

УДК 629.7.083

Н. А. СТАХНЯК, С. Б. РЕЗНИК, С. А. ХОМЫЛЕВ, А. М. КАРПЕНКО

ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ТУРБИНЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

В данной статье приведены результаты исследования взаимного влияния основного потока и утечек в бандажированной турбине низкого давления. Численное исследование выполнялось с помощью коммерческого пакета программ Numeca Fine/Turbo. Выполнен ряд расчетов ТНД с последовательным усложнением расчетной модели. Выполнена оценка влияния утечек в радиальном зазоре и присоединенных полостей (с учетом вдувов охлаждающего воздуха) на основные параметры турбины. Полученные результаты позволили спрогнозировать КПД исследуемой турбины, который будет верифицирован в ходе испытаний ТНД в составе двигателя.

Ключевые слова: турбины низкого давления, радиальный зазор, присоединенные полости, утечки газа, КПД, Numeca Fine/Turbo

Введение

Многоступенчатая турбина низкого давления (ТНД), используемая для привода вентилятора и подпорных ступеней компрессора является одним из ключевых узлов двигателя, в значительной степени определяющих его топливную эффективность.

Как правило, в конструкции ТНД имеется ряд элементов (перекрыши, присоединенные полости, надроторные и межступенчатые уплотнения) оказывающих значительное влияние на ее газодинамическую эффективность. Учет влияния конструктивных особенностей турбины в газодинамических расчетах на этапе проектирования позволяет более точно спрогнозировать реальный КПД турбины, который будет получен в дальнейшем в ходе эксперимента.

На эффективность лабиринтного уплотнения влияет достаточно много факторов (количество зубцов, размеры воздушной камеры между зубцами, наличие ступенек между парами зубцов и т.д.). Для предварительных теоретических расчетов величин перетеканий газа через лабиринтные уплотнения используется формула Стодоло, с учетом поправочных коэффициентов, которые были полученных при экспериментальных продувках для классических вариантов лабиринтных уплотнений. Однако поправочные коэффициенты получены на имитационных экспериментальных установках не всегда учитывают все особенности формы лабиринтного уплотнения, влияние вращения, наличия закрутки на входе. Поэтому величину утечек не всегда можно корректно оценить, используя лишь эмпирические формулы.

Целью данной работы является численное исследование ТНД на предмет оценки влияния на ее параметры утечек газа через радиальные зазоры, вдувов охлаждающего воздуха в проточную часть с моделированием лабиринтных уплотнений и присоединенных полостей.

Ряд авторов уже публиковали результаты исследований в области численного моделирования течения в лабиринтных уплотнениях, нацеленных на понимание процессов происходящих с газовым потоком.

В работе Бондаренко и Бага [1] проводится ряд исследований влияния режимных и некоторых геометрических параметров на работу лабиринтного уплотнения.

В работе Тисарева и Василевича [2] рассматривается трактовое уплотнение турбины и процессы, протекающие в нем. Создан алгоритм расчета трактового уплотнения.

Солодов в работе [3] выполнил численное исследование проточной части цилиндра низкого давления с учетом отборов пара, протечек через диафрагменные, надбандажные уплотнения и разгрузочные отверстия в дисках, и отсоса влагеомкого пара из межвенцового зазора последних ступеней.

Gier в своей работе [4] исследовал воздействие перетеканий и утечек газа на основной поток в бандажированной турбине низкого давления. Выполнено сопоставление результатов CFD расчета с результатами эксперимента.

В настоящей работе использованы альтернативные CFD пакеты, что отличает ее от работы других авторов и представляет практический интерес.

Основные задачи и объект исследования

Основные задачи исследования:

- определение влияния перетеканий на КПД турбины;
- определение влияния выдувов охлаждающего воздуха на КПД турбины;
- определение структуры течения в лабиринтных уплотнениях;
- сопоставление результатов расчетов, полученных альтернативными расчетными методами.

