

УДК 621.438-762

**И.Ф. КРАВЧЕНКО, Ю.А. ЗЕЛЁНЫЙ, Р.Р. КЛИМИК,
С.Б. РЕЗНИК, С.И. ХОМЕНКО***ГП “Ивченко-Прогресс”, Запорожье, Украина***АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНОГО ОБЛИКА КОРПУСА ТУРБИНЫ
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА**

Выполнены расчёты теплонапряженного состояния различных конструктивных вариантов наружных корпусов турбины. Расчёты проводились при различных граничных условиях со стороны воздуха на наружных поверхностях корпусов, имитирующих их работу без внешнего обдува и при условии их обдува с разной интенсивностью. Выполнены расчёты и анализ системы охлаждения проставок с целью определения паразитных утечек охлаждающего воздуха и влияния их на КПД ступени. Показано влияние внешнего обдува и конструктивного облика корпусов на их теплонапряженное состояние и эффективность работы системы активного регулирования радиального зазора в турбине с учётом паразитных утечек.

Ключевые слова: *наружный корпус турбины, радиальный зазор, температурное состояние, проставка, радиальные перемещения, напряжения, обдув, перекос проставок, эффективность охлаждения.*

Введение

Улучшение параметров термодинамического цикла с целью увеличения удельной и суммарной мощности двигателя, а также его КПД является одним из основных направлений в развитии двигателестроения, как авиационного, так и стационарного. Одним из факторов, влияющих на КПД турбинной ступени, является величина радиального зазора над рабочими лопатками. Необходимо выдерживать минимальный радиальный зазор по торцам рабочих лопаток на продолжительных режимах работы двигателя и исключать врезания на переходных (при наборе и сбросе оборотов). Увеличение радиального зазора над безбандажной рабочей лопаткой на 1 % (отношение величины зазора к высоте лопатки) приводит к снижению КПД ступени на величину порядка 2...2,5 %. Поскольку динамика нагрева и охлаждения роторных и статорных деталей (и величина радиальных перемещений) происходит с различным темпом, задача минимизации радиального зазора становится очень сложной и актуальной.

С целью решения вышеуказанной проблемы ведущие двигателестроительные фирмы (как зарубежные, так и отечественные) идут по пути проектирования специальных систем, позволяющих воздействовать на величину радиального зазора при работе двигателя. Самое широкое распространение получили системы с тепловым воздействием на наружные корпуса турбины, позволяющие за счёт изменения интенсивности охлаждения (нагрева) менять их температуру и радиальные перемещения,

влияя таким образом на радиальный зазор. Работа такой системы обдува наружных корпусов происходит по специальному, заранее выбранному и апробированному алгоритму, позволяющему получать минимальные зазоры на определяющих режимах работы двигателя и не допускать врезания на переходных. Эффективность работы такой системы в значительной степени зависит не только от граничных условий теплообмена (интенсивности воздействия), но и от конструктивного облика наружных корпусов (величине реакции на внешнее воздействие).

В настоящей работе изложены расчётные оценки эффективности воздействия внешнего обдува наружных корпусов на их теплонапряженное состояние и радиальные перемещения проставок над рабочими лопатками турбины для различных вариантов конструкций корпусов.

1. Концепция исследований

При создании узла турбины необходимо стремиться к выбору таких решений по конструкции статорных деталей и узлов, чтобы при минимальном воздействии охлаждения наружной части корпуса, радиальные перемещения проставок, определяющие величину радиального зазора, были максимальными. Кроме того, в процессе изменения температурного состояния статора, при изменении режима работы двигателя, а также при его обдуве, проставка должна перемещаться относительно торца рабочей лопатки с минимальным перекосом.

Для расчётной оценки и выбора наиболее оптимальной конструкции наружного корпуса турбины были предложены 4 конструктивных варианта.

Тепловые расчёты для каждой конструкции выполнялись на одном и том же режиме работы двигателя программным пакетом ANSYS при одинаковых граничных условиях теплообмена со стороны газа и при различных условиях теплообмена со стороны воздуха.

Поскольку гидравлические расчёты системы обдува наружного корпуса, мест отбора воздуха на обдув, для получения конкретных граничных условий не выполнялись, тепловые расчёты корпуса проводились без его обдува и при трёх различных реальных значениях внешнего обдува по интенсивности (с коэффициентами теплоотдачи со стороны воздуха $\alpha=100, 200, 300 \text{ Вт/м}^2 \times ^\circ\text{C}$).

