

Рис.8 – Траектория движения ротора в вертикальном направлении

Результаты расчетных исследований, приведенные на рисунке 9, иллюстрируют возможности алгоритма управления обеспечить устойчивость движения ротора при измерительных погрешностях в пределах 10 %. В данном случае изменяется длительность переходного процесса, но амплитуда стационарных колебаний ротора также не превосходит 10-15 % от зазора.

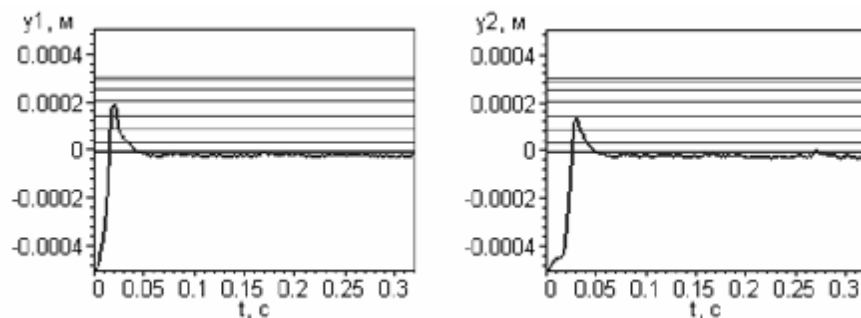


Рис. 9 – Траектория движения ротора при погрешности измерений

**Заключение.** В работе рассмотрена нелинейная математическая модель подвеса жесткого ротора в активных магнитных подшипниках. Основное отличие имитационной модели, построенной с использованием предложенной математической модели, – возможность более адекватного моделирования поведения ротора на АМП при его приближении к полюсам.

Модели такого типа могут использоваться для проведения численных экспериментов по нахождению реальных границ применения линейных и нелинейных алгоритмов управления и определения их параметров, позволяющих обеспечить устойчивость движения ротора в заданных пределах.

Другим приложением имитационных вычислительных моделей является

разработка и оптимизация алгоритмов управления системы ротор на АМП, а также исследование динамического поведения этой системы с определением резонансных режимов и последующей отстройкой от них.

С помощью описанной имитационной модели исследовано динамическое поведение системы «ротор в АМП». Показано, что при внесении кинематических возбуждений подбором параметров предложенного дискретного алгоритма управления возможно добиться величин максимальных отклонений шеек опорных участков ротора в переходных процессах и амплитуд стационарных колебаний, не превышающих заданных значений. Результатами численных экспериментов подтверждена устойчивость данного алгоритма к возможному возникновению случайных погрешностей измерений параметров управления.

Список литературы: 1. Siegart R, Bleuler H, Traxler A. Industrial Magnetic Bearings. Gordon and Breach Science Publisher, –Amsterdam, 2000. 2. Steven M, Nataraj C. Suppression of Base Excitation of Rotors on Magnetic Bearings. International Journal of Rotating Machinery. Vol. 2007, Article ID 91276. –10 p. 3. G. Schweitzer, H. Bleuler and A. Traxler Active magnetic bearings. –Zurich: ETH, 1994. –244 p. 4. Maslen E.H. Magnetic bearings. University of Virginia Department of Mechanical, Aerospace, and Nuclear Engineering Charlottesville, Virginia, 2000. –229 p. 5. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. –СПб.: Политехника, 2003. –206 с. 6. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. В.Н. Челомей (пред). –М.: Машиностроение, 1979. - Т.2: Колебания нелинейных механических систем. / Под ред. И.И. Блехмана. –351 с. 7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Учебник для студентов энергетических и электротехнических ВУЗов. –М.: Высш. шк., 1973. –752 с. 8. Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н. Электротехника. Учебник для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. –552 с. 9. Патент № 2277190. Российская Федерация. МПК F16C 32/04. Способ дискретного управления электромагнитным подвесом вращающихся роторов / ОАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе», НТУ «ХПИ»; Роговой Е.Д., Бухолдин Ю.С., Левашов В.А., Мартыненко Г.Ю., Смирнов М.М. –№ 2003121317/11. –Заявл. 10.07.2003 г. Опубл. 27.05.2006 г. // Изобретения. Официальный бюллетень, 2006. –№15. 10. Мартыненко Г.Ю. Исследование устойчивости движения ротора в управляемых электромагнитных подшипниках с помощью нелинейной имитационной вычислительной модели / Проблемы машиностроения. –Харьков: ИПМаш НАН Украины, 2005. –Т.8, №1. –С. 47-58.

