



УДК 621.165

Н.А. Забелин, Г.Л. Раков, В.А. Рассохин,
А.А. Себелев, М.В. Смирнов

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ В МАЛОРАСХОДНЫХ ТУРБИННЫХ СТУПЕНЯХ КОНСТРУКЦИИ ЛПИ

Необходимость развития малой энергетики и технологий энергосбережения ставит перед промышленностью и наукой все более сложные и нестандартные задачи. Зачастую их решение в рамках принятых представлений дает неточный, а иногда и абсолютно неверный результат. Необходимо применять новые методики и подходы в инженерном анализе. Об опыте разработки и применения одной из таких методик и пойдет речь в данной статье.

Опыт, накопленный современной наукой в вопросах проектирования энергетических турбин, весьма велик. Внутренний КПД традиционных энергетических турбин зачастую достигает 90 %. Однако в области малых мощностей применение этого опыта оказывается неэффективным из-за небольших расходов рабочего тела, малых высот проточной части и, как следствие, высоких потерь и низкого КПД подобных ступеней (не более 40 %). Применение ступеней с парциальным подводом рабочего тела позволяет несколько уменьшить вторичные потери в проточной части, однако парциальность связана с потерями на трение и вентиляцию, и потому такие ступени также не показывают высокого КПД.

Один из возможных путей решения этой проблемы — реализация концепции малорасходных ступеней конструкции ЛПИ [1] (рис. 1).

Идея ступеней ЛПИ принадлежит профессору И.И. Кириллову, разработка и исследование

высокоэффективных ступеней осуществлены под руководством профессора В.А. Рассохина.

Отличительные черты ступеней такого класса: малые углы выхода потока из соплового аппарата (СА) — $\alpha_1 = 3-5^\circ$; малые углы входа в рабочее колесо (РК) — $\beta_1 = 8-14^\circ$; большие углы поворота потока в РК — $\Omega = 151-164^\circ$; большой относительный шаг сопловых и рабочих лопаток (t/b больше 4 и 1,1 соответственно), трансзвуковые и сверхзвуковые скорости в СА и РК.

Поскольку такая ступень способна переработать значительный перепад энтальпий (до 330 кДж/кг и выше), общее количество ступеней в проектируемой установке снижается.

До последнего времени проектировочные расчеты ступеней ЛПИ проводились в одномерной постановке с формированием цилиндрических поверхностей косо́го среза сопла.

Аналитическое описание пространственной структуры потока в этих условиях — сложная и малоизученная в турбостроении задача. Малые углы α_1 приводят к нарушению естественного характера течения и к снижению внутреннего КПД ступени. Использование трехмерных газодинамических расчетов с помощью программного комплекса CFX позволяет повысить качество проектирования проточных частей (ПЧ) ступеней ЛПИ и обеспечить их конкурентоспособность.

Первая детально исследованная ступень — ступень ЛПИ диаметром 126 мм с углом выхода

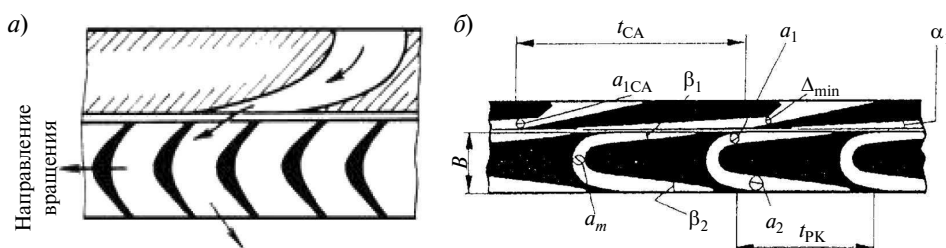


Рис. 1. Классическая активная ступень с парциальным подводом рабочего тела (а) и ступень конструкции ЛПИ (б)

из СА $\alpha_1 = 5^\circ$, углом входа в РК $\beta_1 = 10,5^\circ$ и без бандажа; степень парциальности $\varepsilon = 0,612$, осевой зазор (ОЗ) $\Delta z_{оз} = 3$ мм, проектная мощность 26 кВт (модель 605).

Фотографии СА и лопаток РК исследуемой ступени представлены на рис. 2 и 3.

Постановкой задачи определены вопросы как исследования течения в турбинной ступени, так и определения осевого усилия, действующего на РК ступени.

С целью определения осевого усилия, действующего на РК, в расчетную модель были включены области между диском РК и статорными деталями, имеющие место в реальной проточной части (рис. 4).

Решалась стационарная задача. Модель турбулентности SST — высокорейнольдсовая, $Y+$ от 15. Сечение расчетной конечно-элементной модели на среднем диаметре приведено на рис. 5.

Важным вопросом в постановке задачи является способ стыковки в модели неподвижного СА и вращающегося РК. Следуя опыту расчетов транс- и сверхзвуковых ступеней, а также учитывая высокую степень окружной неравномерности вследствие невысокой степени парциальности [3], для стыковки СА и РК в стационарной постановке использовался интерфейс

Frozen Rotor. Для определения осредненных параметров ступени были рассмотрены четыре характерных положения РК по углу его поворота относительно СА.

Результаты численных расчетов трехмерной модели исходного варианта ступени, выполненные в программном комплексе CFX, представлены на рис. 6–10.

