

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИРОТАТИВНОГО  
ВЕНТИЛЯТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ  
ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

**А.А. Мартиросян**

marutyun@bk.ru

**В.И. Милешин**

mileschin@ciam.ru

**Я.М. Дружинин**

druzhinin.yar@yandex.ru

**П.Г. Кожемяко**

kozhemiyako-pasha@yandex.ru

**Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова  
(ЦИАМ), Москва, Российская Федерация**

---

**Аннотация**

Выполнен расчет аэродинамических характеристик биротативного закапотированного вентилятора CRTF2A с использованием программных комплексов NUMECA FINE TURBO, ANSYS CFX и кода ЦИАМ 3D-IMP-MULTI. При моделировании турбулентного течения использовался RANS-подход. Проведен трехмерный расчет с замыканием осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса различными моделями турбулентности на режимах относительной частоты вращения  $\bar{n} = 1$  и 0,9. В программных комплексах использованы следующие модели турбулентности:  $k-\omega$  (ANSYS CFX, 3D-IMP-MULTI),  $k-\varepsilon$  (ANSYS CFX, NUMECA FINE TURBO, 3D-IMP-MULTI), SST (NUMECA FINE TURBO, ANSYS CFX, 3D-IMP-MULTI). Построены напорные характеристики для каждого программного комплекса и выявлены основные отличия. Построены графики распределения адиабатического коэффициента полезного действия и степени повышения полного давления по высоте для первого и второго роторов для точек максимума КПД на обоих режимах для ANSYS CFX, NUMECA FINE TURBO и 3D-IMP-MULTI

**Ключевые слова**

*Биротативный вентилятор, ANSYS CFX, 3D-IMP-MULTI, NUMECA FINE TURBO, (k-ε)-модель, (k-ω)-модель, Shear Stress Transport*

Поступила 05.02.2018

© Автор(ы), 2019

---

**Введение.** В связи с развитием и совершенствованием газотурбинных двигателей и их компонентов увеличивается стоимость их доводки, испытаний, более точного описания внутренних течений и т. д. Долгое время исследования и разработки осуществлялись в основном при ис-



**Рис. 1.** Биротативный вентилятор CRTF2A

пользовании эмпирических результатов с применением различных подходов при расчетах. Экспериментальные возможности описания течения ограничены, равно как и возможности их теоретического описания. Достигнутый уровень понимания природы протекающих процессов и развитие численных методов, рост мощности и снижение относительной стоимости компьютеров, доступность коммерческого программного обеспечения делают возможным внедрение в инженерную практику современного подхода к математическому моделированию внутренних течений и теплообмена, который использует средства вычислительной газовой динамики (Computational Fluid Dynamics, CFD) [1]. Численное исследование биротативного вентилятора (рис. 1), разработанного в рамках европейской программы VITAL [2], выполнялось в стационарной постановке с помощью программного комплекса (ПК) ЦИАМ 3D-IMP-MULTI и коммерческих ПК NUMECA FINE TURBO, ANSYS CFX.

Краткое описание рассматриваемых моделей турбулентности. Модель  $k-\varepsilon$  — основная двухпараметрическая модель турбулентности (МТ) с уравнениями переноса для турбулентной кинетической энергии  $k$  и скорости турбулентной диссипации  $\varepsilon$ . Формулировка так называемой высокорейнольдсовой модели  $k-\varepsilon$ , удобной для численных расчетов, получила широкое распространение после публикации в 1972 г. книги Б. Лаундера и Б. Сполдинга [3]. Постоянные коэффициенты для этой МТ получены опытным путем, и поэтому она является полуэмпирической.

Стандартная версия МТ  $k-\varepsilon$  позволяет рассчитать некоторые турбулентные течения с точностью, достаточной для многих инженерных расчетов. Напомним, что стандартная МТ  $k-\varepsilon$  имеет теоретическое обоснование только для полностью развитой турбулентности, поэтому в пристеночных узлах используются пристеночные функции.