Поступила в редколлегию 15.05.2008

УДК 621.165, 532.6

А.В. ПУСАНОВ

**НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИПМаш НАН УКРАИНЫ В ОБЛАСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЯХ ТУРБОМАШИН**

The basic results and research directions of IPMash NAS of Ukraine in fields of mathematical simulation of gas dynamics in turbo-machines are presented. Modern numerical methods for 3D gas dynamic analysis and for design, modernization and determination of directions of aerodynamic improvement for turbo-machines are considered.

## **Введение**

Повышение экономичности и надежности турбомашин является актуальной задачей для многих отраслей промышленности Украины и мира, таких как энергетика, авиация, газотранспортная система, коммунальное хозяйство и др. Важнейшей составляющей решения этой комплексной проблемы есть аэродинамическое совершенствование проточных частей турбомашин. Традиционно в этом процессе решающую роль играет физический эксперимент. Однако в настоящее время существенно возросло значение численного эксперимента, который не может заменить физический, но с его помощью возможно значительно сократить объем экспериментальных исследований. Кроме того, численный эксперимент обладает такими преимуществами, как существенно меньшие материальные и временные трудозатраты, а также обеспечивает большую информативность и оперативность получаемых результатов. Для получения достоверных результатов численного эксперимента необходимо применение и развитие современных методов математического моделирования нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин. В ИПМаш НАНУ это направление существует более 30 лет. У его истоков стояли академики Проскура Георгий Федорович и Шубенко-Шубин Леонид Александрович. Большой вклад в развитие этого направления внесли такие известные ученые института, как Соколовский Георгий Александрович, Гнесин Виталий Исаевич, Ершов Сергей Владимирович и др.

Основными направлениями исследований ИПМаш НАНУ в этой области являются:

- разработка математических моделей и их реализация в виде программных комплексов;
- расчетно-теоретические исследования нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин;
- проектирование, модернизация и определение направлений аэродинамического совершенствования проточных частей турбомашин.

### **1. Математическая модель**

На современном этапе развития вычислительной газодинамики наиболее приемлемым считается моделирование пространственных вязких течений сжимаемого теплопроводного газа на основе численного интегрирования осредненных уравнений Навье-Стокса [1], для замыкания которых необходимо использовать модель турбулентности. В настоящее время в мире одной из самых удачных для инженерных расчетов считается модель турбулентности SST Ментера [2]. Описанные уравнения являются

нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных смешанного гиперболически-параболического типа. Для их решения следует применять численные методы, которые обеспечивают выполнение определенных требований: консервативность, энтропийное условие, монотонность и точность. В ИПМаш НАНУ была разработана неявная ENO-схема Годунова повышенной точности, обладающая перечисленными свойствами [3, 4]. Решение задач вычислительной газодинамики требует огромных ресурсов ВТ, что вызывает необходимость создания специальных алгоритмов, которые позволяют рационально использовать возможности ЭВМ. В Институте был разработан специальный метод локальной структуризации неструктурированной сеток [5], его применение позволило создать достаточно экономичные программные комплексы [6, 7], которые по быстродействию превосходят в 5-10 раз, требуют в 3-7 раз меньше оперативной памяти по сравнению с зарубежными аналогами и обладают следующими свойствами:

– обеспечивают удовлетворительную точность получаемых результатов как по качественной структуре трехмерных вязких течений, так и по количественной оценке характеристик турбомашин. Рассогласование при расчете потерь кинетической энергии и КПД ступеней турбин составляет около 0,5 – 1% (абсолютных) [8];

– хорошо зарекомендовали себя при проектировании и модернизации лопаточных машин [8];

– используются рядом предприятий Украины, России и Польши при разработке и исследовании турбомашин.

