

## Потери кинетической энергии потока по высоте направляющего аппарата последней ступени мощных паровых турбин.

# 06, июнь 2014

DOI: 10.7463/0614.0712815

Тюхтяев А. М.<sup>1,2</sup>, профессор, д.т.н. Ласкин А. С.<sup>2</sup>, Захаров А. В.<sup>1,2</sup>

УДК 621.1.018

<sup>1</sup>Россия, ОАО "Силовые Машины"

<sup>2</sup>СПбГПУ

[tyukhtyaev@gmail.com](mailto:tyukhtyaev@gmail.com)

[tam0@mail.ru](mailto:tam0@mail.ru)

[vobla777@mail.ru](mailto:vobla777@mail.ru)

### Введение

Разработка современной конкурентоспособной турбины в короткий срок основана на использовании автоматизированных методик проектирования. Указанные методики, помимо сокращения временных затрат, должны обеспечивать возможность корректно рассчитывать локальные и интегральные параметры с учетом пространственной структуры потока пара в проточной части турбины. Это, в частности, необходимо для того, чтобы оценить влияние изменения формы профиля пера направляющих (сопловых) и рабочих лопаток, тангенциального и меридионального наклона направляющего аппарата (НА), саблевидности и других конструкторских решений на эффективность проточной части.

Конструкции современных проточных частей паровых турбин достигли высокой степени аэродинамического совершенства [1]. Однако длительные сроки эксплуатации и большие мощности турбоустановок делают оправданным, с экономической точки зрения, поиск даже малых долей процента коэффициента полезного действия (КПД).

Доля мощности, вырабатываемая цилиндром низкого давления (ЦНД), в турбинах для ТЭС составляет приблизительно одну треть, а в турбинах для АЭС половину всей мощности турбоустановки. Коэффициент полезного действия ЦНД существенно ниже КПД цилиндров высокого и среднего давления. Относительно невысокий КПД цилиндра низкого давления указывает на то, что еще не все резервы повышения эффективности турбины исчерпаны.

Большими резервами для повышения КПД обладает последняя ступень цилиндра низкого давления мощных паровых турбин. Одним из направлений повышения эффектив-

ности последней ступени является пространственное профилирование направляющего аппарата и, в частности, наклон элементов пера направляющего аппарата (саблевидность) в тангенциальной и меридиональной плоскостях. Впервые тангенциальная саблевидность предложена в 1962 году в СССР на кафедре паровых и газовых турбин МЭИ [2], а первые мощные паровые турбины с саблевидным направляющим аппаратом выпущены фирмой «Siemens» в середине 1980-х годов. Сейчас многие ведущие производители турбин (Siemens, Alstom, Skoda, Ansaldo, Mitsubishi, «Силовые Машины», и др.) применяют направляющие аппараты последней ступени ЦНД со сложной комбинированной меридиональной и тангенциальной саблевидностью. Направляющий аппарат с комбинированной саблевидностью позволяет заметно снизить уровень потерь кинетической энергии (КЭ) по сравнению с направляющим аппаратом с прямыми радиально установленными выходными кромками, что может привести к приросту КПД ступени на 1-2% [3-5].

Завершающим этапом для выбора наиболее удачной комбинации меридиональной и тангенциальной саблевидности целесообразно использовать сопоставление распределений по высоте коэффициентов потерь кинетической энергии.

## 1. Постановка задачи и методы расчета

В рамках данной работы были поставлены задачи: оценить влияние комбинированной тангенциальной и меридиональной саблевидности на изменение степени реактивности  $\rho_i$ , статического давления  $p_1$ , числа Маха  $M_{c1}$ , осредненного по площади в окружном направлении массового расхода пара  $\overline{G}_1$ , угла выхода потока из НА  $\alpha_1$  и угла наклона линий тока в радиальном направлении  $\gamma_1$  в контрольном сечении за направляющим аппаратом последней ступени мощной паровой турбины; создать процедуру автоматического вычисления распределения коэффициентов потерь кинетической энергии по высоте направляющего аппарата в пакете Numeca; сопоставить изменение распределения потерь кинетической энергии по высоте НА с изменением локальных и интегральных параметров потока в случае применения комбинированной саблевидности; опираясь на полученные результаты, получить новую, более эффективную форму направляющего аппарата последней ступени.

Основой для проведения численного исследования стала последняя ступень мощной паровой турбины с рабочей лопаткой длиной 1000 мм. Для исследования выбрана одна из первых модификаций этой ступени, разработанная на Ленинградском Металлическом заводе (ЛМЗ). Такая ступень представляет интерес тем, что направляющий аппарат выполнен с прямолинейной радиально расположенной выходной кромкой без применения саблевидности и является прекрасной базой для сравнения. Исходную геометрическую форму пера лопатки направляющего аппарата, для удобства, обозначим литерой А. Найденный, более эффективный вариант геометрической формы пера лопатки направляющего аппарата, полученный на основе варианта А путем применения комбинации тангенциальной и меридиональной саблевидности, обозначим литерой Б.

