние условий входа потока в ступень и величин межвенцового и радиального зазоров на ее характеристики. Схема установки представлена на рис. 3.

Литература

1. *Лагун В. П., Симою Л. Л.* Комбинированный зонд, схема и методика измерения параметров потока в ступенях низкого давления паровых турбин.— «Теплоэнергетика», 1966, № 6.
2. *Кириллов И. И., Носовицкий А. И., Рахманина В. Д.* Особенности течения пара в турбинной ступени на режиме холостого хода. — «Энергомашиностроение», 1968, № 8.
3. Котельные и турбинные установки энергетических блоков (опыт освоения). Под ред. В. Е. Дорощука, Л. Б. Кроля, Я. М. Рубинштейна, Н. С. Чернецкого. М., 1971.
4. *Шнез Я. И. и др.* Особенности работы ступени с малым $D_{ср}/l$ в режимах малых нагрузок.— «Теплоэнергетика», 1971, № 1.
5. *Леонков А. М. и др.* Работа ступени в режиме потребления мощности. — В сб.: «Теплоэнергетика». Вып. 3. Минск, 1973.