Визуализация потока на входе в сопла СА определила наличие значимой вихревой структуры потока седловидной формы «п» и «к» (рис. 6 и 7), что, впрочем, достаточно прогнозируемо. Однако интенсивность вихрей оказалась настолько мощной, что вихри «захватили» всю ПЧ сопла (рис. 8, а), разделив поток посередине высоты сопла.

Как видно на рис. 8, а, корневой вихрь 1 вращается против часовой стрелки при взгляде по потоку, периферийный вихрь 2 — по часовой стрелке. Поток 1 практически не отслеживает цилиндрические обводы КС сопла, траектория движения близка к прямолинейной. На поток 2 цилиндричность обводов оказывает существенное воздействие. Разделение еще более контрастно определяется на рис. 9 и 10.

Рис. 8, б, демонстрирует отражение потока 2 от периферийного цилиндрического обвода ОЗ.

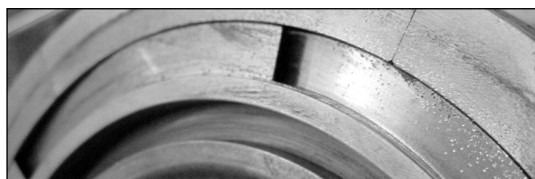


Рис. 2. Сопловой аппарат



Рис. 3. Лопатки рабочего колеса

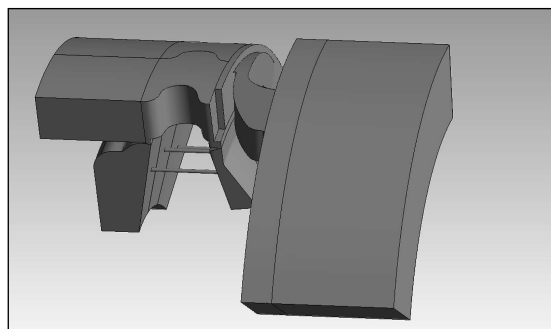


Рис. 4. Геометрия модели 605

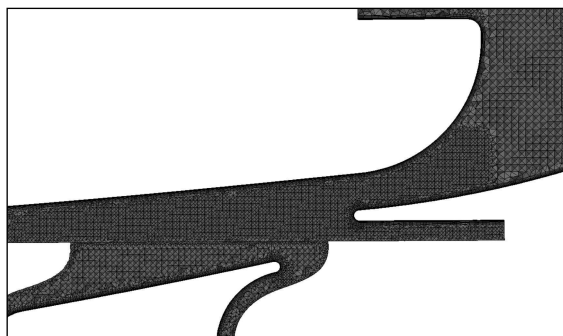


Рис. 5. Расчетная модель

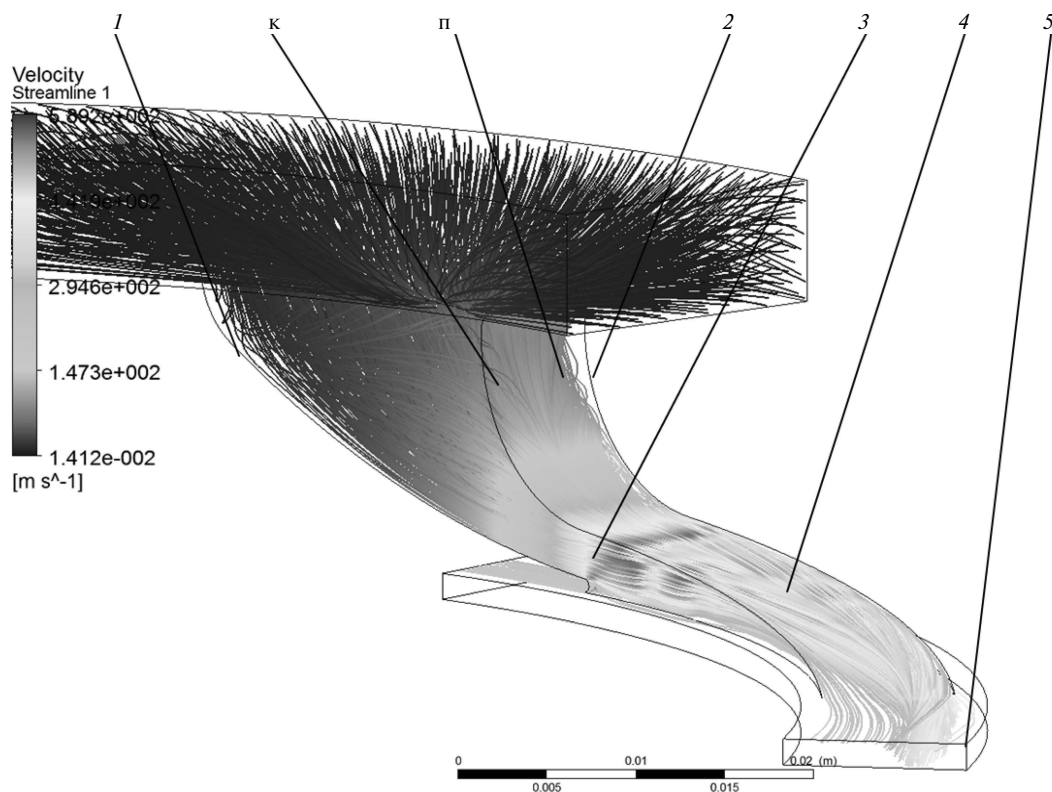


Рис. 6. Streamlines во входном сечении сопла (1 и 2 — профилированные стороны входной части сопла; 3 — критическое сечение сопла (КР); 4 — косой срез (КС) сопла; 5 — часть ОЗ ($0,5 \Delta z_{O3}$); П — периферийный вихрь; К — корневой вихрь