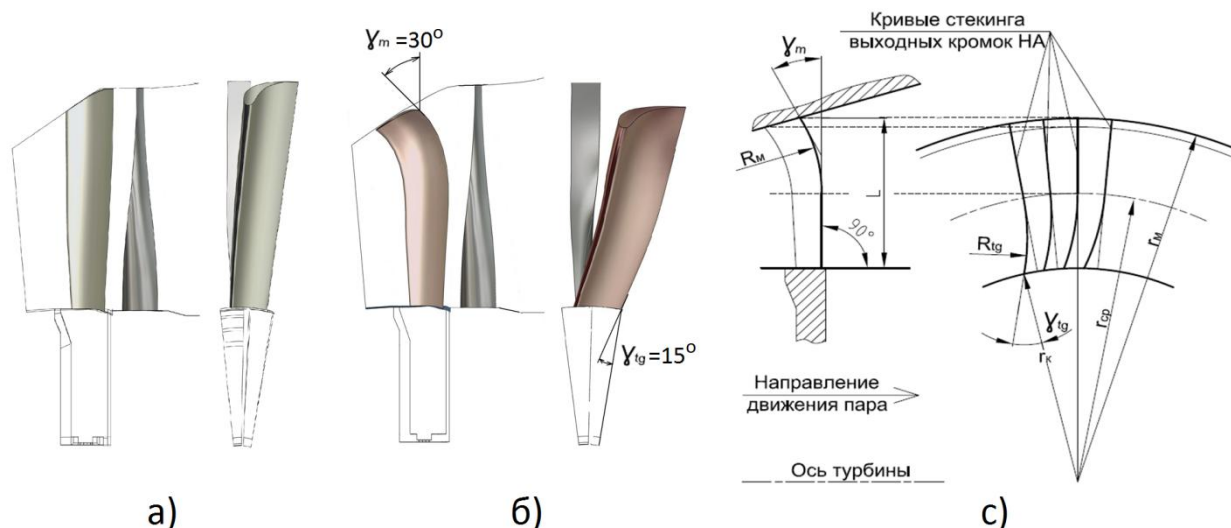
Меридиональная и тангенциальная саблевидности, эффект от совместного применения которых изучается в данной работе, представляют собой переменные по высоте наклоны элементов пера направляющего аппарата в меридиональной и тангенциальной плоскостях. В среднем сечении направляющего аппарата при относительной высоте лопатки  $\bar{l} = 0.5$ , где влияние вторичных течений минимально, углы тангенциального и меридионального наклона приняты равными нулю. В рамках данной задачи тангенциальная саблевидность применена в нижней половине направляющего аппарата, а меридиональная в верхней.

Для удобства представления закона изменения формы пера направляющего аппарата, определенного комбинированной саблевидностью, возможно использовать понятие кривой стекинга. Кривой стекинга, в рамках данной задачи, называется кривая, соединяющая центры радиусов выходной кромки в ее поперечных сечениях.

Проекция кривой стекинга как в меридиональной, так и в тангенциальной плоскостях представляет собой комбинацию прямой линии и дуги. Радиусы кривизны дуг  $R_m$  и  $R_{tg}$  (рис. 1) могут быть определены по формулам:

$$R_m = \frac{r_m^2 - r_{cp}^2}{2r_m \sin \gamma_m}, \quad R_{tg} = \frac{r_{cp}^2 - r_k^2}{2r_k \sin \gamma_{tg}}, \quad (1, 2)$$

где  $r_k, r_{cp}, r_m$  - радиусы корневого, среднего и верхнего сечения направляющего аппарата;  $\gamma_m$  и  $\gamma_{tg}$  - углы наклона пера направляющего аппарата в периферийном сечении в меридиональной плоскости и в корневом сечении в тангенциальной плоскости.



**Рис. 1.** а) Исходный вариант А направляющего аппарата с прямой, радиально установленной выходной кромкой; б) вариант Б направляющего аппарата с комбинированной саблевидностью; в) условная схема комбинированной саблевидности

Возможность применения подобных формул для описания форм образующих направляющего аппарата при применении саблевидности подробно описана в [2]. Применене-

ние дуги для описания саблевидности также значительно упростило создание геометрической модели пера направляющего аппарата, сократив количество переменных, характеризующих исследуемую комбинацию саблевидности, до двух:  $\gamma_m$  и  $\gamma_{tg}$ .

Для поиска наиболее эффективного с точки зрения КПД ступени варианта Б при постоянном массовом расходе пара через ступень на основе пакета Numesa и программы оптимизации IOSO, создана автоматизированная процедура поиска, включающая в себя все этапы численного эксперимента: создание геометрической модели, подготовку и проведение газодинамического расчета и анализ полученных результатов. Благодаря автоматизации процесса удалось значительно сократить время проведения численного исследования. Для того чтобы один раз выполнить все этапы процедуры требуется менее 23 минут. За 8 суток непрерывной работы в процессе выполнения численного эксперимента исследованы 500 различных вариантов формы пера направляющего аппарата.

При проведении исследования величины углов  $\gamma_m$  и  $\gamma_{tg}$  менялись в интервале от 0 до 30 градусов, а угол установки профиля  $\alpha_{ym} = 54^\circ \pm 1^\circ$ . Возможность изменение угла установки профиля позволила управлять размером проходной площади соплового аппарата, и тем самым обеспечивать постоянство массового расхода через исследуемую ступень при различных комбинациях углов  $\gamma_m$  и  $\gamma_{tg}$ .

В качестве целевой функции оптимизации принят относительный КПД ступени  $\eta_{oi}$  [6-8].

$$\eta_{oi} = \frac{\overline{H}_i}{\overline{H}_0} = \frac{\overline{h}_0^* - \overline{h}_2^*}{\overline{h}_0^* - \overline{h}_{2it}}, \quad (3)$$

где  $\overline{H}_0$  - располагаемый перепад энтальпий,  $\overline{H}_i$  - используемый перепад энтальпий пара,  $\overline{h}_0^*$ ,  $\overline{h}_2^*$  - полная энтальпия пара перед и за ступенью,  $\overline{h}_{2it}$  - энтальпия пара за ступенью при изэнтропическом расширении. Осреднение величин в формуле (3) проведено по массовому расходу [4 - 7].

