

УДК 621.165

**ПОТЕРИ ТЕПЛОТЫ С ВЕЕРНОСТЬЮ В СТУПЕНЯХ ТУРБИН  
LOSSES WITH FANNING IN THE TURBINE STAGES**

А.Д. Белозёрова, В.С. Баянкова

Научный руководитель – Н.В. Пантелей, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

A. Beloziorova, V. Bayankova

Supervisor – N. Pantelei, Senior Lecturer  
Belarusian national technical university, Minsk

**Аннотация:** в турбинных ступенях с большой высотой лопаток существуют потери с веерностью. Для их снижения используют закручивание лопаток по закону постоянной циркуляции.

**Abstract:** there are losses with fanning in the turbine stages with long turbine blades. Constant circulation law can be used for their lowering.

**Ключевые слова:** турбина, потери с веерностью, закон постоянной циркуляции, закон закрутки, закрученные лопатки.

**Key words:** turbine, losses with fanning, constant circulation law, twirling law, rolling up blades.

**Введение**

Электрическая и тепловая энергия чрезвычайно важны для современных людей. Без них жить и работать было бы невозможно, поэтому сфера энергетики развивается с каждым днем. Одними из главных звеньев энергетической системы являются тепловые электрические станции. Для их эффективной работы необходимо максимально увеличить КПД и свести потери тепла к минимуму. Одной из распространенных проблем являются потери от веерности.

**Основная часть**

Веерностью турбины называют отношение длины лопаток ступени к ее среднему диаметру  $l/d$ . Пар, проходя через проточную часть турбины, сильно расширяется, а, следовательно, его удельный объем увеличивается в тысячи раз. В связи с этим, для первых ступеней турбины высота лопаток может быть несколько сантиметров, а последних – достигать более метра. Короткие лопатки, отношение среднего диаметра облопачивания  $d_k$  расчетной длине лопаток которых составляет  $d/l \geq 10$ , выполняются обычно одинакового профиля во всех сечениях по высоте. Такое профилирование лопаток называют цилиндрическим [1]. Разница окружных скоростей у корня и вершины не у них велика, так что пренебрежение ей не приводит к существенным ошибкам в расчетах и практически не влияет на треугольники скоростей (рисунок 1).

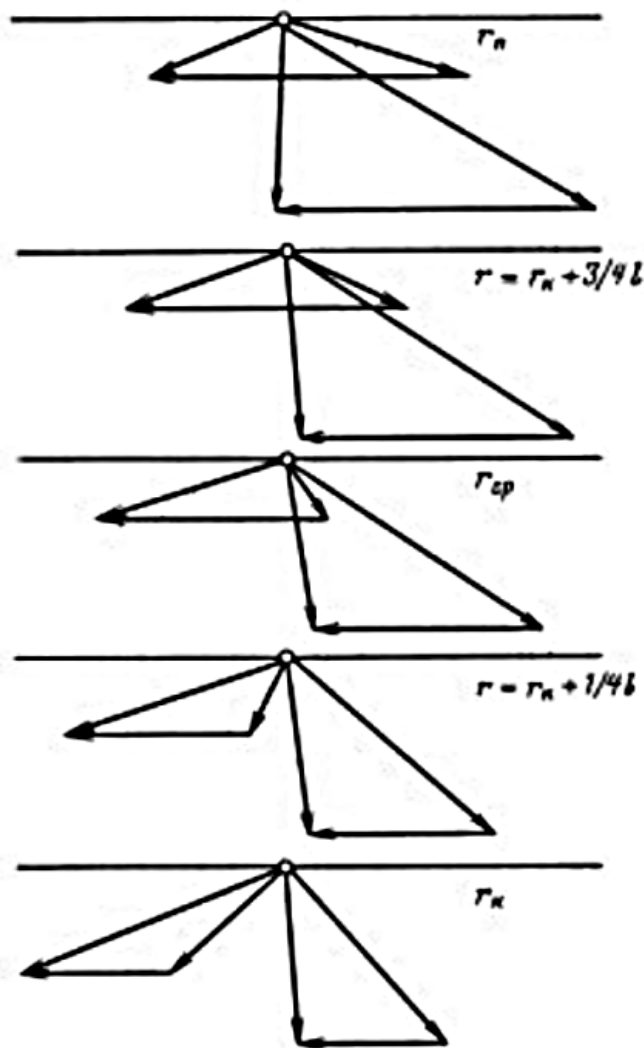


Рисунок 1 – Треугольники скоростей турбины

Но в ступенях с большой длиной лопаток при  $d/l < 10$  различие в окружных скоростях вершины и корня создает абсолютно иные условия обтекания профиля в этих сечениях.

В зазоре между соплом и входной кромкой лопатки температура и давление потока изменяются по высоте. Это происходит из-за выхода потока из сопел вращающимся около оси вала турбины, вследствие чего в потоке возникают центробежные силы, действующие на каждую частицу пара и создающие разность давлений у корня и периферии (рисунок 2).