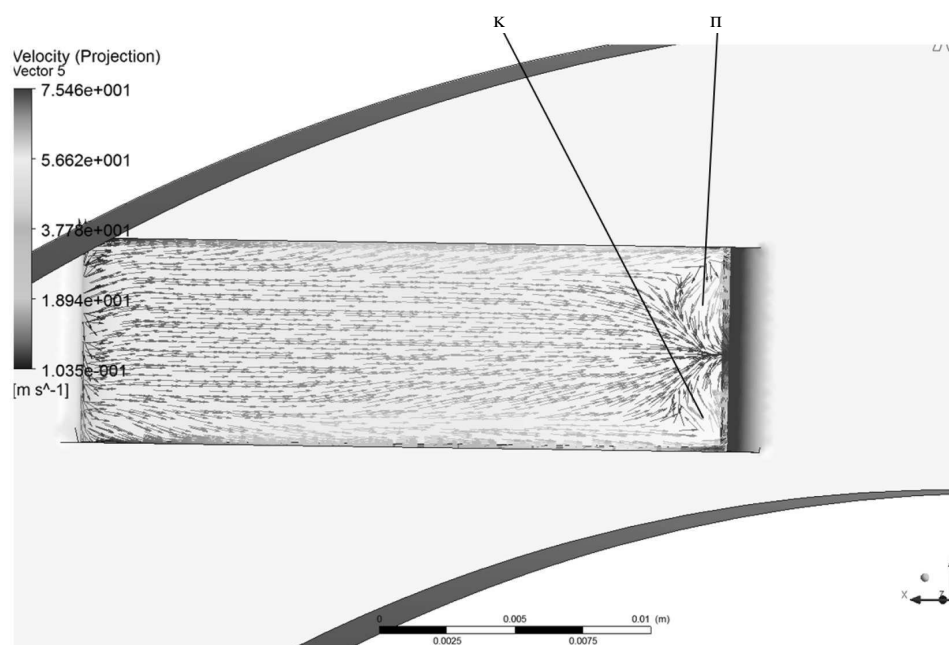


Рис. 7. План тангенциальной составляющей скорости во входном сечении сопла ($\Delta z = 2$ мм от поверхности входа): П — периферийный вихрь; К — корневой вихрь

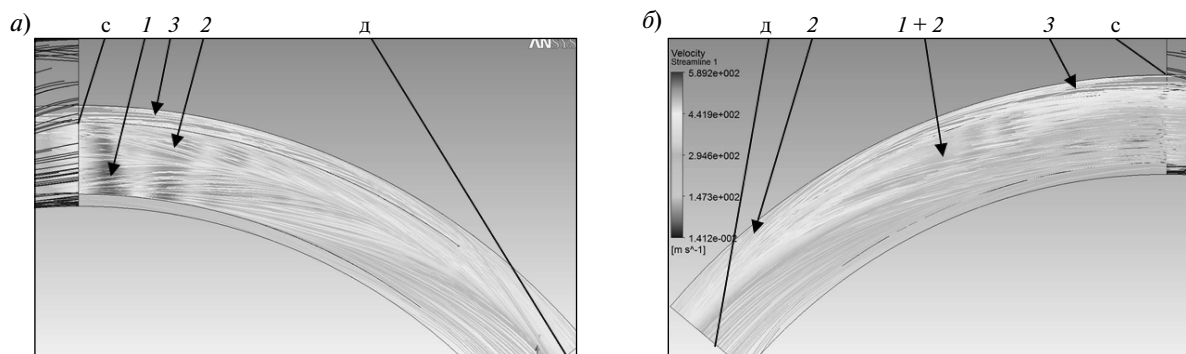


Рис. 8. Streamlines в КС СА (1 — корневой поток сопла; 2 — периферийный; 1 + 2 — суммарный поток на выходе из СА; 3 — часть суммарного потока 2 из предыдущего сопла): а — вид со стороны входа потока в СА; б — вид со стороны выхода; с и д — кромки КС сопла

В динамике процессы движения потоков представлены на рис. 9.

Из теории турбомашин [2] известно, что поток рабочего тела (РТ) при постоянном давлении в свободном пространстве ОЗ движется прямолинейно по поверхностям тока линейчатого гиперboloида вращения. Следовательно, в идеальном случае поток должен достичь периферии ступени в средней части ОЗ с высокой радиальной составляющей скорости, далее — либо отразиться от цилиндрической поверхности периферийного обвода, либо принять условия цилиндрического течения.