В настоящее время для решения задач газовой динамики широко используются методы численного моделирования течений газа (CFD) в основе которого лежит решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) с привлечением полуэмпирических моделей турбулентности. Каждый CFD пакет имеет свои особенности и области применения. Для данного исследования были выбраны коммерческий программный комплекс Numeca Fine/Turbo [5, 6] и решатель F [7, 8], которые специализированы на решении газодинамических задач в области турбомашиностроения. Основная часть исследования выполнялась в решателе Fine/Turbo (Numeca), позволяющем углубленно исследовать течения в каналах сложной формы. Программа позволяет моделировать проточную часть турбины с ее конструктивными особенностями (рис. 1). Результаты расчета сопоставлялись с расчетом в решателе F.

MECA

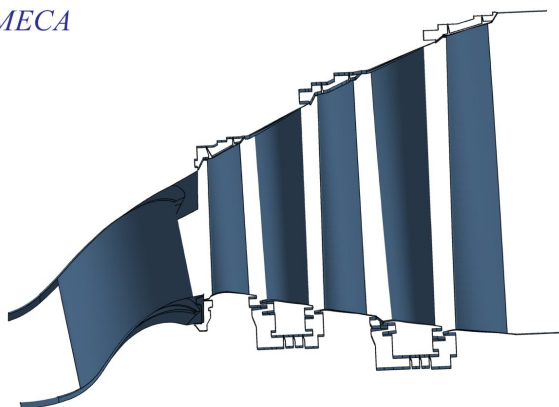


Рис. 1. Проточная часть ТНД

В качестве объекта исследования была выбрана трехступенчатая турбина низкого давления. Рабочие колеса бандажированные, статорная часть лабиринтного уплотнения имеет соты. Под сопловыми аппаратами имеются присоединенные полости, межступенчатое уплотнение 2 и 3 ступеней в виде трехзубого лабиринтного уплотнения. Контактная поверхность соплового аппарата лабиринтного уплотнения имеет соты.

В связи со сложностью моделирования сотово-

го уплотнения (многократно увеличивается количество ячеек), было выполнено упрощение расчетной модели – соты заменены на гладкие стенки. На основании расходных характеристик полученных по экспериментальным данным при продувке сотовых уплотнений и уплотнений с гладкими стенками, величины радиальных зазоров были уточнены так, чтобы обеспечить эквивалентный расход через уплотнение.

Для снижения утечек горячего газа из проточной части двигателя через трактовые уплотнения в присоединенных полостях организован наддув полости охлаждающим воздухом, которых отбирают за КВД (компрессор высокого давления).

Исследование включало в себя подготовительный этап (в котором выполнялась подготовка расчетной модели, выбор приемлемой расчетной сетки, выбор модели турбулентности) и основная часть, включающая себя серию расчетов для оценки влияния на газовый поток радиальных зазоров и уплотнений.

Ход исследования

Геометрия проточной части турбины была загружена в модуль AutoGrid5 [9], где выполнялась генерация сетки с помощью автоматического построения сетки *Row Wizard*. Расчетная область имеет по одному межлопаточному каналу каждого из венцов. Для примера на рис. 2 показано сеточное разбиение в межлопаточном канале CA1, реализованное в модуле AutoGrid5 (Numeca) и решателе F.

Особое внимание при построении сетки было уделено пристеночной области. Выполнены сравнительные расчеты беззазорной турбины с сеткой 2,6 млн. ячеек ($Y^+ \leq 3$) и 6,4 млн. ячеек ($Y^+ \leq 1$), для определения влияния размера расчетной области на основные параметры турбины. По результатам анализа выполненных расчетов была принята модель с существенной увеличенной плотностью расчетной сетки (6,4 млн. ячеек), для обеспечения максимально точного расчета полей параметров в области пограничного слоя ($Y^+ \leq 1$).

Основной этап исследования включал в себя несколько постановок. Последовательно выполнен ряд расчетов с усложнением расчетной модели, чтобы проследить влияние конструктивных особенностей на параметры ступеней и турбины в целом.

Первой постановкой был просчитан базовый вариант турбины: трехступенчатая турбина, в которой отсутствуют какие-либо утечки и перетекания (беззазорная). Дальнейшие расчеты сопоставлялись с этим вариантом. Сеточная область расчета приблизительно 6,4 млн. ячеек. Время счета на 6 ядрах составило 9 часов.