### **2. Расчетно-теоретические исследования нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин**

Поток в проточных частях турбомашин является существенно пространственным и нестационарным. Такие явления, как вторичные течения оказывают значительное влияние на аэродинамические характеристики осевых машин, а в осерадиальных и радиальных проточных частях эти физические эффекты приобретают качественные изменения, за счет чего их удельный вес в формировании общей картины потока еще более усиливается. Кроме того, в радиальных лопаточных машинах за счет конструктивно заложенного разворота течения в двух (тангенциальной и меридиональной) поверхностях «трехмерность» потока принципиально возрастает, что приводит к практически неизбежному появлению отрывов. Существенное влияние на общую структуру течения оказывают выдувы охлаждающего воздуха в турбинах и отборы в компрессорах, перетечки в надбандажных и диафрагменных уплотнениях, учет и анализ этих факторов также важен для обеспечения согласованной работы отдельных элементов проточной части. При совместной работе элементов проточной части турбомашин происходит их взаимное влияние друг на друга, что приводит к усложнению структуры течения, прежде всего к усилению трехмерности потока. За счет

взаимного движения лопаточных аппаратов друг относительно друга возникает периодически нестационарное изменение конфигурации проточной части, что неизбежно приводит к появлению нестационарных эффектов, усложняющих картину течения, таких как: прохождение потенциальной и следовой неравномерностей; дополнительное радиальное перемешивание потока; клокинг-эффект и др. В основном исследование описанных явлений проводилось экспериментально, и, несмотря на достаточно большое число работ, посвященных этим вопросам, имеющиеся знания в этой области весьма ограничены [9, 10, 11 и др.]. Использование численного эксперимента для изучения сложных, существенно пространственных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин открывает возможности для более глубокого понимания этих явлений, установления новых закономерностей и выработки полезных рекомендаций при решении важных технических задач.

### 2.1. Структура вторичных течений в прямой турбинной решетке

Геометрические характеристики решетки и результаты ее экспериментального исследования подробно описаны в работах [12, 13]. Детальное сопоставление расчетных и экспериментальных данных приведено в работе [14]. На рис. 1 с помощью линий тока представлена полученная в расчете структура вторичных течений. На рис. 1,б показана полная картина вторичных течений у торцевой поверхности, а на рис. 1,а дополнительно изображены линии тока в ядре потока. Видно, что течения в концевых сечениях и в невозмущенном потоке существенно отличаются. На рис. 1,в представлена визуализация подковообразного вихря. Вблизи входной кромки расположена точка торможения потока (седловая точка), от которой отходят две ветви подковообразного вихря: одна – со стороны разрежения, а другая – со стороны давления лопатки (рис. 1,в). Течение в окрестности седловой точки можно интерпретировать как столкновение двух потоков: пограничного слоя со стороны входа и отраженной от лопатки струи, пришедшей из ядра потока.

Ветви подковообразного вихря закручиваются относительно друг друга и затекают на сторону разрежения лопатки, после чего движутся в направлении выхода, удаляясь от торцевой поверхности. Пограничный слой, приходящий со входа по торцевой поверхности, полностью «сворачивается» вокруг ветвей подковообразного вихря (рис. 1,г). На рис. 1,д показано перетекание в пограничном слое, формирующее каналный вихрь. Видно, что поток, попадающий в каналный вихрь, приходит из невозмущенной части течения, а не из пограничного слоя. Таким образом, на торцевой поверхности в зоне каналного вихря (за подковообразным вихрем) формируется «новый» пограничный слой. Канальный вихрь в месте затекания с торцевой поверхности на сторону разрежения лопатки инициирует появление углового вихря, показанного на рис. 1,е.