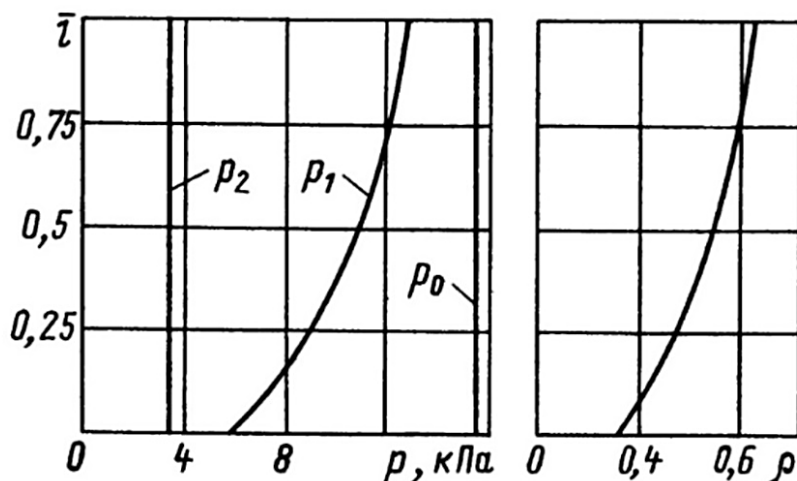


Рисунок 2 – Зависимость давлений от длины лопатки

Значит и реактивность ступени возрастает в том же направлении. Это происходит в связи с изменением треугольников скоростей у периферии ступени, где степень реактивности может достигать 70%, уменьшением вектора скорости  $C_1$  и увеличением вектора  $W_2$ . Из рисунка 3 видно, что окружная составляющая скорости  $C_2$  на выходе из ступени мала, и давление  $p_2$  практически неизменно по высоте. Постоянным будет оставаться и давление  $p_0$  на входе в ступень.

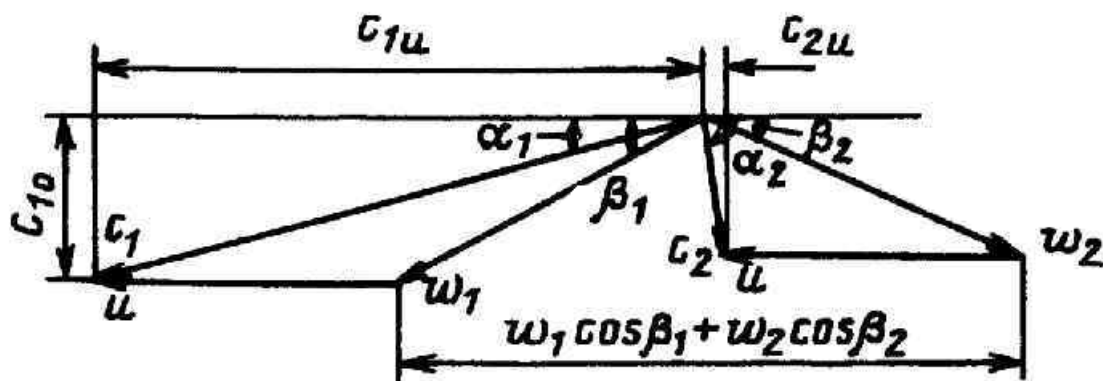


Рисунок 3 – Треугольники скоростей реактивных ступеней

Изменение реактивности обуславливается и изменением углов входа на рабочую лопатку (в корневом сечении  $\beta_1=25...40^\circ$ , на периферийном –  $120...160^\circ$ ) и разности углов  $\beta_1$  и  $\beta_2$ . У очень высоких лопаток может нарушаться оптимальность шага вдоль радиуса лопатки, которая приводит к изменению обтекания потока.

Изменения степени реактивности и окружной скорости по высоте ступени приводят к необходимости изменения профилей рабочих лопаток по высоте. Поэтому длинные лопатки обычно выполняются закрученными. Изменяющийся вдоль радиуса, профиль (рисунок 4) позволяет исключить или заметно снизить потери с верностью.