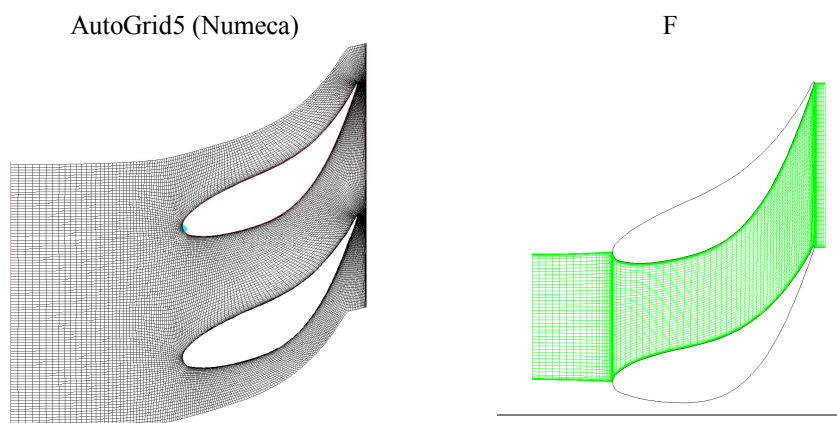


Рис. 2. Сеточное разбиение в межлопаточном канале CA1

Вторая постановка: трехступенчатая ТНД с моделированием перетеканий через лабиринтные уплотнения бандажных полок рабочих лопаток. Моделирование радиальных зазоров бандажных полок увеличило сеточную область расчета до 13 млн. ячеек. Время счета на 10 ядрах составило 19 часов.

Третья постановка: трехступенчатая ТНД с моделированием перетеканий через лабиринтные уплотнения бандажных полок рабочих лопаток и присоединенных полостей без учета вдувов охлаждающего воздуха. Сеточная область расчета 24 млн. ячеек. Время счета на 10 ядрах составило 48 часов.

Четвертая постановка: трехступенчатая ТНД с моделированием перетеканий через лабиринтные уплотнения бандажных полок рабочих лопаток и присоединенных полостей с учетом вдувов охлаждающего воздуха дисковых полостей. Сеточная область расчета 24 млн. ячеек. Время счета на 12 ядрах составило 72 часа.

Расчет в F выполнялся с учетом перетеканий над РК бандажных полок. В связи с невозможностью прямого описания лабиринтного уплотнения в решателе F, величины утечек определялись по полуэмпирическим данным, и задавались в качестве исходных данных. Расчетная сетка включала в себя более 4 млн. ячеек. Время счета на 6 ядрах составило около 40 часов.

Для корректного сопоставления результатов расчета в F с программным пакетом Fine/Turbo в расчете использовалась модель турбулентности SST.

Параметры моделирования

Расчеты проводились в стационарной постановке. В проведенных расчетах использовалась модель Real Gas.

На основании результатов представленных в работе Смита [10], в которой приводится сравни-

тельный анализ существующих моделей турбулентности используемых при CFD моделировании трактовых уплотнений и согласование CFD расчетов с результатами эксперимента. Для исследования выбрана дифференциальная параметрическая модель переноса сдвиговых напряжений SST Ментера, которая является наиболее оптимальной для подобного рода задач, дает наиболее близкие к экспериментальным данным результаты.

В качестве ротор-статор интерфейса был выбран Mixing plane.

На входе задавались радиальные эпюры распределения полного давления, полной температуры, меридиональных и тангенциальных углов полученные из результатов расчета турбины высокого давления (ТВД).

На выходе задавалось статическое давление.

Для моделирования вдувов охлаждающего воздуха из дисковых полостей через отверстия на деталях ротора, дополнительно, в четвертой постановке задавался расход охлаждающего воздуха, температура, место и направление вдува. Величина расхода охлаждающего воздуха получена из гидравлического расчета.

Результаты исследования

Выполнено моделирование перетеканий газа через радиальные зазоры лабиринтных уплотнений бандажных полок рабочих лопаток и в присоединенных полостях с учетом вдувов охлаждающего воздуха.