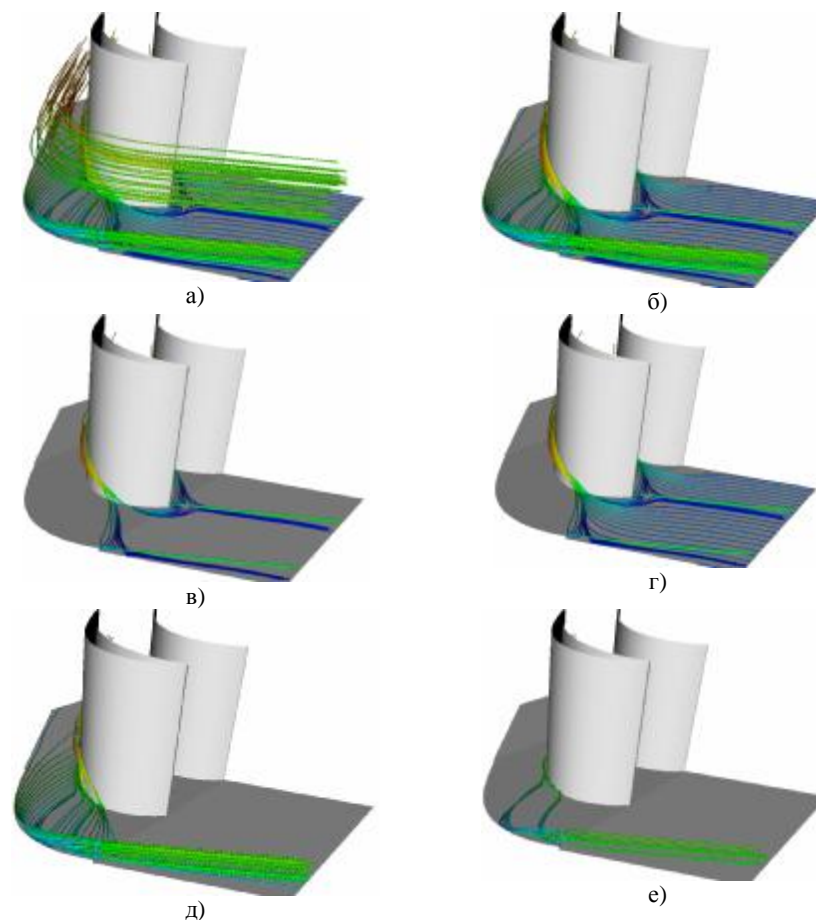


Рис. 1 – Визуализация вторичных течений (расчет)

На рис. 2 представлена визуализация вторичных течений, полученная в эксперименте [12], наблюдается хорошее качественное согласование численных и экспериментальных результатов.

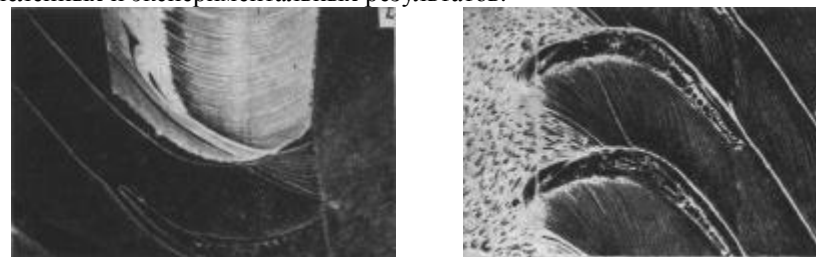


Рис. 2 – Структура вторичных течений (эксперимент)

## 2.2. Периодически нестационарное обтекание турбинной ступени

Выполнено численное исследование периодически нестационарного обтекания турбинной ступени, геометрические и газодинамические характеристики которой приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Геометрические и газодинамические характеристики турбинной ступени

Параметр	Статор	Ротор
Количество лопаток	68	94
Относительная высота лопатки (по среднему сечению)	1.55	2.36
Относительный шаг решетки (по среднему сечению)	0.98	0.87
Высота лопатки [мм]	101	126
Корневой диаметр [мм]	633	629
Частота вращения [об/мин]	-	5150
Осевой зазор [мм] (по среднему сечению)	21.4	
Полное давление на входе [МПа]	0.63726	
Полная температура на входе [К]	1213	
Статическое давление на выходе [МПа]	0.2225	

На рис. 3 дана визуализация линий тока в трех сечениях статора исследуемой ступени. Видно, что в области кромочного следа существует отклонение потока в сторону корневого обвода (по сравнению с основным течением). Такой эффект имеет место в случае неосевого направления потока за лопатками из-за локального нарушения условия радиального равновесия.