Для каждого варианта конструкции корпусов проводился гидравлический расчёт системы охлаждения проставок, с целью определения величины паразитных утечек охлаждающего воздуха. Расход воздуха на охлаждение самих проставок составлял 0,8 % и принимался постоянным для всех четырех вариантов.

После проведения тепловых расчётов программным пакетом ANSYS выполнялись прочностные расчёты для оценки величины перемещений и эквивалентных напряжений в деталях корпуса без внешнего обдува и при включении внешнего обдува. В настоящей работе изложены результаты расчётных исследований теплонпряженного состояния выбранных конструкций корпусов и выполнена численная оценка влияния эффективности внешнего обдува на радиальный зазор.

2. Содержание и результаты исследований

Были предложены к рассмотрению 4 конструктивных варианта наружных корпусов турбины. Варианты конструкций представлены на рис. 1.

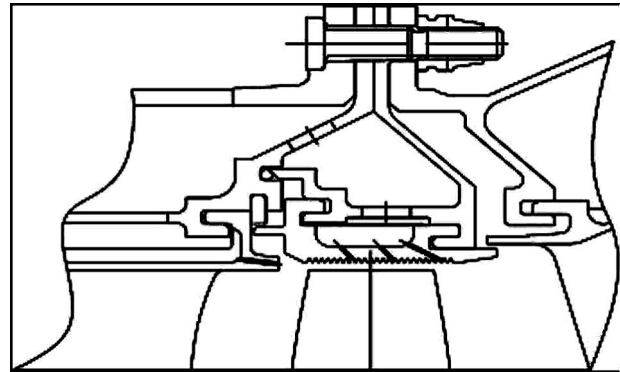
В настоящей работе, как пример, приведены расчёты варианта 4 с промежуточным разрезным элементом, показавший наилучший результат.

Результаты расчётов всех вариантов сведены в табл. 1.

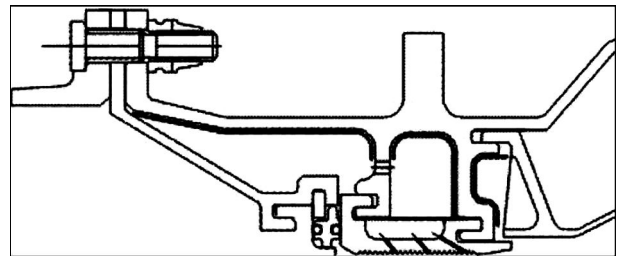
На рис. 2 показано тепловое состояние деталей корпуса турбины на расчётном режиме без обдува воздухом его наружной части и с обдувом при $\alpha=200 \text{ Вт/м}^2 \times ^\circ\text{C}$.

На рис. 3 показаны радиальные перемещения деталей корпуса турбины на расчётном режиме без обдува воздухом его наружной части и с обдувом при $\alpha=200 \text{ Вт/м}^2 \times ^\circ\text{C}$.

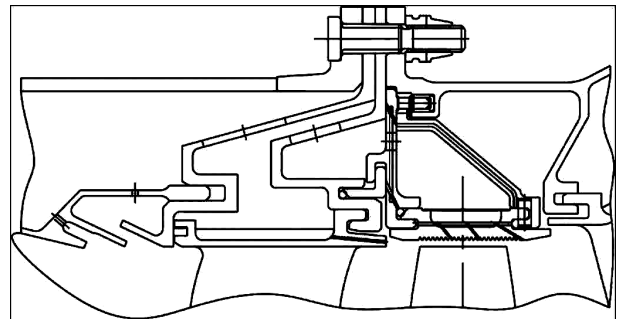
На рис. 4 показаны эквивалентные напряжения в деталях корпуса турбины на расчётном режиме без обдува воздухом его наружной части и с обдувом при $\alpha=200 \text{ Вт/м}^2 \times ^\circ\text{C}$.