Газодинамические расчеты движения потока пара в ступени проводились в программе Numesa Fine Turbo при следующих ограничениях и настройках (табл. 1):

**Таблица 1.** Граничные условия и параметры газодинамического расчета

|  |   |
|--|---|
| Полная энтальпия пара перед ступенью, $\overline{h}_0^*$ Дж/кг | 2553560   |
| Статическое давление пара перед ступенью, $\overline{p}_0$ Па  | 13790   |
| Степень сухости перед ступенью, $\overline{x}_0$               | 0,98  |
| Число Рейнольдса перед ступенью, <b>Re</b>                     | 39000   |
| Расход пара, <b>G</b> кг/с                                     | 55,6  |
| Статическое давление пара за ступенью, $\overline{p}_2$ Па     | 3300  |
| Частота вращения, $\omega$ об/мин                              | 3000  |
| Модель турбулентности  | SST Ментера с расширенными пристеночными функциями (extended wall function) |

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| Постановка задачи               | стационарная, трехмерная                                |
| Модель среды                    | Конденсируемый влажный пар без учета образования капель |
| Критерий расчетной сетки, $Y^+$ | 5...10  |
| Критерий сходимости             | $<10^{-4}$  |

Расчеты движения потока пара в ступени выполнены для одного межлопаточного канала с заданием условий периодичности в окружном направлении. Для передачи параметров течения пара на границе условной области течения пара в направляющем аппарате (статоре) и рабочем колесе (роторе) использован интерфейс «mixing plane». Также выполнено моделирование протечек пара в диафрагменном уплотнении и в зазоре между бандажом рабочего колеса и статором.

## 2. Способ вычисления распределения потерь кинетической энергии по высоте направляющего аппарата

Значение относительного КПД ступени позволяет оценить лишь общий вклад от применения комбинации тангенциальной и меридиональной саблевидности в повышение эффективности работы всей ступени. Для ответа на вопрос, какой вклад в изменение КПД ступени вносит локальное изменение геометрической формы пера направляющего аппарата, необходимо проанализировать изменение распределения потерь кинетической энергии по высоте направляющего аппарата.

Существуют различные подходы к вычислению распределения потерь кинетической энергии по высоте направляющего аппарата. Наиболее обоснованным с физической точки зрения является подход, основанный на выделении в трехмерной области течения пара условных линий тока и определении потерь кинетической энергии при движении элементарного количества пара от одной контрольной поверхности к другой вдоль каждой линии. Но поскольку течение в направляющем аппарате имеет турбулентный характер и осложнено отрывами потока, вторичными течениями, возникновением скачков уплотнений и образованием вихревых структур различного масштаба, определение линий тока в трехмерной области может сильно усложнить задачу и привести к неверным результатам.

Так как тангенциальная и меридиональная саблевидность влияет преимущественно на изменение параметров потока в радиальном направлении, для оценки влияния саблевидности на структуру течения в направляющем аппарате изменение параметров по шагу решетки можно учесть за счет их осреднения по шагу решетки. В этом случае задача вычисления распределения потерь кинетической энергии по высоте направляющего аппарата значительно упрощается.

Анализ результатов газодинамических расчетов течения пара в исследуемой ступени с различными формами пера направляющего аппарата выполнен в программе Numesa CFView. Для вычисления распределения по высоте потерь кинетической энергии в этой программе написан код на интегрированном языке программирования Python [13], основанный на следующей методике:

1) В меридиональной плоскости, используя результаты осреднения параметров в окружном направлении, определяется форма и положение условных линии тока. (Representation/Vector line/Local)

2) Вдоль каждой линии тока вычисляется распределение параметров потока. (VectorLines/Parameters/General/Color/Custom Quantity/Static Pressure, Magnitude of V, ...; SelectStreamLineCurves(vect\_line\_name)/VectLineCartPlot(vect\_line\_name)) .

3) Для каждой линии тока, на отрезке между контрольными сечениями, используя распределения параметров, полученных в пункте (2), определяются значения коэффициентов потерь кинетической энергии  $\bar{\zeta}_c$  в соответствии с [6]:

$$\bar{\zeta}_c = 1 - \frac{c_1^{-2}}{2(h_0^* - h_{1r})}, \quad (4)$$

где  $\bar{c}_1$  - абсолютная скорость истечения пара из направляющего аппарата;  $\bar{h}_0^*$  - полная энтальпия пара перед направляющим аппаратом;  $\bar{h}_{1r}$  - энтальпия пара за направляющим аппаратом при изоэнтропическом расширении. В данном случае применение одномерного подхода для вычисления коэффициентов потерь вдоль линии тока допустимо при использовании способа осреднения параметров потока в окружном направлении по массовому расходу [9 – 12, 14].

4) Распределение потерь КЭ по высоте направляющего аппарата определяется на основе вычисления коэффициентов потерь КЭ для элементарного количества пара при движении вдоль каждой линии тока.