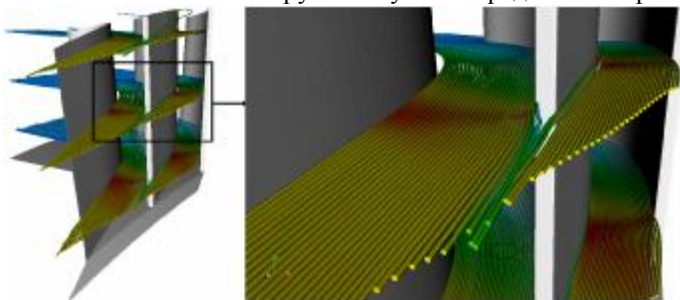


Рис. 3 – Линии тока. Статор

На рис. 4 с помощью изолиний энтропийной функции для четырех моментов времени на периоде изображен процесс прохождения кромочных следов от лопаток статора в среднем сечении ротора. После попадания следа в межлопаточный канал рабочего колеса он перерезается лопаткой и прижимается к стороне разрежения. Вблизи стороны разрежения, где скорость выше, чем в ядре потока и у стороны давления, происходит смыкание соседних следов.

Также на рис. 4 показаны отклонения векторов скорости от среднего значения. Из представленного рисунка хорошо видно, что в областях

прохождения следа возникают флуктуации течения в направлении, противоположном основному потоку, которые инициируют образование вихревых зон. Наличие кромочных следов вызывает дополнительное перетекание потока в радиальном направлении.

На рис. 5 изображено изменение структуры вторичных течений в роторе в зависимости от момента времени на периоде. Картина течения меняется существенным образом, причем при попадании в зону вторичных течений кромочный след сносится на сторону разрежения лопатки, что приводит к усилению трехмерности течения. Глубина периодического проникновения вторичных течений (усиленных кромочным следом) как от корневых, так и от периферийных обводов в сторону средних сечений лопаток ротора весьма значительна.

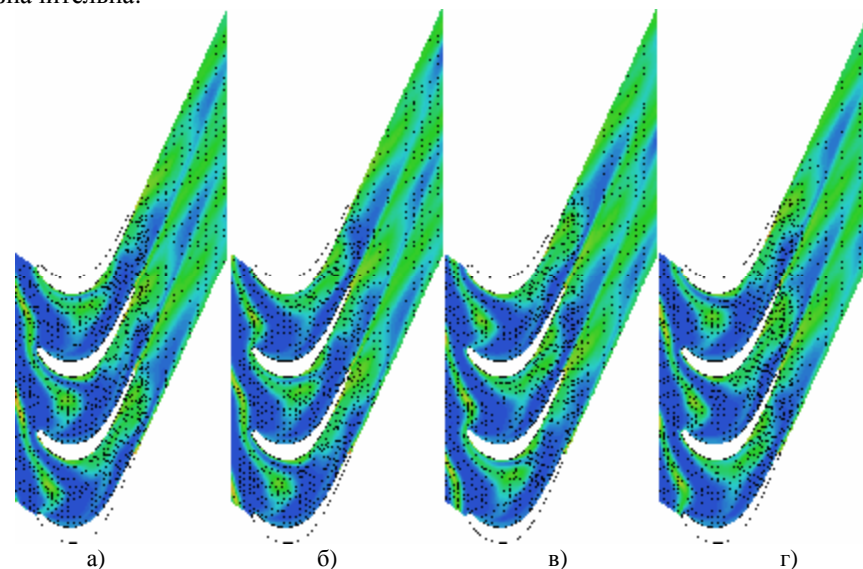


Рис. 4 – Энтропийная функция. Отклонения векторов скорости от среднего значения. Прохождение следов. (а)  $t=0$ ; (б)  $t=0,25T$ ; (в)  $t=0,5T$ ; (г)  $t=0,75T$