Анализ картины течения (см. рис. 8–10) показывает реальность «гиперболичности» течения РТ в пространстве ОЗ, однако особенности конструкции ступени приводят к отклонению пространственных поверхностей тока от линейчатых гиперboloидов

Первоисточником этого отклонения служит весьма существенный вихрь 3 из предыдущего сопла (см. рис. 8 и 9). Своим существованием он обязан наличию мертвой зоны в ОЗ, образованной стенкой СА и периферийным обводом ПЧ, в которой находится поток 3. Его присутствие обеспечивает вытеснение потоков 1 и 2 в сторо-

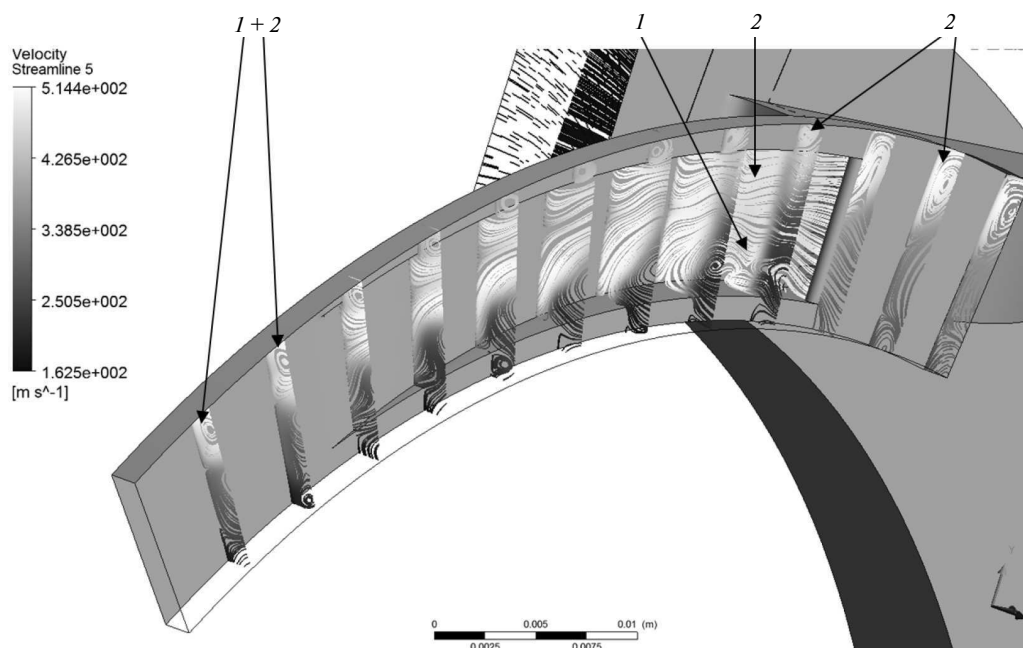


Рис. 9. Планы завихренности скорости относительно оси X в осевом зазоре ($0,5 \Delta z_{03}$) и КС сопла в пространстве исследуемой модели (шаг планов — 5° , нумерация соответствует рис. 8)

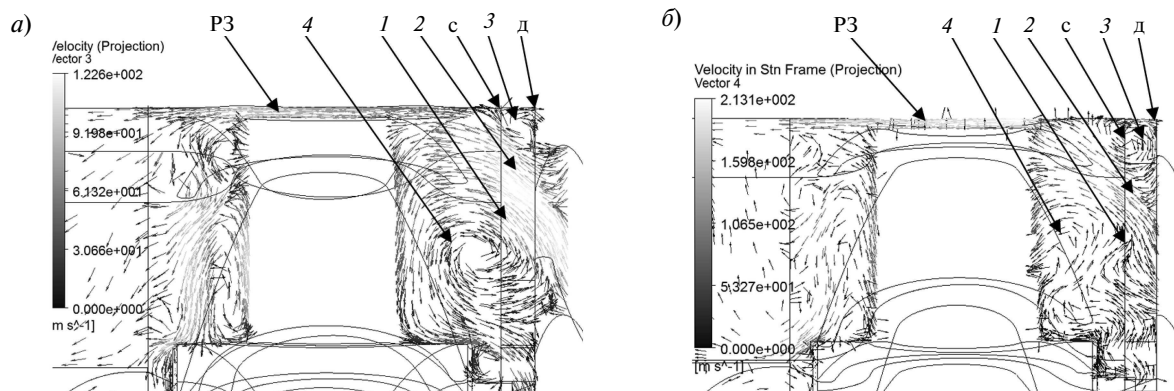


Рис. 10. Визуализация потока в меридиональных сечениях, расположенных под углами 20° (а) и 35° (б) к кромке сопла, ближайшей к КР сопла (дуга КС сопла — $36,7^\circ$): с — середина ОЗ; д — поверхность КС сопла; нумерация потоков 1–3 соответствует рис. 8; 4 — суммарный отраженный поток; P3 — радиальный зазор над РК

ну РК. Примечательно, что поток 3 (см. рис. 9), является частью потока 2, который в результате отражения от периферии разделяется на два потока — поток 3 (рис. 11) и поток, суммирующийся в дальнейшем с потоком 1. Суммарный поток 4 (рис. 10), отражается от периферии по принципам весьма жестких сверхзвуковых струй с уменьшением α_1 . Аналогичное отражение визуализировано для потока 2 в КС сопла (рис. 9), причем отражение начинается в районе $1/3$ дуги КС от КР, что интенсифицирует вытеснение основных потоков в сторону РК.