В результате были получены поля распределения чисел Маха, давлений, температур, газовых углов позволяющие оценить эффективность принятой конструкции. На рис. 3 представлено распределение относительных чисел Маха в середине межлопаточных каналов венцов, в надроторных уплотнениях и присоединенных полостях.

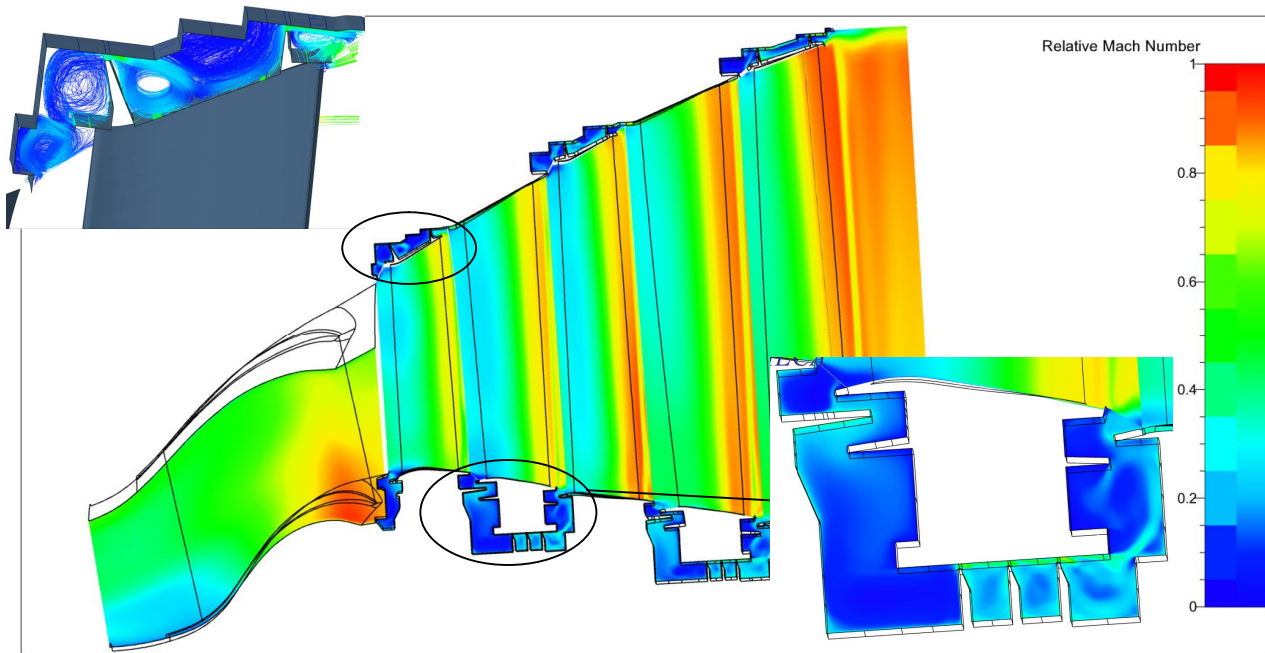


Рис. 3. Распределение относительных чисел Маха и линий тока в середине межлопаточных каналов венцов, в надроторных уплотнениях и присоединенных полостях

Как видно на рис. 3 принятая конструкция обеспечивает необходимое вихреобразование газового потока в районе бандажных полок и присоединенных полостей, что способствует снижению перетеканий и утечек газа через радиальные зазоры лабиринтных уплотнений.

Выполнена обработка результатов расчета, получены величины перетеканий в различных постановках, их влияние на приведенный расход и КПД турбины в целом. Основные результаты расчета сведены в Таблицу 1.