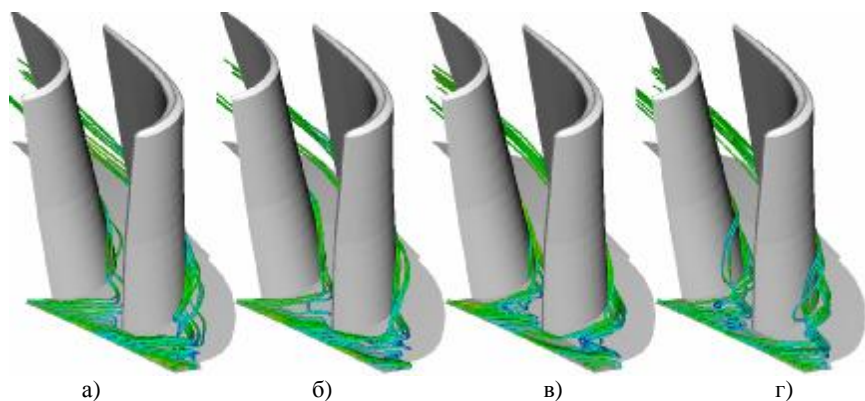


Рис. 5 – Линии тока. Ротор. Вторичные течения.  
(а)  $t=0$ ; (б)  $t=0,25T$ ; (в)  $t=0,5T$ ; (г)  $t=0,75T$

### 3. Проектирование, модернизация и определение направлений аэродинамического совершенствования проточных частей турбомашин

Результаты апробации математических моделей и проведенных исследований позволили перейти к выполнению работ по проектированию и модернизации проточных частей различных типов турбомашин: наземных и авиационных ГТД, газоперекачивающего оборудования; паровых турбин, турбодетандеров. Анализ и изучение газодинамических процессов позволяют определять направления аэродинамического совершенствования проточных частей. Так, в результате выполненных исследований было определено, как пространственная форма лопаток РК влияет на вторичные течения и каким образом можно уменьшить их интенсивность и, соответственно, уменьшить потери кинетической энергии (см. рис. 6). Установлено, что для коротких лопаток РК наименьшая интенсивность вторичных течений достигается при саблевидности РК в форме паруса (в отличие от лопаток НА, для которых оптимальной является саблевидность в форме седла).

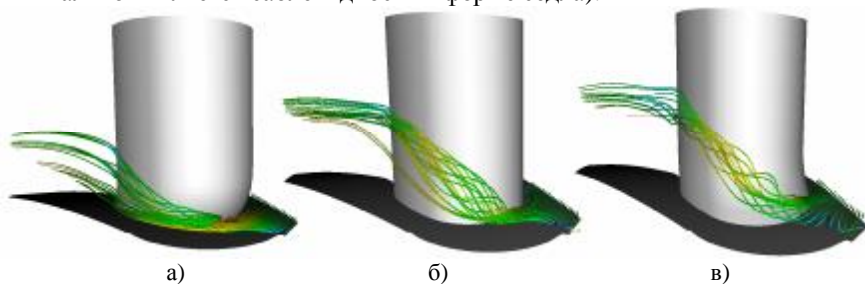


Рис. 6 – Визуализация линий тока в каналах РК с лопатками различных форм саблевидностей: а) – лопатка в форме паруса у корня; б) – прямая лопатка; в) – лопатка в форме седла у корня.

Наземные и авиационные ГТД – это устройства, уровень аэродинамического совершенства которых достаточно высок. Поэтому для них численный эксперимент наиболее актуален именно на этапе доводки. С его помощью удастся существенно сократить количество продувок (до 2-х раз), что приводит к сокращению времени, необходимого на доводку, и, соответственно, снижению материальных затрат. На рисунке 7 представлен пример доводки двигателя ДН80 (производитель «Зоря»-«Машпроект»). После проверки всей турбины была найдена возможность повышения КПД ТНД. В результате изменения формы лопаток улучшилась картина обтекания, «ушел» прикорневой отрыв потока, а КПД увеличился на 1,5%, мощность возросла на 300 кВт [15, 16].

На сегодняшний день программные комплексы ИПМаш НАНУ внедрены на ряде ведущих предприятий Украины, России и Польши, таких как: ЗМКБ «Прогресс», Запорожье, «Зоря»-«Машпроект», Николаев, «Салют», Москва, «Сатурн», Москва, «ЛМЗ», Санкт-Петербург, «Мотор-Сич», Запорожье, «СМНПО им.Фрунзе», Сумы, «Alstom», Эльблонг, Польша, «Турбогаз». Они стали важным инструментом для расчета трехмерных нестационарных течений в проточных частях турбомашин (это входные и выходные устройства, лопаточные аппараты, переходники и др.) и включены в процесс проектирования.