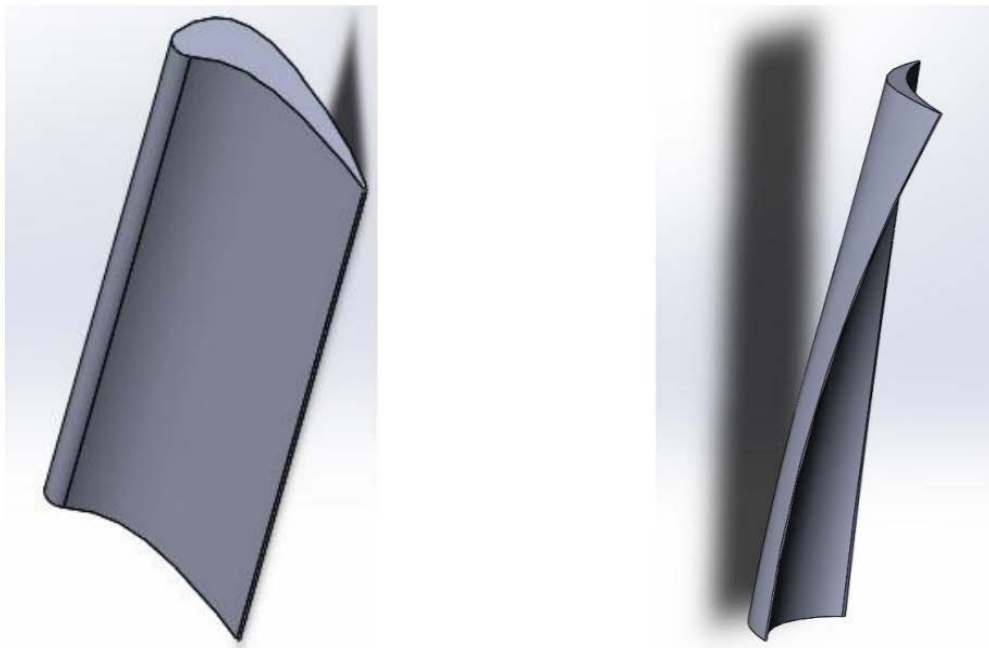


Рисунок 4 – Закрутка лопатки

Закрутка лопаток по закону постоянной циркуляции (по закону свободного вихря) получила наибольшую популярность при профилировании турбинных, компрессорных и вентиляторных ступеней. При таком течении (без вихреобразования) предполагается, что осевые составляющие абсолютных скоростей перед лопаткой  $C_{1a}$  и за лопаткой  $C_{2a}$  не изменяются на всех радиусах по высоте лопатки, откуда получается, что полное давление за рабочими лопатками и перед ними неизменно [2]. Кроме того, предполагается, что радиальная составляющая скорости потока равна нулю  $C_r = 0$ . Значит, нет никакого перетекания потока вдоль лопатки, а работа  $L_u$  в каждом сечении лопатки одинакова, т.е.  $C_{1a} = const$ ;  $C_{2a} = const$ ;  $P_2 = const$ ;  $L_u = const$ . Основное дифференциальное уравнение течения потока в этом случае запишется так:

$$0 = C_u \cdot \left[ \frac{C_u}{r} + \frac{dC_u}{dr} \right]. \quad (1)$$

Полагая,  $C_u \neq 0$  получим:

$$\frac{dr}{r} + \frac{dC_u}{C_u} = 0. \quad (2)$$

Интегрируя, найдем:

$$\ln r + \ln C_u = \ln (2C_u) = const, \quad (3)$$

откуда

$$e^{const} = C_u \cdot r \text{ и } C_u \cdot r = const. \quad (4)$$

То есть, заданное течение возможно организовать при изменении окружных составляющих пропорционально радиусу, а именно

$$C_{1u} \cdot r = const, C_{2u} \cdot r = const \quad (5)$$

Это соотношение выражает «закон площадей» или закон постоянства циркуляции  $\Gamma$  по высоте лопатки ( $\Gamma = 2\pi r \cdot C_{1u}$ ) и соответствует закону

распределения скоростей в свободном вихре. Поэтому рассматриваемый метод профилирования длинных лопаток называется методом постоянной циркуляции. Основным преимуществом ступени, выполненной по этому принципу, является постоянство удельной работы, развиваемой рабочим колесом во всех цилиндрических сечениях ступени и постоянство полной энергии в пространстве за рабочим колесом.

$$L_u = u \cdot (C_{1u} - C_{2u}) = \omega^2 r \cdot (C_{1u} - C_{2u}) = \omega(r \cdot C_{1u} - r \cdot C_{2u}) = const \quad (6)$$

Помимо этого, в корневых сечениях возможна конденсация пара из-за низких температур в прикорневой области ступени. Для правильного проектирования профилей длинных лопаток необходимо учитывать закон закрутки так, чтобы влияние жидкой фазы стремилось к минимуму. Существует несколько вариантов решений данной проблемы:

- повышение реакции в прикорневых сечениях, так как реактивные решетки не так чувствительны к влажности. Так же это снизит вероятность возникновения сверхзвуковых скоростей на выходе из сопла.
- обеспечение умеренного изменения реакции по длине лопатки, то есть применение соответствующего наклона и саблевидных сопловых лопаток МЭИ.
- выбор оптимальных относительных шагов, углов установки, толщины и формы выходных кромок с учетом их влияния на эффективность сепарации, обогрева и наддува.
- уменьшение влияния периодической нестационарности регулированием соотношения чисел сопловых и рабочих лопаток  $z_1/z_2 < 1$ .

### **Заключение**

Таким образом, можно подытожить, что в настоящее время для уменьшения потерь с веерностью в лопатках с  $d/l < 10$  используют их закрутку. Выбор данного метода обуславливается расчетами на основе закона постоянной циркуляции и закона закрутки.

### **Литература**

1. Трухний, А. Д. Стационарные паровые турбины / А. Д. Трухний. – 2ое изд. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 640 с.
2. Кириллов, И. И. Исследование пространственной структуры потока на переменных режимах работы в ступенях большой веерности / И. И. Кириллов. – 8ое изд. – М.: Энергетика, 1974. – 418 с.