Таблица 1

Основные результаты расчета

Параметр	Fine/Turbo				F
	Первая постановка	Вторая постановка	Третья постановка	Четвертая постановка	
CA1 cooling	0	0	0,44	0,44	-
PK1	0	0,99	0,99	0,99	1,2
CA2 inlet	0	0	-0,45	0,04	-
cooling	0	0	0	0,65	-
CA2 outlet	0	0	0,47	0,60	-
PK2	0	0,71	0,71	0,71	1,1
CA3 inlet	0	0	-0,23	-0,02	-
cooling	0	0	0	0,22	-
CA3 outlet	0	0	0,24	0,24	-
PK3	0	0,63	0,63	0,63	1
Суммарный КПД	0,9359	0,9292 (-0,67%)	0,9247 (-1,12%)	0,9273 (-0,86%)	0,9399
ΔT	192,64	193,04	193,83	193,59	194,17

В таблице 1 принят ряд условных обозначений: CA_Inlet – относительный расход газа на входе в присоединенную полость перед CA;

Cooling – относительный расход охлаждающего воздуха наддувающая присоединенную полость;

CA_Outlet – относительный расход газа на выходе из присоединенной полости CA;

PK – относительный расход газа через надбандажное уплотнение PK;

1, 2, 3 – означает порядковый номер венца.

Для утечек под сопловым аппаратом и перетеканий над рабочим колесом положительные значения расходов соответствуют выдуву в проточную часть турбины.

По результатам, представленным в таблице 1 видно, что в первой постановке задачи отсутствуют какие-либо утечки, перетекания. В результате получено значение суммарного КПД 93,59%.

Во второй постановке задачи добавлено моделирование перетеканий над PK бандажных полок, полученные величины перетеканий приводят к снижению суммарного КПД на 0,67%.

В третьей постановке задачи помимо перетеканий над PK бандажных полок снижающих КПД, появляется моделирование присоединенных полостей с лабиринтными уплотнениями (рис. 4 а) и вдув охлаждающего воздуха перед первым рабочим колесом. Моделирование присоединенных полостей с лабиринтным уплотнением, приводит в появлению утечки газа 0,45% (CA2_inlet) и 0,23% (CA3_inlet) из проточной части турбины, и к снижению суммарного КПД на 1,12%.

Для снижения утечки горячего газа из проточной части турбины в четвертой постановке организован наддув присоединенных полостей охлаждающим воздухом (рис. 4 б). Расход охлаждающего воздуха составляет 0,65% и 0,22% соответственно. Как видно из таблицы 1, происходит увеличение расхода через лабиринт относительно третьей постановки (CA2_outlet), однако количества воздуха наддувающего присоединенную полость под вторым сопловым аппаратом оказалось достаточно для запитки лабиринта, вместо утечки газа имеет место выдув охлаждающего воздуха в проточную часть турбины (CA2_inlet = 0,04%). Несмотря на это, в передней полости имеет место втекание горячего газа и нагрев диска РК1, как показано на рис. 4 б.

В присоединенной полости третьей ступени воздуха оказалось недостаточно и имеет место утечка горячего газа из проточной части двигателя. Утечка горячего газа по сравнению с третьей постановкой снизилась с 0,23% до 0,02%.

Таким образом перетекания и утечки в четвертой постановке снижают суммарный вязочный КПД относительно безазорной турбины на 0,86 %.

Из сопоставления результатов, полученных в Fine/Turbo и F в подобной постановке задачи (для Fine/Turbo это вторая постановка) видим, что разница в суммарном КПД ТНД достигает 1%. Анализ результатов показал, что отличие обусловлено, главным образом, различным моделированием течения в первом СА. Здесь получено наибольшее отличие КПД 1-ой ступени.

Из-за сложной формы проточной части (криволинейный, диагональный, диффузорный канал) поток в СА1 имеет сложную пространственную структуру с зоной вероятного отрыва. На результат моделирования таких течений сильное влияние оказывает размерность расчетной сетки, ее топология, особенности реализации математической модели течения.

На рис. 5 представлено распределение полного давления в окружном направлении на выходе из СА1.