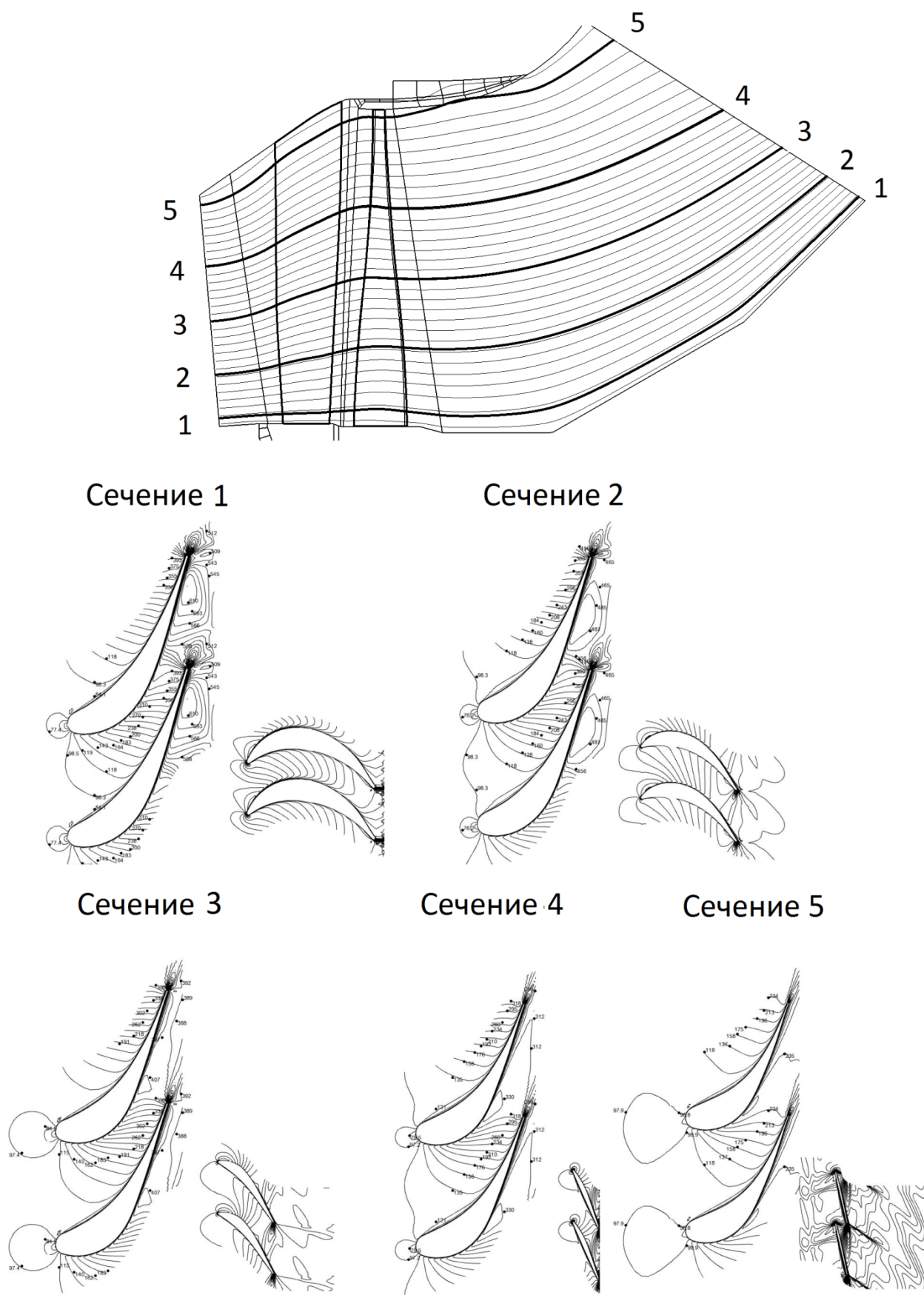
### 3. Численные результаты

В результате численного эксперимента для исходного варианта А пера направляющего аппарата найдена комбинация углов  $\gamma_m = 30^\circ$  и  $\gamma_{tg} = 15^\circ$ , позволившая при изменении варианта А получить новый вариант Б формы пера НА. Коэффициент полезного действия ступени  $\eta_{oi}$  с направляющим аппаратом Б по сравнению с исходным вариантов увеличился на 1,8%, а суммарные потери кинетической энергии в направляющем аппарате  $\bar{\zeta}_c$  уменьшились на 1,6% (табл. 2).

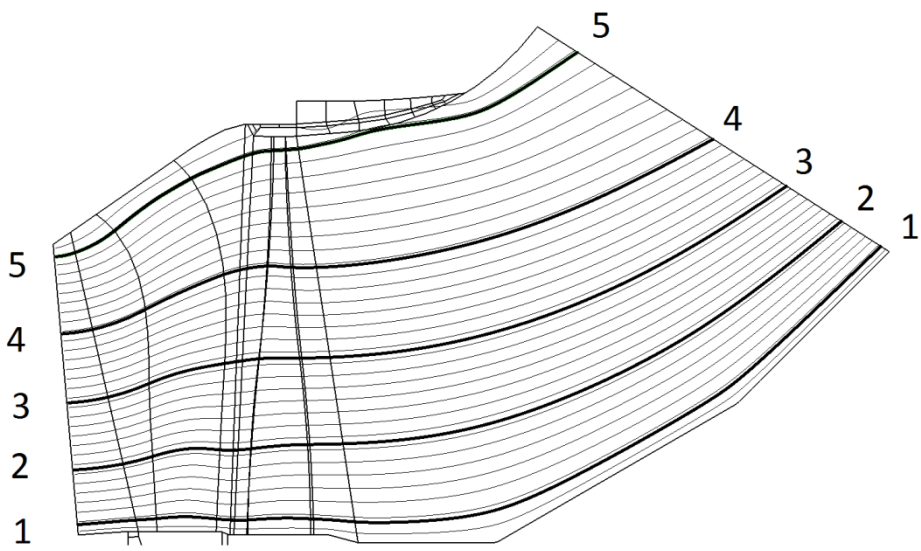
Таблица 2. Относительный КПД ступени и потери кинетической энергии в НА

| Форма пера НА                                 | $\eta_{oi}$ | $\bar{\zeta}_c$ |
|---|-------------|-----------------|
| Вариант А<br>с прямолинейной выходной кромкой | 69,0 %      | 6,78%           |
| Вариант Б<br>с комбинированной саблевидностью | 70,8%       | 5,18%           |

Изменение формы пера направляющего аппарата при применении саблевидности влечет за собой изменение каналов течения пара в решетке направляющего аппарата. На рисунках 2а и 2б показаны осредненные по шагу условные линии тока. Выбраны пять линий тока, вдоль которых построены осесимметричные секущие поверхности. Для каждой такой поверхности выполнены развертки сечений решетки направляющего аппарата.