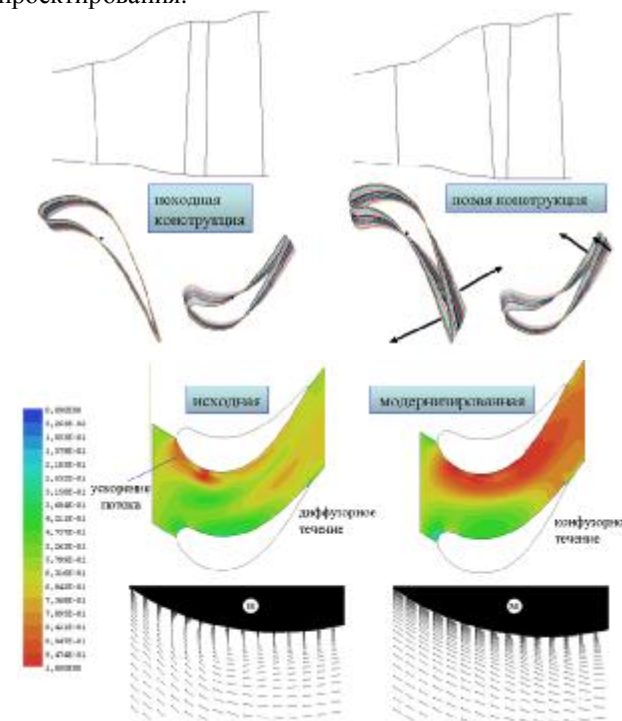


Рис. 7 – Модернизация ТНД ГТД ДН80

## Заключення

В ИПМаш НАНУ створена наукова школа в області математичного моделювання нестационарних просторових турбулентних течій теплопровідного газу, на основі робіт якої створені сучасні методи аеродинамічного розрахунку, що дозволяють вивчати складні газодинамічні процеси і визначати способи аеродинамічного вдосконалення проточних частин турбомашин різного призначення.

Список літератури: 1. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер – М.: Мир, 1990. – 725 с. 2. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA J. – 1994. – 32, № 8. – Р. 1598–1605. 3. Ершов С.В. Квазимонотонная ENO схема повышенной точности для интегрирования уравнений Эйлера и Навье-Стокса // Мат. моделирование. – 1994. – 6, N 11. – С. 58–64. 4. Ершов С.В. Численное моделирование турбулентных отрывных течений в пространственных решетках с использованием неявной ENO схемы С.К. Годунова / С.В. Ершов, А.В. Русанов // Пробл. машиностроения. – 1998. – 1 № 1. – С. 70–78. 5. Русанов А.В. Универсальный метод организации численного интегрирования уравнений газовой динамики. Постановка задачи // Пробл. машиностроения. – 2004. – 7, N 3. – С. 9–13. 6. Ершов С.В. Комплекс программ розрахунку тривимірних течій газу в багатовісцевих турбомашинах “FlowER” / С.В. Ершов, А.В. Русанов: Свідчення про державну реєстрацію прав автора на твір, ПА № 77. Державне агентство України з авторських та суміжних прав, 19.02.1996. 7. Русанов А.В. Метод розрахунку тривимірних турбулентних течій в проточних частих произвольной формы / А.В. Русанов, С.В. Ершов // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования. Сб. Науч. трудов. ИПМаш НАН Украины. – 2003. – 1. – С. 132–136. 8. Lampart P., Yerzhov S., Rusanov A. Validation of turbomachinery flow solver on turbomachinery test cases // International conference SYMKOM02: Compressor & turbine stage flow path theory, experiment & user verification, Ciepłone Maszyny Przepływowe. Turbomachinery., Politechnika Łódzka, Łódź, Poland. – 2002, No. 122. – Р. 63–70. 9. Сивердинг К. Современные достижения в исследовании основных особенностей вторичных течений турбинных решеток // Тр. амер. инж. - мех. Энергет. машины и установки. – 1985. – Т. 107, № 2. – С. 1–13. 10. Шульц Х.Д. Трехмерное отрывное течение на торцевой поверхности кольцевой компрессорной решетки при наличии аэродинамического взаимодействия с расположенным выше по потоку ротором. Часть 2. Нестационарные поля скорости и давления / Х.Д. Шульц, Х.И. Галлус, Б. Лакшминараяна // Современное машиностр. Сер. А. – 1991. – № 3. – С. 172–186. 11. Saren V.E. Experimental and Numerical Investigation of Airfoil Clacking and Inter-Blade-row Effects on Axial Compressor Stage Performance / V.E. Saren, N.M. Savin, D.J. Dorney, D.L. Sondak // AIAA 98-3413. – 1998 – 13 р. 12. Ходсон Х.П. Пространственное течение в решетке профилией турбины низкого давления на расчетном режиме / Х.П. Ходсон, Р.Дж. Домини // Тр. амер. инж.-мех. энергет. Машины и установки. – 1988, № 2. – С. 116–126. 13. Ходсон Х.П. Характеристики турбинной решетки при низких давлениях на нерасчетном режиме / Х.П. Ходсон, Р.Дж. Домини // Тр. амер. инж.-мех. Энергет. машины и установки. – 1988. – № 2. – С. 127–137. 14. Русанов А.В. Апробація чисельної моделі в'язкої турбулентної течії газу в широкому діапазоні режимних параметрів // Зб. наук. праць XI ВПС – 2004. – Вип. 2(11). – С. 3–9. 15. Ершов С.В. Аэродинамическое совершенствование проточной части турбины ГТД на основе расчетов трехмерного вязкого течения. Часть 1. Ступени турбин высокого и низкого давления / С.В. Ершов, А.В. Русанов, Б.В. Исаков и др. // Вестн. двигателестроения. – 2004. – Вып. 2. – С. 41–46. 16. Русанов А.В. Аэродинамическое совершенствование проточной части турбины ГТД на основе расчетов трехмерного вязкого течения. Часть 2. Переходный диффузор и ступень силовой турбины / А.В. Русанов, С.В. Ершов, Б.В. Исаков и др. // Авиаци.-косм. техника и технология. – 2004. – Вып. 8(16). – С. 46 – 50.