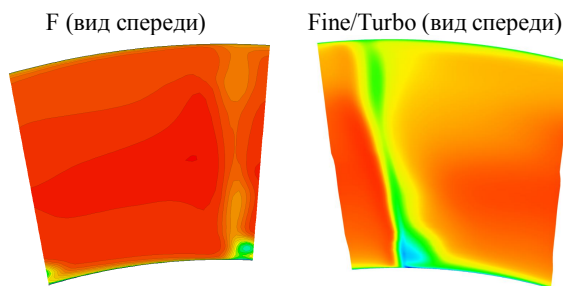


Рис. 5. Распределение полного давления в окружном направлении на выходе из СА1

Как видно из рис. 5 след за СА1 в расчете выполненном в Fine/Turbo интенсивнее, а соответственно, имеют место большие потери полного давления.

На рис. 6 представлены эпюры распределения газовых углов на входе в венец в различных постановках и посчитанные различными CFD пакетами. В качестве примера взята 3 ступень, которая более качественно показывает влияние перетеканий и утечек на газовые углы.

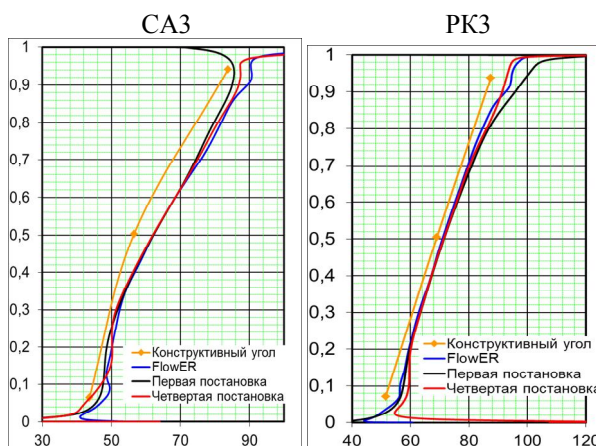


Рис. 6. Распределение газовых углов на входе в венец

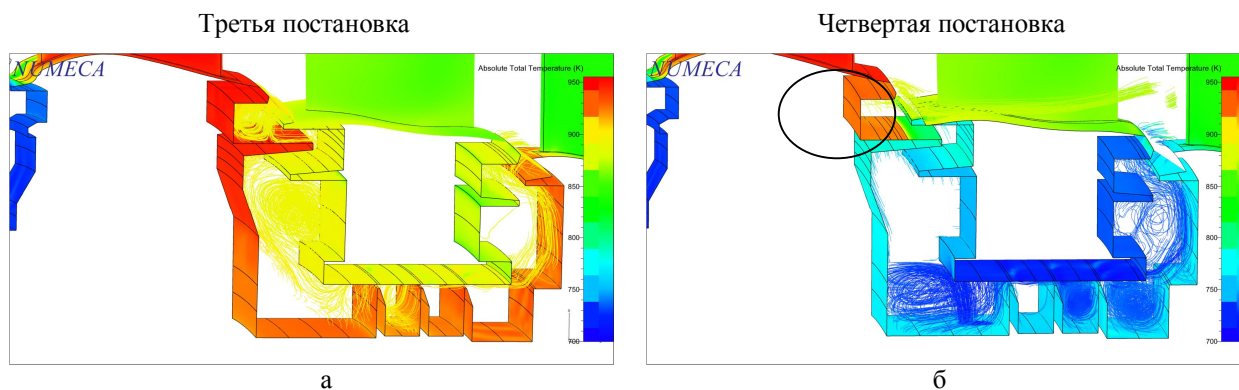


Рис. 4. Линии тока и распределение полных температур по поверхности стенок присоединенных полостей СА2

На графике представлены:

- конструктивный угол входа в венец;
- результаты расчетов в первой постановке с безззорной турбиной;
- результаты расчетов в четвертой постановке, в которой учтены перетекания, утечки и вдув охлаждающего воздуха;
- результаты расчета в F, который выполнялся с учетом перетеканий над РК.

Как видно из рис. 6 перетекания вносят существенное изменение в структуру потока в районе корневой и периферийной образующих СА и РК, в результате, приводит к появлению углов атаки и дополнительным потерям. Поэтому это влияние необходимо учитывать на этапе проектирования при выборе конструктивных углов при профилировании лопаточных венцов.