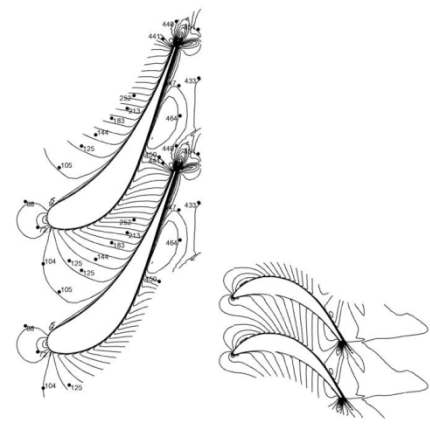
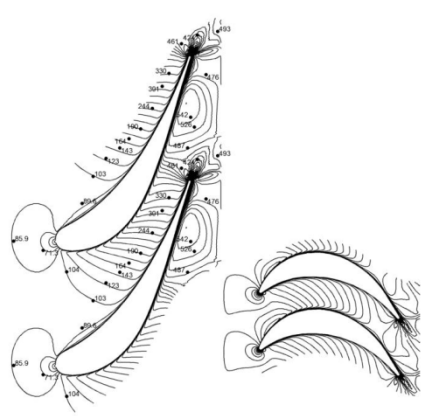


**Рис. 2а.** Условные линии тока и сечения ступени с направляющим аппаратом с радиально установленной выходной кромкой



Сечение 1

Сечение 2



Сечение 3

Сечение 4

Сечение 5

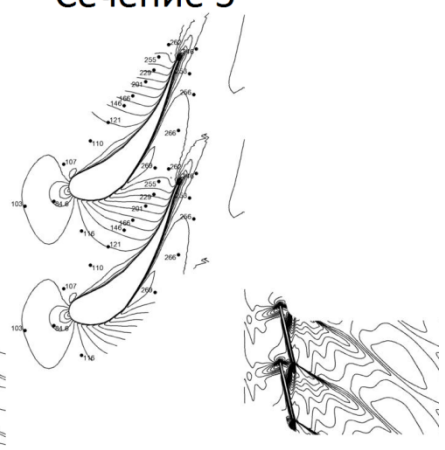
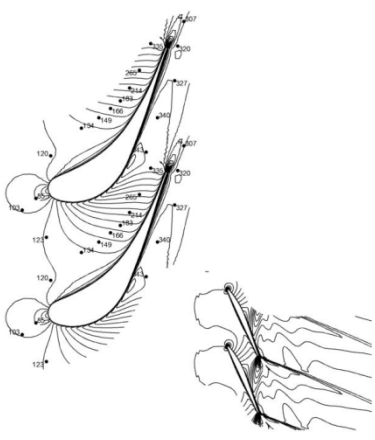
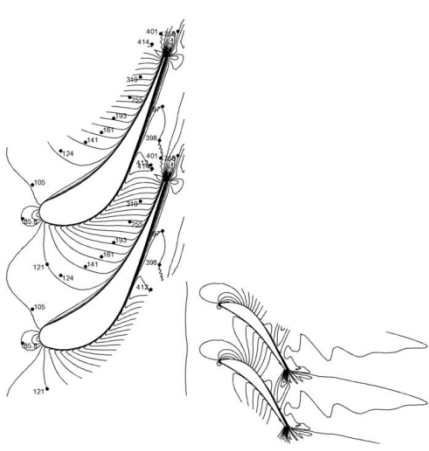
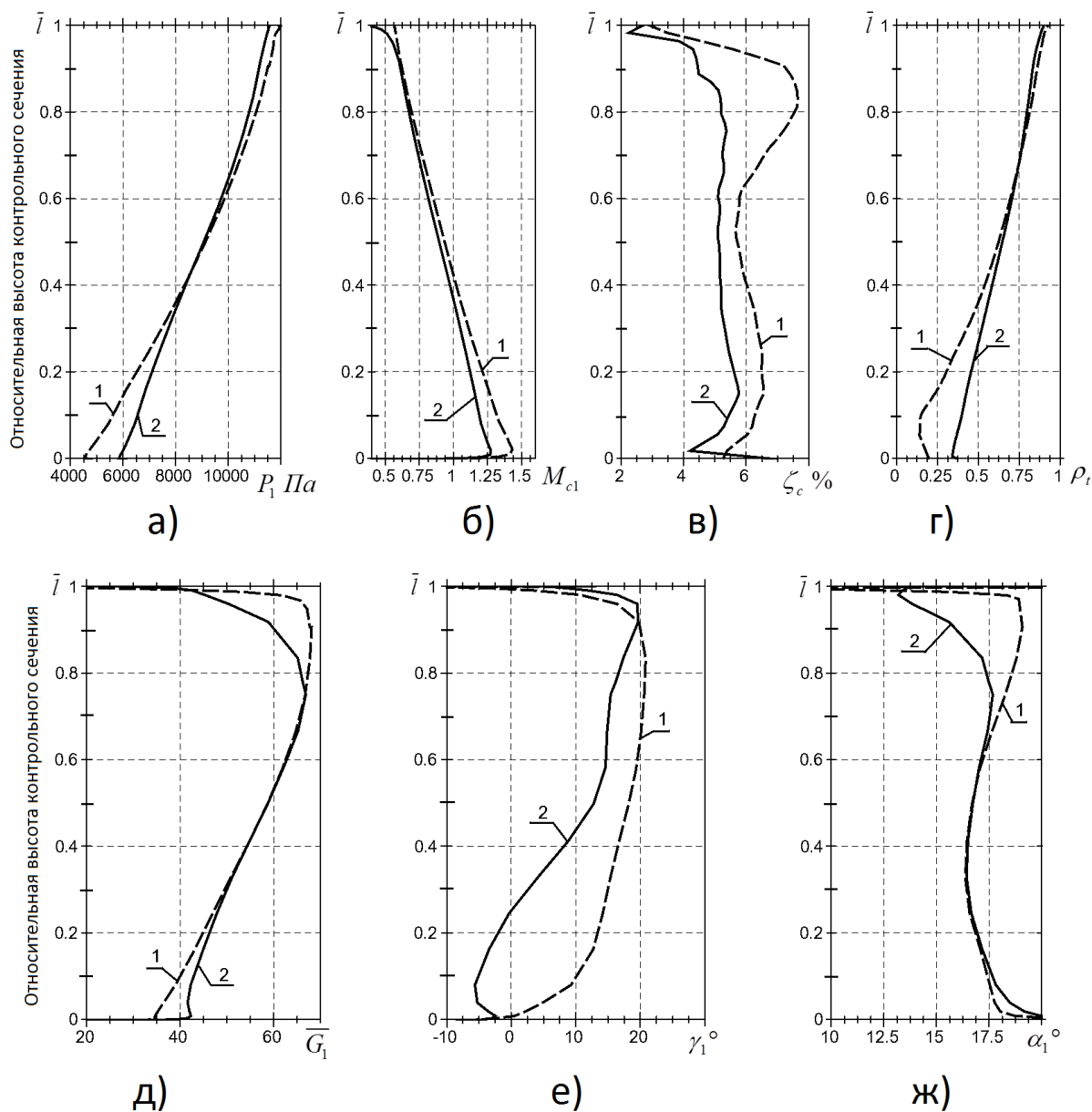