Отраженный от периферии поток 4 (рис. 10) частично входит в РК с периферии P3, частично — из ОЗ. Картина течения РТ на входе в РК представлена на рис. 12.

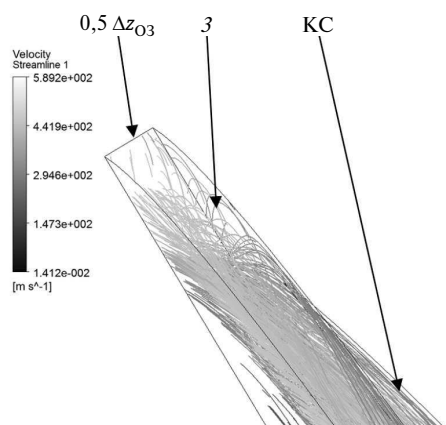


Рис. 11. Вид на ОЗ в конце КС сопла (номер потока 3 соответствует рис. 8)

Визуализация течения РТ позволяет определить ЗО потока от периферии ОЗ и P3. Наличие ЗО активного РТ от периферии определяет высокую активность потока в P3 (см. рис. 10). Необходимо отметить наличие серьезных вихревых структур в корневой части РК. Очевидно, что корневые сечения практически не работают, а являются плохо организованным эжектором.

Вероятно, в РК суммарный поток выходит к периферии ступени на расстоянии шести миллиметров от входной кромки РК. Следовательно, в этом месте происходит отражение потока, где и наблюдается локальный максимум по расходу РТ в P3 (рис. 13). После второго отражения суммарного потока и под воздействием центробеж-

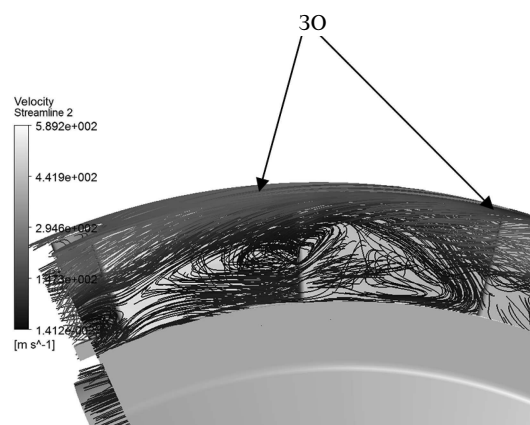


Рис. 12. Пространственное течение РТ на входе в РК (ЗО — зона отражения)



Рис. 13. Изменение относительного расхода через РЗ над РК в зависимости от расстояния от входной кромки

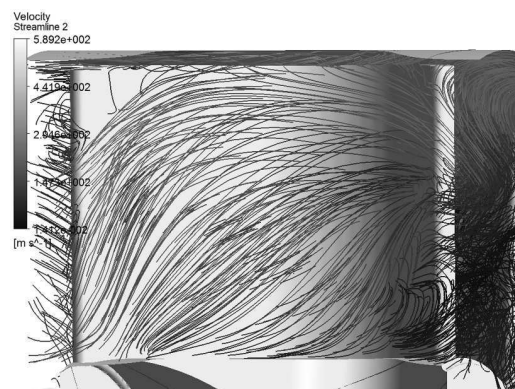


Рис. 14. Streamlines на вогнутой поверхности лопатки РК

ных сил поток с радиальной составляющей скорости к корню заполняет выходные сечения РК (рис. 14).

Из изложенного можно заключить, что течение в модели 605 является сугубо трехмерным и характеризуется следующими особенностями: образованием вихревой структуры в СА вследствие неоптимальной геометрии входной части; высокой степенью окружной неравномерности на входе в РК вследствие малых углов α_1 и парциального подвода РТ; локализацией потока на периферии, которую обеспечивает течение РТ за СА в свободном пространстве открытого ОЗ при $\alpha_1 = 5^\circ$; образованием вихревой структуры потока эжектируемой среды в корне и средней части проходных сечений РК, создающей высокий уровень потерь на трение и вентиляцию и приводящей к росту осевого усилия, направ-

ленного в сторону СА; высокой активностью РТ в РЗ над РК ступени без бандажа.

Наиболее важными направлениями первого этапа оптимизации проточной части являются исследования влияния степени парциальности и величины радиального зазора (Δr) над лопатками РК без бандажа и с бандажом. С этой целью необходимо рассмотреть следующие модели (рис. 15):

- 1) ступень ЛПИ со степенью парциальности $\varepsilon = 1$ (модель 905);
- 2) без бандажа: $a - \Delta r = 0,5$ мм (модель 905); $b - \Delta r = 0,3$ мм (модель 903);
- 3) с бандажом: $a - \Delta r = 0,3$ при высоте бандажного усика $l_y = 2,7$ мм (модель 903В1); $b - l_y = 1,5$ мм (модель 903В2).

Трехмерные расчетные модели базовых вариантов представлены на рис.15.