Сопоставление результатов расчета полученных Fine/Turbo и F показало, что различные методы расчета дают достаточно близкое совпадение по углам потока в межвенцовых зазорах при подобной постановке задачи. Значение углов потока, полученное в расчетах по обоим методикам, в средней части канала практически совпало, на периферии учет влияния надбандажной утечки приводит к одинаковой (или близкой) деформации эпюры углов.

Заключение

По результатам выполненного комплекса исследовательских работ сделаны такие выводы:

- впервые на предприятии выполнено прямое численное моделирование профилей рабочих колес с надроторными уплотнениями, сопловых аппаратов, присоединенных полостей с межступенчатыми уплотнениями и с учетом вдувов охлаждающего воздуха в одной постановке;
- благодаря используемому пошаговому подходу определено влияние на характер течения и суммарные параметры турбины каждого из исследуемых конструктивных элемента;
- выполненные CFD расчеты позволили определить структуру течения в присоединенных полостях, лучше понять процессы, происходящие в лабиринтных уплотнениях.

Результаты данной работы будут использованы при совершенствовании исследуемой ТНД.

Литература

1. Тисарев, А. Ю. Расчетное исследование герметичности трактового уплотнения турбины [Текст] / А. Ю. Тисарев, Н. М. Василевич // *Вестник двигателестроения*. – 2013. – № 2. – С. 30-34.

2. Бондаренко, Г. А. Исследование течения в лабиринтном уплотнении [Текст] / Г. А. Бондаренко, В. Н. Бага // *Вісник НТУ «ХПІ»* : зб. наук. праць. Сер. : *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. – X. : НТУ «ХПІ», 2015. – Вип. 15 (1124). – С. 23-31.

3. Солодов, В. Г. Численная модель проточной части ЦНД мощной паровой турбины с учетом протечек [Текст] / В. Г. Солодов, В. Л. Швецов, В. А. Конев // *Вісник НТУ «ХПІ»* : зб. наук. праць. Сер.: *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. – X. : НТУ «ХПІ», 2017. – Вип. 8 (1230). – С. 6-12.

4. Interaction of Shroud Leakage Flow and Main Flow in a Three-Stage LP Turbine [Text] / Jochen Gier, Bertram Stubert, Bernard Brouillet et al. // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2003, GT2003-38025*.

5. FINE/Turbo User's Manual, NUMECA International, Brussels, Belgium.

6. FINE/Turbo Theoretical Manual, NUMECA International, Brussels, Belgium.

7. Еришов, С. В. Бесплатная CFD программа [Электронный ресурс] / С. В. Еришов. – Режим доступа : <http://sergiyershov.com>. – 1.06.2015.

8. Еришов, С. В. Развитие комплекса программ для расчета трехмерных течений вязкого газа [Текст] / С. В. Еришов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 5 (92). – С. 89-94.

9. Autogrid5 User's Manual, NUMECA International, Brussels, Belgium.

10. Smith, Peter E. J. Conjugate heat transfer cfd analysis in turbine disc cavities [Text] / Peter E. J. Smith, Christopher A. Long, Daniel D. Coren // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, GT2012-69597*.

References

1. Tisarev, A. Yu., Vasilevich, N. M. Raschetnoe issledovanie germetichnosti traktovogo uplotneniya turbiny [Estimated investigation of hermetic sealing turbine]. *Zaporozh'e, Vestnik dvigatelestroeniya*, 2013, no. 2, pp. 30-34.

2. Bondarenko, G. A., Baga, V. N. Issledovanie techeniya v la-birintnom uplotnenii [Investigation of the flow in the labyrinth seal]. *Trudy NTU «KhPI»*. *Energetichni ta teplotekhnichni protsesi y ustatkuvannya* [Herald of NTU "KhPI": a collection of scientific papers Series: Energy and heat engineering processes and equipment], 2015, no. 15 (1124), pp. 23-31.

3. Solodov, V. G., Shvetsov, V. L., Konev, V. A. Chislennaya model' protochnoy chasti TsND moshchnoy parovoy turbiny s uchetom pro-techek [Numerical Model of L.P.C. Flow Path With Leak System of Powerful Steam Turbine Unit]. *Trudy NTU «KhPI»*. *Energetichni ta teplotekhnichni protsesi y ustatkuvannya* [Herald of NTU "KhPI": a collection of scientific papers Series: Energy and heat engineering processes and equipment], 2017, no. 8 (1230), pp. 6-12.