Рис. 26. Условные линии тока и сечения ступени с направляющим аппаратом с комбинированной саблевидностью



Форма каналов течения пара как в исходном А, так и в новом Б направляющем аппарате осталась конфузорной, характер распределения параметров потока в сечениях изменился не существенно.



**Рис. 3.** Распределение по высоте контрольного сечения (1) за направляющим аппаратом статического давления (а), абсолютного числа Маха (б), массового расхода (д), угла наклона линий тока в радиальном направлении (е), угла выхода потока из направляющего аппарата (ж); распределение коэффициентов потерь кинетической энергии по высоте направляющего аппарата (в); распределение реактивности по высоте ступени. 1 – направляющий аппарат с прямолинейной, радиально установленной выходной кромкой; 2 – направляющий аппарат с комбинированной саблевидностью:  $\gamma_m = 30^\circ$ ,  $\gamma_{ig} = 15^\circ$

Для анализа результатов газодинамического расчета, выполненного в пакете Numesa Fine Turbo, использована программа Numesa CFView. В этой программе операция осреднения параметров потока пара по шагу решетки предусмотрена разработчиком. В программе Numesa CFView результаты осреднения представляются в меридиональной плоскости сечения исследуемой проточной части.

Сравнение распределения коэффициентов потерь кинетической энергии для рассматриваемых вариантов показало, что наибольший эффект от применения комбинированной саблевидности достигается в периферийной и корневой областях, а наименьший в среднем сечении.

**В среднем сечении** для варианта Б направляющего аппарата по сравнению с вариантом А уровень потерь кинетической энергии снизился приблизительно на 0,5%. При этом значения реактивности  $\rho_1$ , числа Маха  $M_{c1}$ , относительного массового расхода  $\bar{G}_1$  и угла выхода потока из направляющего аппарата  $\alpha_1$  почти не изменились (рис. 3). Угол наклона линий тока в радиальном направлении  $\gamma_1$  уменьшился на 4 градуса (рис. 3е), что, в свою очередь, привело к уменьшению хорды сечения 3 профиля направляющего аппарата Б (рис. 2б) на 2%. Это показывает, что пар, двигаясь в среднем сечении от одной контрольной поверхности к другой, проходит через направляющий аппарат по более короткой траектории, теряя меньше энергии на трение о поверхности канала.

**В нижней части** при относительной высоте направляющего аппарата  $\bar{l} < 0.4$  локальное уменьшение коэффициента потерь кинетической энергии в направляющем аппарате Б по сравнению с исходным направляющим аппаратом А достигает 1%. Снижение потерь кинетической энергии в нижней части связано с уменьшением интенсивности вторичных течений из-за уменьшения градиента давления  $p_1$  (рис. 3а) и степени реактивности  $\rho_1$  (рис. 3г) по высоте направляющего аппарата и поджатия потока к корню. Степень реактивности в корневом сечении  $\rho_1$  выросла (рис. 3г) на 17%, а локальное значение осредненного по шагу массового расхода пара  $\bar{G}_1$  увеличилось на 20%. На поджатие потока к корню также указывает изменение угла наклона линий тока в радиальном направлении  $\gamma_1$  в сторону корневого сечения (рис. 3е), которое достигает 15 градусов. Увеличение массового расхода пара в корневой области при относительной высоте направляющего аппарата  $\bar{l} < 0.3$  привело к росту статического давления  $p_1$  в контрольном сечении за направляющим аппаратом. Увеличение статического давления  $p_1$  при неизменном статическом давлении пара перед направляющим аппаратом  $p_0$  привело к уменьшению разницы давлений перед и за направляющим аппаратом, что повлекло за собой снижение числа Маха  $M_{c1}$  в корневой области. Снижение числа Маха  $M_{c1}$  свидетельствует об уменьшении интенсивности скачков уплотнений и тем самым снижении потерь кинетической энергии  $\zeta_c$  в корневой области.