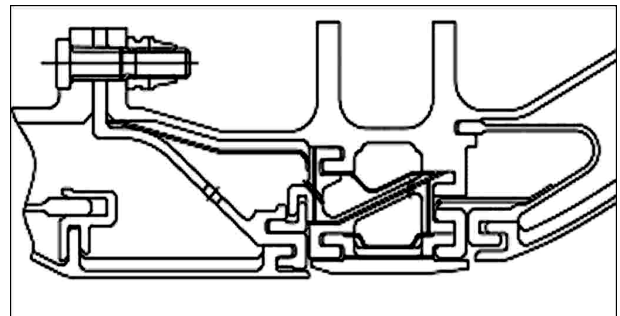
а



б



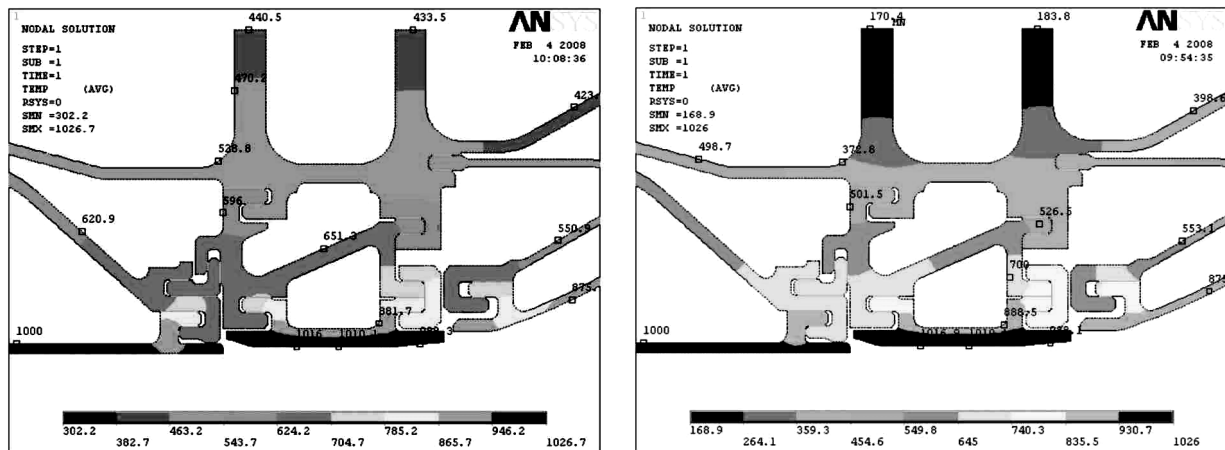
в



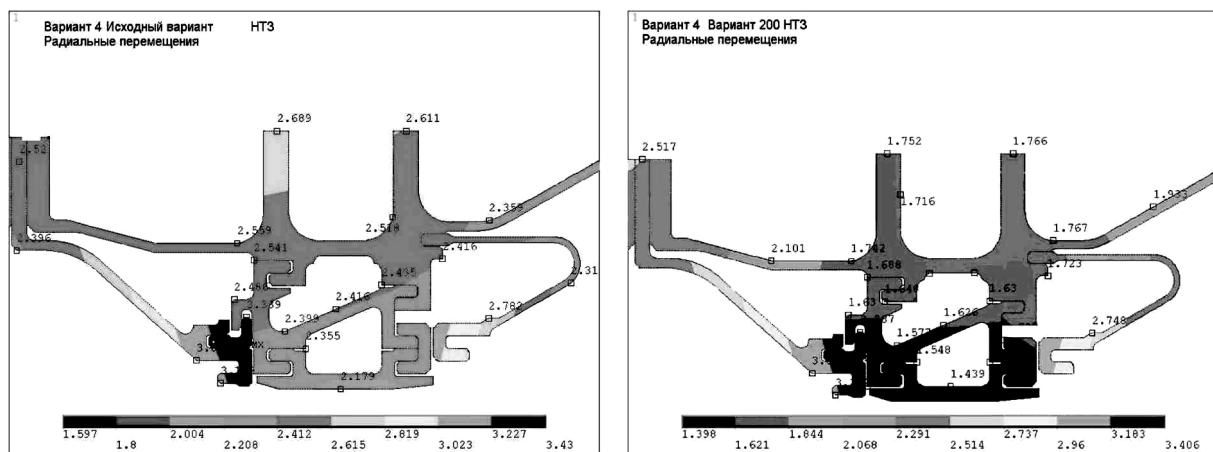
г

Рис. 1. Варианты конструкций наружных корпусов турбины:

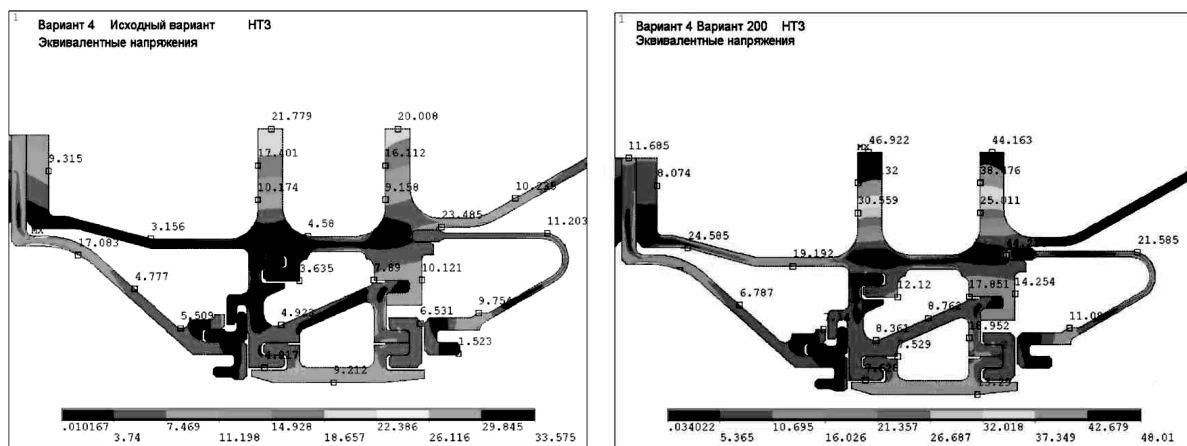
а – вариант 1; б – вариант 2;
в – вариант 3; г – вариант 4



а б
Рис. 2. Температурное состояние корпуса турбины:
а – без обдува; б – с обдувом



а б
Рис. 3. Радиальные перемещения деталей корпуса турбины:
а – без обдува; б – с обдувом



а б
Рис. 4. Напряженное состояние деталей корпуса турбины:
а – без обдува; б – с обдувом

При расчёте на прочность вариантов 1 и 2 были получены высокие эквивалентные напряжения в корпусе. Дополнительно были выполнены прочностные расчёты корпусов при условии их местных разрезов с целью снижения эквивалентных напряжений от температурных перепадов, а для варианта 4 и с учётом нагрузок от давлений в полостях.

Результаты расчёта вариантов корпусов по эффективности воздействия на радиальный зазор с учетом охлаждения проставок и паразитных утечек в системе охлаждения приведены в табл. 1.

Анализ результатов выполненных расчётов

приведенных в таблице 1 показывает, что наибольшей эффективностью по воздействию обдува наружного корпуса на радиальный зазор обладает 4 вариант конструкции статора при незначительном "перекосе" проставок (0,02...0,06 мм). Затем в порядке убывания эффективности идут варианты 2, 3, 1. Следует отметить, что варианты конструкции 1 и 3 приводят к значительным "перекосам" проставок при работе двигателя, который ещё больше увеличивается при обдуве наружного корпуса (с 0,13...0,29 до 0,17...0,4 мм для варианта 1 и с 0,36 до 0,42 мм для варианта 3).

Таблица 1

Результаты расчёта вариантов корпусов турбины по эффективности воздействия на радиальный зазор

Параметр	Варианты конструкции корпуса						
	1		2		3	4	
	Исходный	Разрезной	Исходный	Разрезной	Разрезной	С промежуточным разрезным элементом	учет давлений в полостях
Уменьшение зазора, мм	0,26	0,43	0,61	0,69	0,55	0,79	0,79
Увеличение КПД ступени за счёт уменьшения зазора, %	≈1,46	≈2,42	≈3,38	≈3,83	≈3,09	≈4,44	≈4,44
"Перекос" проставок, мм	0,17	0,4	0,02	0,06	0,42	0,02	0,02
Суммарный отбор воздуха, %	1,25	1,68	1,125	1,3	1,98	1,65	1,65
Утечки охлаждающего воздуха, %	0,45	0,88	0,325	0,5	1,18	0,85	0,85
Увеличение КПД ступени с учётом потерь на утечки, %	≈1,01	≈1,54	≈3,06	≈3,33	≈1,91	≈3,59	≈3,59

Примечание: без учёта утечек по уплотнению между сопловым аппаратом и корпусом в районе переднего крепления проставок.