Поступила в редколлегию 15.05.2008

## УДК 316.3

*В.М. РИЖИХ, В.О. ШВАДЧЕНКО, О.В. КОРНІСНКО, О.М. ЮРЧЕНКО*

## УКРАЇНА ПЕРЕД ВИКЛИКАМИ СУЧАСНОСТІ В КОНТЕКСТІ ГЛОБАЛІЗАЦІЇ

Рассмотрено состояние вопросов глобализации как комплекса взаимосвязанных процессов, протекающих в мировом масштабе. Дан сравнительный анализ экономического потенциала ведущих государств Европы, Америки, Азии и Африки.

У світовій теорії і практиці другої половини двадцятого сторіччя склався досить впливовий напрямок суспільної думки, який отримав назву філософії глобальних проблем. Цей філософський напрямок, незважаючи на широке коло проблем, що розглядаються, в центр уваги ставить людину, його майбутнє.

Глобалізація, безумовно, ключовий термін сучасної епохи. Глобалізацією називають історичні процеси взаємодії і взаємопроникнення різних цивілізацій, які склалися у сталених територіальних кордонах на базі визначених етносів.

З іншого боку під глобалізацією розуміють виникнення загальних, або з меншою мірою схожих за змістом проблем для різних регіонів світу (екологічних, демографічних, міграційних, продовольчих тощо), а також постійно зростаючу взаємну соціально-політичну залежність країн і формування зон спільних інтересів.

Глобалізація – це комплекс взаємопов'язаних процесів, які протікають в планетарному масштабі, в кожному з яких мають місце механізми саморегуляції.

Глобалізація охоплює всю земну кулю, перетворює світову цивілізацію, яка складається із різних складових, в єдину систему взаємовідносин, що зачіплюють усі сфери суспільного життя.

Складність процесів глобальної взаємозалежності обумовлена взаємодією двох основоположних тенденцій: з одного боку – уніфікації, поглиблення, універсальності життя народів, а з іншого – зростанням її фрагментації, протиріч, конфліктів.

Масштабний рух різних цивілізацій, культур, національних суспільств назустріч один одному, обмін матеріальними та духовними цінностями, формування глобальної культури і етики при одночасному посиленні національно-орієнтованих норм значно актуалізувати проблему взаємовідносин глобального і національного.

В рамках діалектики глобальне – національне особливого значення набуває питання про наслідки глобалізації для етнокультурного розвитку