**В периферийной области** направляющего аппарата, благодаря применению комбинированной саблевидности, локальное уменьшение значения коэффициента потерь кинетической энергии  $\zeta_c$  достигает 2,5%. Уменьшение потерь кинетической энергии на периферии связано со снижением интенсивности вторичных течений и уменьшением области диффузорного течения в пространстве перед направляющим аппаратом из-за переменного по высоте наклона элементов пера направляющего аппарата в меридиональной плоскости

против направления движения пара в ступени. Такой наклон элементов пера направляющего аппарата (меридиональная саблевидность) позволил выполнить поджатие потока к периферии, о чем свидетельствует локальное увеличение угла наклона линий тока в радиальном направлении  $\gamma_1$  (рис. 3е). Применение меридиональной саблевидности также привело к уменьшению относительной высоты направляющего аппарата, что сказалось на уменьшении пропускной способности периферийной области и перераспределению расхода пара  $\overline{G}_1$  по высоте направляющего аппарата (рис. 3д). Локальное снижение приведенного массового расхода в периферийной области способствует уменьшению количества эрозионно опасной влаги, а увеличение зазора между рабочим колесом и направляющим аппаратом - большему разгону капель образующейся влаги. Увеличение скорости капель влаги приближает их траекторию движения к направлению движения пара, уменьшая тем самым силу удара капель о входную кромку рабочего колеса.

Применение комбинированной саблевидности (вариант Б) оказывает влияние на течение не только в направляющем аппарате, но также приводит к изменению угла выхода потока из направляющего аппарата  $\alpha_1$  (рис. 3ж), и как следствие, условий натекания пара на рабочее колесо. Повышение реактивности  $\rho_i$  в корневом сечении расширяет область стабильной работы РК при частичных нагрузках.

## Выводы

- Совместное использование газодинамического пакета Numesa и программы многокритериальной оптимизации IOSO позволило создать автоматизированную процедуру и существенно сократить время, необходимое для поиска наиболее эффективной формы пера направляющего аппарата с целью повышения КПД ступени и уменьшения потерь кинетической энергии.

- В результате проведения численного эксперимента найдено соотношение углов  $\gamma_m = 30^\circ$  и  $\gamma_{tg} = 15^\circ$ , которое позволило повысить КПД последней ступени мощной паровой турбины с рабочей лопаткой длиной 1000 мм на 1,8% и снизить уровень суммарных потерь кинетической энергии в направляющем аппарате  $\overline{\zeta}_c$  на 1,6%.

- Встроенный в программу обработки результатов газодинамического расчета Numesa CFView язык программирования Python позволил автоматизировать процесс вычисления потерь кинетической энергии для отдельных условных линий тока и существенно сократить время на расчет распределения потерь кинетической энергии по высоте направляющего аппарата.

- Применение комбинированной саблевидности привело к уменьшению массового расхода пара в периферийной области и, за счет этого, увеличению массового расхода пара в корневой области. Расход пара в среднем сечении остался на прежнем уровне.

- Увеличение расхода пара в корневой области привело к росту статического давления в этой области и уменьшению градиента статического давления пара по высоте направляющего аппарата.

- Перераспределение расхода пара и уменьшение в радиальном направлении градиента давления привело к увеличению степени реактивности в нижней трети направляющего аппарата и снижению градиента степени реактивности по высоте направляющего аппарата.

- Увеличение статического давления пара в корневой области за направляющим аппаратом при неизменном статическом давлении перед направляющим аппаратом привело к снижению числа Маха и уменьшению потерь кинетической энергии в корневой области.

- Уменьшение градиента статического давления пара и поджатие потока пара к корню привело к снижению интенсивности вторичных течений и уменьшению потерь кинетической энергии.

- Применение меридиональное саблевидности позволило выполнить локальное поджатие потока пара к периферийному обводу проточной части, снизить интенсивность вторичных течений в периферийной области и уменьшить потери кинетической энергии.

- Использование меридиональной саблевидности позволило увеличить зазор между направляющим аппаратом и рабочим колесом в периферийной области, что должно снизить опасность эрозионного износа входных кромок рабочего колеса.

- Повышение степени реактивности в корневом сечении должно расширить область стабильной работы ступени на частичных нагрузках.

### Список литературы

1. Лапшин К.Л. Оптимизация проточных частей паровых турбин с применением «интегральных» сопловых лопаток // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 1. С. 61-66.
2. Дейч М.Е., Губарев А.В., Филиппов Г.А., Ван Чжун-Ци. Новый метод профилирования направляющих решеток ступеней с малыми  $d/l$  // Теплоэнергетика. 1962. № 8. С. 42-47.
3. Борисов Ф.П., Вереvский В.И., Иванов М.Я. Трояновский Б.М., Карелин А.М., Цястон А.П. Пространственное профилирование сопловой решетки последней ступени мощной паровой турбины // Теплоэнергетика. 1991. № 8. С. 51-54.
4. Дейч М.Е. Газодинамика решеток турбомашин. М.: Энергоатомиздат, 1996. 528 с.
5. Turbine Performance Improvement by Full 3-D Design Blades // Technical Review Mitsubishi. Ind. 1989. Vol. 1. P. 9-12.
6. Щегляев А.В. Паровые турбины. М.: Энергия, 1976. 368 с.
7. Лапшин К.Л. Оптимизация проточных частей паровых и газовых турбин. СПб.: СПбГПУ, 2011. 177 с.
8. Кириллов И.И. Теория турбомашин. Л.: Машиностроение, 1972. 533 с.
9. Кофман В.М. Определение коэффициента полезного действия турбины ГТД по параметрам неравномерных газовых потоков // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 5 (50). С. 28-40.

10. Кофман В.М. Сравнительный анализ способов осреднения при обработке параметров неравномерного воздушного потока на входе в ГТД // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 12, № 2 (31). С. 35-42.
11. Седов Л.И., Черный Г.Г. Об осреднении неравномерных потоков газа в каналах // Теоретическая гидромеханика: сб. ст. Т. 12, вып. 4. М.: Оборонгиз, 1954. С. 17-30.
12. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1967. 428 с.
13. Numeca International CFView V8. Flow Visualization and Post-Processing. User Manual. Belgium: NUMECA International, 2011.
14. Ершов С.В., Саки Р. К расчету потерь в проточных частях турбомашин // Вестник НТУ «ХПИ». 2013. № 14 (988). С. 1-18.