Авторы статьи выражают благодарность ведущему конструктору Рублевскому Ю.В. и конструктору 1 категории Нечипоренко А.С. за выполнение компоновок вариантов статора турбины для расчётного анализа, а также конструктору 3 категории Бережной И.В. за помощь при оформлении настоящей работы.

Заключение

Анализ результатов расчетных исследований показывает, что наибольший эффект по воздействию внешнего обдува наружного корпуса на радиальное перемещение проставок при их минималь-

ном "перекосе" получен на конструкции корпуса вариант 4 с промежуточным разрезным элементом.

Выполненные расчёты указывают на то, что конструктивный облик наружного корпуса является одним из основных критериев при проектировании и выборе систем активного управления радиальными зазорами в турбине.

Создание системы регулирования радиального зазора в турбине возможно только при наличии в конструкции эффективной системы уплотнения утечек, обеспечивающих минимальные утечки при относительных перемещениях деталей входящих в конструкцию.

Литература

1. Климик Р.Р. Расчетно-экспериментальная оценка динамики радиального зазора над рабочей лопаткой турбины / Р.Р. Климик, Ю.А. Зеленый, Е.А. Бандурко // *Авиационно-космическая техника и*

технология. – Х.: НАКУ «ХАИ». – 2004. – № 7 (15). – С. 111–113.

2. Уменьшение радиальных зазоров в турбинах многорежимных авиационных ТРДД / В.П. Почув // *Научный вклад в создание авиационных двигателей.* – М.: *Машиностроение*, 2000. Книга 2 – С. 279–290.

Поступила в редакцию 14.04.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНОГО ОБЛІКУ КОРПУСА ТУРБІНИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ РАДІАЛЬНОГО ЗАЗОРУ

І.Ф. Кравченко, Ю.О. Зеленый, Р.Р. Клімик, С.Б. Резнік, С.І. Хоменко

Виконані розрахунки теплонапруженого стану різноманітних конструктивних варіантів зовнішніх корпусів турбіни. Розрахунки проводились при різноманітних граничних умовах зі сторони повітря на зовнішніх поверхнях корпусів, імітуючих їх роботу без зовнішнього обдуву і за умовами їх обдуву з різною інтенсивністю. Виконані розрахунки і аналіз системи охолодження проставок з метою визначення паразитних витоків охолоджуючого повітря і впливу їх на ККД ступені. Показано вплив зовнішнього обдуву і конструктивного обліку корпусів на їх теплонапружений стан і ефективність роботи системи активного регулювання радіального зазору в турбіні з урахуванням паразитних витоків.

Ключові слова: зовнішній корпус турбіни, радіальний зазор, температурний стан, проставка, радіальне переміщення, напруга, обдув, перекося проставок, ефективність охолодження.

ANALYSIS OF INFLUENCE OF TURBINE CASING CONSTRUCTIVE APPEARANCE ON EFFECTIVENESS OF RADIAL CLEARANCE CONTROL SYSTEM

I.F. Kravchenko, Y.A. Zelyony, R.R. Klimik, S.B. Reznik, S.I. Khomenko

Calculations of heat-stressed state of various constructive variants of external turbine casings were carried out. The calculations were conducted at different boundary conditions from the side of air on external surfaces of casings, which simulated their work without external blow-off and under the condition of their blow-off with different strength. Calculations and analysis of spacers cooling system were carried out for the purpose of definition of cooling air stray leakages and their influence on stage efficiency. There is showed influence of external blow-off and constructive image of casing on their heat-stressed state and operating efficiency of system of radial clearance active control in turbine subject to stray leakages.

Key words: turbine outer casing, radial clearance, temperature condition, spaur, radial shift, stress, pressurization, spaur skewness, cooling efficiency.

Кравченко Игорь Федорович – канд. техн. наук, первый заместитель руководителя предприятия, Главный конструктор ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: i.kravchenko@ivchenko-progress.com.

Зеленый Юрий Алексеевич – ведущий конструктор отдела турбин ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: 03504@ivchenko-progress.com.

Климик Ростислав Ростиславович – инженер-конструктор 2 кат. отдела турбин ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: 03504@ivchenko-progress.com.

Резник Сергей Борисович – ведущий конструктор, начальник расчетно-экспериментальной бригады отдела турбин ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: 03504@ivchenko-progress.com.

Хоменко Сергей Иванович – ведущий конструктор отдела прочности ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: 03530@ivchenko-progress.com.