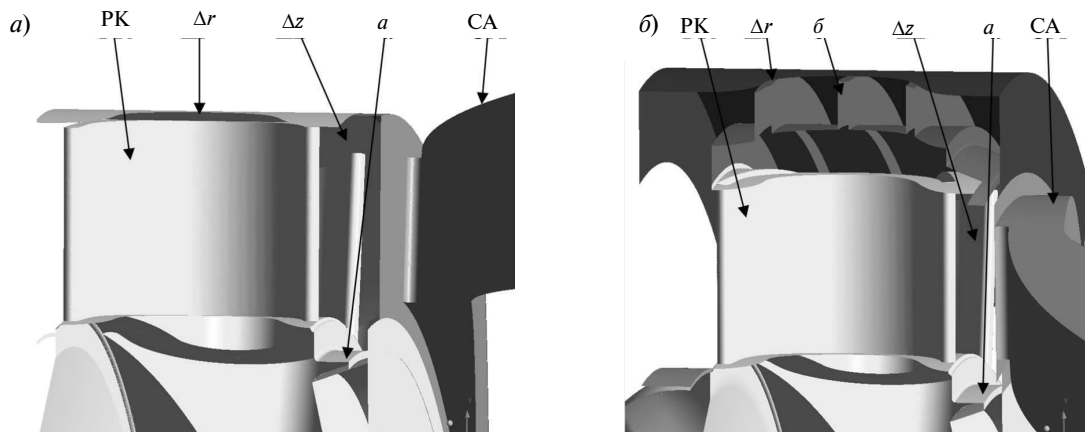


Рис.15. Базовые модели: a — усик корневое уплотнения; b — бандаж РК

Анализ результатов исследований пространственной структуры потока, полученной методом численного трехмерного моделирования

Результаты расчетов интегральных величин для рассмотренных моделей представлены гистограммами на рис. 16–17.

Сравнение моделей 605 и 905 (влияние степени парциальности ϵ). На рис. 18 представлен Streamlines в КС сопел в середине ОЗ.

Сравнение моделей показывает, что увеличение степени парциальности ϵ до единицы приводит к снижению окружной неравномерности параметров потока после СА и уменьшению зон пассивного газа. Вместе с тем увеличение расхода РТ (а соответственно, и мощности, вырабатываемой ступенью) на модели 905 усиливает эжекционные эффекты и приводит к росту осевого усилия на 16,3 кг без изменения направленности (см. рис. 17). Внутренний КПД при этом возрос на 7,9 % (см. рис. 16).

Сравнение моделей 905 и 903 (влияние радиального зазора). В количественном плане — внутренний КПД из-за уменьшения Δr возрос на 4,2 % (см. рис. 16), осевое усилие — на

67,63 кг без изменения направления (см. рис. 17).

Качественный характер течения РТ не изменился. Характер изменения расхода РТ в пространстве РЗ представлен на рис. 19. Линии тока РТ в РЗ можно оценить по рис. 20.

Видно, что РТ в РЗ имеет высокую окружную составляющую скорости (рис. 20), и основная масса потока возвращается в проточную часть РК. Следовательно, можно сделать вывод, что в ступени ЛПИ с РК без бандажа нет классической утечки РТ через РЗ, а имеет место малоэффективное преобразование потенциала РТ в зазоре.

Необходимо отметить, что традиционный метод уплотнения РЗ путем организации сотовых уплотнений в ступенях ЛПИ с РК без бандажа, очевидно, приведет к снижению КПД.

Сравнение моделей 903 и 903В1 (влияние бандажа РК). В количественном плане — внутренний КПД модели с бандажом РК возрос на 11,3 % (см. рис. 16), осевое усилие — на 13,36 кг без изменения направления (см. рис. 17).

Из рис. 21 видно, что качество работы потока в модели 903В1 выше, чем в модели 903,

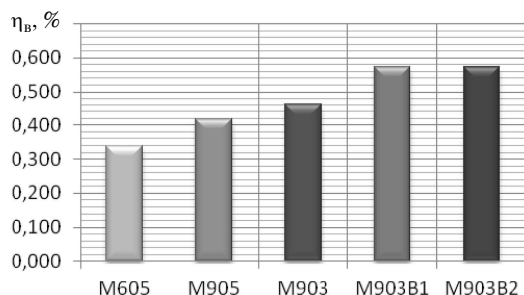


Рис. 16. Внутренний КПД моделей

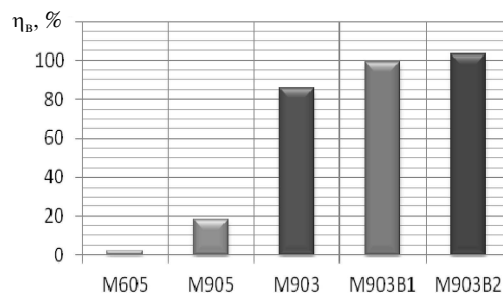


Рис. 17. Осевое усилие на РК моделей

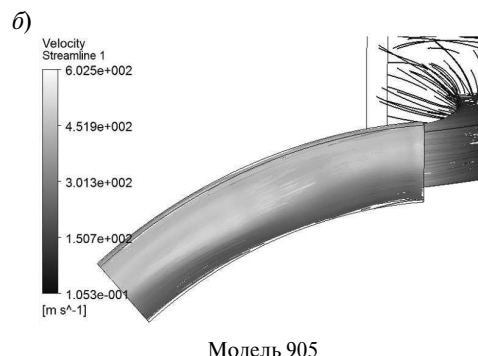
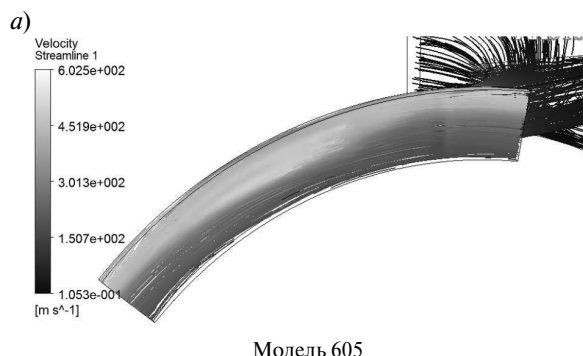