**Spanwise distribution of energy losses in steam turbine last stage nozzle**

# 06, June 2014

DOI: 10.7463/0614.0712815

A.M. Tyukhtyaev<sup>1,2</sup>, A.S. Laskin<sup>2</sup>, A.V. Zakharov<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Power Machines OJSC St.Petersburg, 195009, Russian Federation<sup>2</sup>St.Petersburg State Polytechnical University 195251, St.Petersburg, Russian Federation[tyukhtyaev@gmail.com](mailto:tyukhtyaev@gmail.com)[tam0@mail.ru](mailto:tam0@mail.ru)[vobla777@mail.ru](mailto:vobla777@mail.ru)

In this work a numerical experiment is conducted to study the effect of the combination of complex nozzle sweep and lean on the performance of the steam turbine LPC last stage.

To perform the numerical experiment, an automated search procedure has been developed using the CFD package NUMECA and the program IOSO. This procedure is designed to search for a combination of the nozzle tilt angles, which are key ones to determine the laws of the nozzle sweep and lean. The target function of the optimization process is the maximum efficiency level at constant mass flow rate of steam. The sweep and lean angles and the stagger of the nozzle were varying values during the search.

To calculate the span-wise distribution of kinetic energy losses in last stage nozzle on the basis of CFD calculation of vapor flow, using the Numeca CFView software, the article offers a method based on the calculation of steam parameters along the individual conditional streamlines. In the CFView program this method is implemented using the integrated programming language Python.

As a result of the numerical experiment, the combination of angles has been found to improve the efficiency level by 1.8%, and reduce the total kinetic energy losses in the nozzle by 1.6%.

Application the combined sweep and lean resulted in a decrease in the mass flow rate of steam in the shroud area, and due to this, increase in the hub area. The redistribution of the mass flow rate of steam and preload of the vapor flow to the hub led to decreasing the static pressure gradient and the reactivity degree in the nozzle height. Reduction of the pressure gradient and the preload of the vapor stream to the hub led to a decrease in the intensity of secondary flows at the hub area. The local preload of the steam flow to the shroud together with decreasing pressure gradient resulted in reduced intensity of secondary flows and reduced losses of kinetic energy in

the shroud area. Increase in the static pressure in the lower third of the nozzle in the section between the nozzle and the bucket under constant static pressure before the nozzle led to a decrease of the Mach number and the decrease in the intensity of shock waves.

An increasing gap between the nozzle and bucket in the shroud area because of the nozzle sweep should reduce the erosive wear of the leading edge of the last stage bucket.

---

**Publications with keywords:** [steam turbine](#), [loss of energy](#), [last stage nozzle](#), [stream lines](#)  
**Publications with words:** [steam turbine](#), [loss of energy](#), [last stage nozzle](#), [stream lines](#)

---

## References

1. Lapshin K.L. [Optimization of flow parts of steam turbines using “integral” nozzle blades]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU - St. Petersburg State Polytechnical University Journal*, 2013, no. 1, pp. 61–66. (in Russian).
2. Deych M.E., Gubarev A.V., Filippov G.A., Van Chzhun-Tsi. [The new profiling method of nozzle blades of stages with small d/l]. *Teploenergetika*, 1962, no. 8, pp. 42-47. (in Russian).
3. Borisov F.P., Verevskiy V.I., Ivanov M.Ya. Troyanovskiy B.M., Karelin A.M., Tsyaston A.P. [Spatial profiling of nozzle array of the last stage of the powerful steam turbine]. *Teploenergetika*, 1991, no. 8, pp. 51-54. (in Russian).
4. Deych M.E. *Gazodinamika reshetok turbomashin* [Gasdynamics of blade rows for turbomachinery]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1996. 528 p. (in Russian).
5. Turbine Performance Improvement by Full 3-D Design Blades. *Technical Review Mitsubishi Ind.*, 1989, vol. 1, pp. 9-12.
6. Shcheglyayev A.V. *Parovye turbiny* [Steam turbines]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 368 p. (in Russian).
7. Lapshin K.L. *Optimizatsiya protochnykh chastey parovykh i gazovykh turbin* [Optimization of flow parts for steam and gas turbines]. St. Petersburg, St. Petersburg State Polytechnical University Publ., 2011. 177 p. (in Russian).
8. Kirillov I.I. *Teoriya turbomashin* [Theory of turbomachinery]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1972. 533 p. (in Russian).
9. Kofman V.M. [Determining the GTE’s turbine efficiency according to the parameters of irregular gas flow]. *Vestnik UGATU*, 2012, vol. 16, no. 5 (50), pp. 28-40. (in Russian).
10. Kofman V.M. [Comparative analysis of the methods of averaging while processing the parameters of irregular air flow at the gas turbine engine input]. *Vestnik UGATU*, 2009, vol. 12, no.2 (31), pp. 35-42. (in Russian).

11. Sedov L.I., Chernyy G.G. [On averaging nonuniform gas flows in channels]. *Teoreticheskaya gidromekhanika: sb. st. T. 12, vyp. 4* [Theoretical Hydromechanics: coll. art. Vol. 12, no. 4]. Moscow, Oborongiz Publ., 1954, pp. 17-30. (in Russian).
12. Sedov L.I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike* [Similarity and dimensional methods in mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 428 p. (in Russian).
13. Numeca International CFView V8. Flow Visualization and Post-Processing. User Manual. Belgium, NUMECA International, 2011.
14. Ershov C.V., Saki R. [Calculation of losses in flow paths in turbomachines]. *Vestnik NTU "KhPI"*, 2013, no. 14 (988), pp. 1-18. (in Russian).