4. Gier, Jochen., Stubert, Bertram., Brouillet, Bernard. Laurent de Vito. Interaction of Shroud Leakage Flow and Main Flow in a Three-Stage LP Turbine. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2003, GT2003-38025*.

5. *FINE/Turbo User's Manual*, NUMECA International, Brussels, Belgium.

6. *FINE/Turbo Theoretical Manual*, NUMECA International, Brussels, Belgium.

7. Yershov, S. V. *Besplatnaya CFD programma* [Free CFD software]. Available at: <http://sergiyyershov.com> (accessed 1.06.2015).

8. Yershov, S. V. Razvitie kompleksa programm dlya rascheta trekhmernykh techeniy vyzkogo gaza [Development of application package for 3D flow computations]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2012, no. 5 (92), pp. 89–94.

9. *Autogrid5 User's Manual*, NUMECA International, Brussels, Belgium.

10. Smith, Peter E. J., Long, Christopher A., Coren, Daniel D. Conjugate heat transfer cfd analysis in turbine disc cavities. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, GT2012-69597*.

Поступила в редакцию 18.02.2017, рассмотрена на редколлегии 8.06.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. конструкции авиационных двигателей С. В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков.

ЧИСЛЕННЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ В БАГАТОСТУПЕНЕВІЙ ТУРБІНІ НИЗЬКОГО ТИСКУ

М. О. Стахняк, С. Б. Різник, С. О. Хомилев, А. М. Карпенко

В цій статті показані результати дослідження взаємного впливу основного потоку і витoku газу в багатоступеневій турбіні низького тиску (ТНТ). Чисельне дослідження здійснювалось за допомогою комерційного пакету програм Numeca Fine/Turbo. Виконана низка розрахунків ТНТ з послідовним ускладненням розрахункової моделі. Виконана оцінка впливу витoku газу через радіальний зазор і приєднувальної порожнини (з вдуванням охолоджувального повітря) на основні параметри турбіни. Одержані результати дозволили спрогнозувати коефіцієнт корисної дії (ККД) дослідженої турбіни, який буде верифікований за результатами випробування ТНТ у складі двигуна.

Ключеві слова: турбіна низького тиску, радіальний зазор, приєднувальної порожнини, виток газу, ККД, Numeca Fine/Turbo

NUMERICAL MODELLING OF A FLOW IN THE MULTISTAGE LOW PRESSURE TURBINE

N. Stakhnyak, S. Riznyk, S. Khomylev, A. Karpenko

In present paper the results of a study of the interaction between the main flow and the leakage flows in a shrouded low pressure turbine are presented. The investigation was performed numerically with using of the Numeca Fine/Turbo commercial software. A number of LPT calculations with the consecutive increasing of their complexity were performed. The impact of radial gap leakages, shroud and hub cavities (with taking into account the cooling air injection) on turbine main parameters was assessed. The obtained results allowed to predict the investigated LPT efficiency that will be verified during the engine tests.

Key words: low pressure turbine, radial gap, shroud and hub cavities, leakages, efficiency, Numeca Fine/Turbo

Стахняк Никита Алексеевич – конструктор отдела турбин, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Різник Сергей Борисович – начальник расчетно-экспериментальной бригады отдела турбин, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Хомилев Сергей Александрович – ведущий конструктор отдела турбин, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Карпенко Артем Михайлович – конструктор отдела турбин, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Stakhnyak Nikita – Designer of a turbine department, SE Ivchenko-Progress, Zaporozhye, Ukraine; e-mail: rapid89@ukr.net.

Riznyk Sergiy – Brigade chief of a turbine department, SE Ivchenko-Progress, Zaporozhye, Ukraine.

Khomylev Sergey – Senior designer of a turbine department, SE Ivchenko-Progress, Zaporozhye, Ukraine.

Karpenko Artyom – Designer of a turbine department, SE Ivchenko-Progress, Zaporozhye, Ukraine.