Рис. 18. Течение РТ в КС сопла (Streamlines)

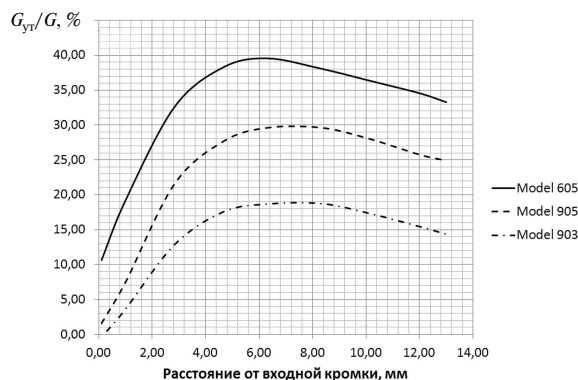


Рис. 19. Характер изменения расхода РТ в РЗ

за счет следующего: уменьшения трения РТ о поверхность вращающегося бандажа по сравнению с трением о неподвижную периферийную поверхность зазоров; обнуления РЗ для активной части РТ в РК; уменьшения интенсивности РТ в РЗ.

Недостатки модели 903В1: увеличение осевого усилия до 99,34 кг, повышенный уровень утечек РТ через надбандажный РЗ. Впрочем, оба эти недостатка являются следствием одной причины — стандартного выполнения осевого уплотнения зазоров, несвойственного ступеням ЛПИ, так как весьма мощный поток v_2 , аналогичный потоку v_1 в модели 903 (см. рис. 10, поток 3), имея высокую окружную скорость, входит в зазор между усиком

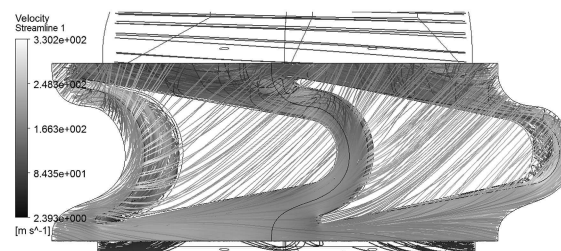


Рис. 20. Вид сверху на течение в РК и РЗ

бандажа U и плоской поверхностью СА. Вступениях ЛПИ усик бандажа утоплен в корпус СА. Увеличение осевого усилия определяется также уменьшением потерь кинетической энергии активного РТ, что обеспечивает увеличение его эжектирующей способности. Кроме того, имеет место более полное заполнение проходных сечений РК активным потоком, что приводит к повышению качества эжектирования. В нашем случае есть только один метод уменьшения осевого усилия — оптимизация корневой перекрышки.

Сравнение моделей 903В1 и 903В2 (влияние типа бандажных уплотнений). Необходимость постановки данного исследования вызвана прочностными соображениями.

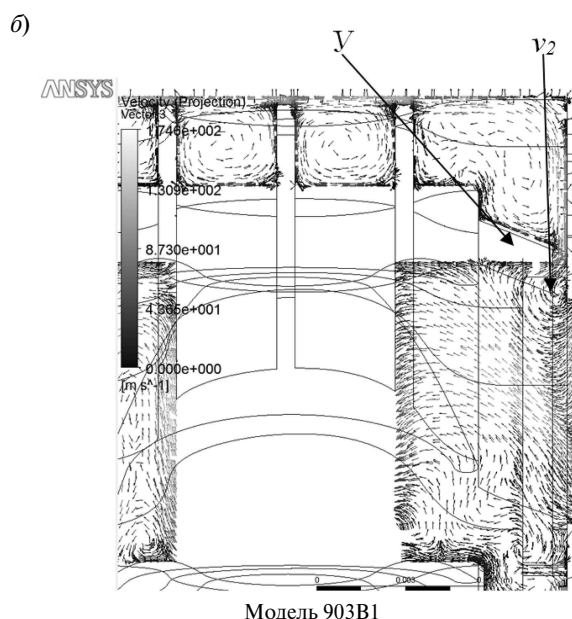
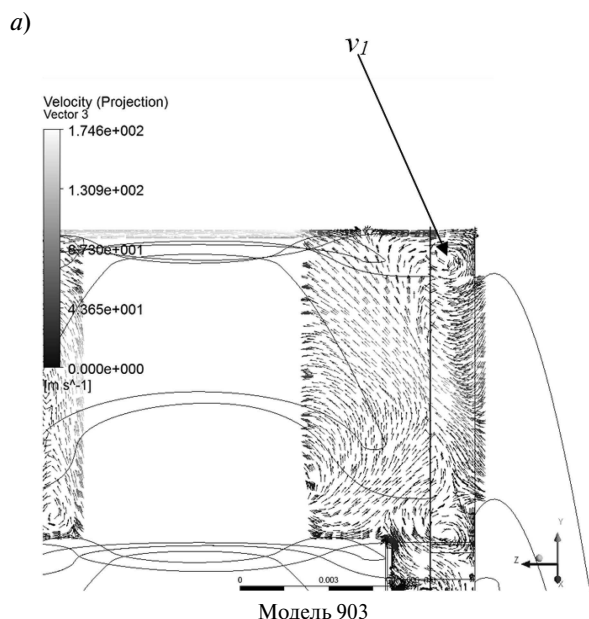


Рис. 21. Векторные поля в меридиональном сечении (30° от критического сечения сопла)

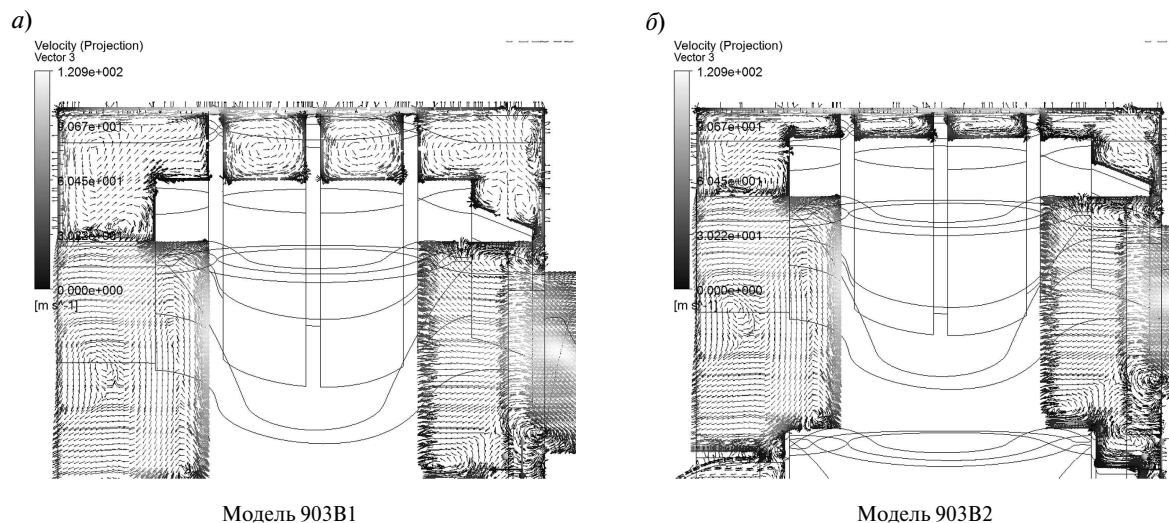


Рис. 22. Характер течения в РЗ (векторное поле)

Очевидно, что качественная картина течения РТ в исследуемых моделях практически одинакова, отличия имеют место лишь в надбандажном пространстве (рис. 22).

В количественном плане внутренний КПД модели 903B2 возрос на 0,1 %, осевое усилие — на 3,6 кг без изменения направления, утечка РТ сократилась на 0,83 %. Причина увеличения осевого усилия изложена в предыдущем анализе. Уменьшение утечки происходит за счет уменьшения проходного сечения РЗ над бандажными усиками.

Обобщим полученные результаты для всех моделей:

1. Обоснована необходимость конструктивных изменений входной части СА.
2. Увеличение степени парциальности с 0,612 до 1 привело к увеличению внутреннего КПД на 7,9 %.
3. Уменьшение радиального зазора над РК обеспечило увеличение η_v на 4,2 %.

4. Обоснована нерациональность применения сотовых уплотнений для ступеней ЛПИ с РК без бандажа.

5. Применение бандажа РК весьма эффективно и повышает η_v на 11,3 %.

6. Обоснована необходимость уплотнения ПЧ с целью снижения осевого усилия.

7. Обоснована необходимость оптимизации корневой перекрыши с целью повышения η_v и снижения осевого усилия.

В заключение необходимо отметить, что в работе приведены исследования традиционных методов повышения эффективности ПЧ турбинных ступеней. На базе анализа течения РТ в исследованных моделях выработаны нетрадиционные методы решения поставленных задач, которые ввиду ограниченности объема статьи не приводятся. Работы по выработанным направлениям исследований ведутся в настоящее время на кафедре ТДУ СПбГПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рассохин, В.А.** Турбины конструкции ЛПИ: Преимущества, характеристики, опыт разработки и применение [Текст] / В.А. Рассохин // Энергомашиностроение. Труды СПбГПУ. — № 491. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2004.
2. **Кириллов, И.И.** Теория турбомашин [Текст] / И.И. Кириллов. — Л.: Машиностроение, 1972.
3. **Епифанов, А.А.** Опыт численного моделирования структуры течения и характеристик ступеней малорасходных турбин ЛПИ [Текст] / А.А. Епифанов, В.А. Рассохин, А.И. Кириллов // Энергетика, энергосбережение и экология / Сб. трудов XL Междунар. научно-практ. конф. «Неделя науки СПбГПУ». — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2011.