Модель  $k-\omega$ . Опыт расчетов отрывных турбулентных течений за плохо обтекаемыми телами показал, что модели на основе уравнения для скорости диссипации  $\varepsilon$  предсказывают начало отрыва потока значительно ниже по течению, чем это наблюдается в экспериментах, причем расчетный размер рециркуляционной зоны и интенсивность движения в ней оказываются заниженными. В то же время оказалось, что модели

другого класса, в которых вместо уравнения переноса для  $\epsilon$  используется уравнение для  $\omega = \epsilon / k$  (turbulence frequency — величина, обратная времени жизни крупных вихрей), приводят к лучшему совпадению с экспериментом на данном классе течений, если зона отрыва невелика. Так называемая МТ  $k-\omega$  развивалась в работах Д. Вилкокса [4].

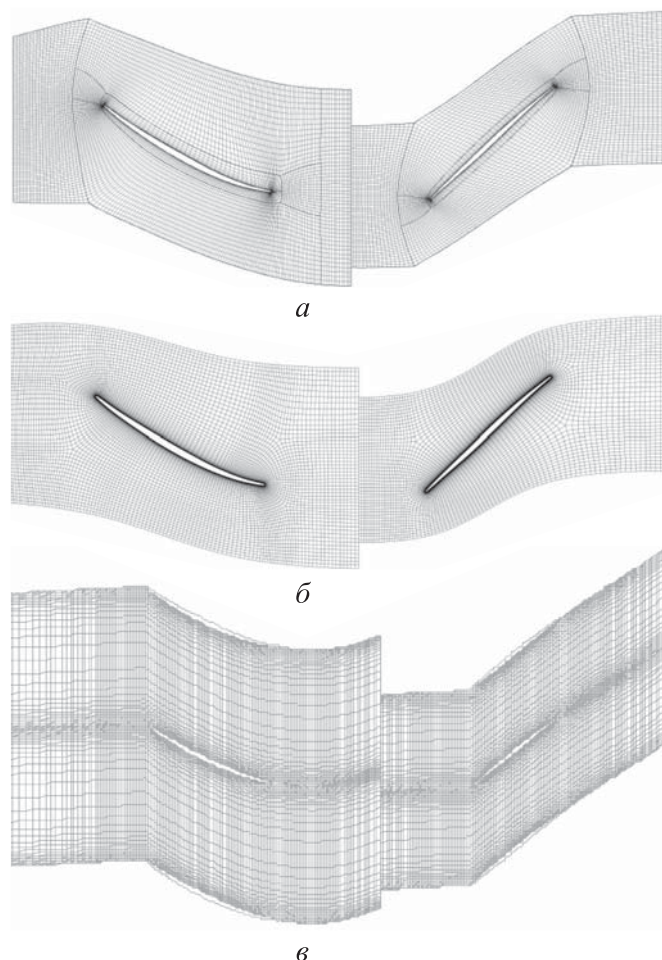
**Модель SST (модель Ментера).** Ментеру принадлежит идея об объединении двух типов моделей  $k-\epsilon$  — вдали от стенок,  $k-\omega$  — вблизи стенок [5]. Считается, что МТ  $k-\omega$  лучше приспособлена к описанию пристеночных течений в пограничных слоях. Однако оказалось, что в свободных течениях вдали от твердых поверхностей (например, в набегающем потоке) возникает проблема задания численного значения  $\omega$  на границах, где поток входит в расчетную область. Проблема заключается в том, что решение существенно зависит от указанного значения  $\omega$  и в отличие от  $\epsilon$  значение  $\omega$  нельзя устремить к нулю. Ментеру принадлежит заслуга описания функции, которая позволяет перейти от МТ  $k-\epsilon$  к МТ  $k-\omega$  вблизи стенки.

**Расчетная область.** В автоматических сеточных генераторах ANSYS TurboGrid и NUMECA AUTOGRID 5 была построена структурированная гексаэдрическая сетка для каждого рабочего колеса (РК). В ПК ЦИАМ 3D-IMP-MULTI использовался собственный сеточный генератор. Информация по расчетной сетке приведена в табл. 1. На рис. 2 показаны сетки в межлопаточных каналах в каждом ПК.

Таблица 1

Параметры расчетной сетки

Параметры	NUMECA AUTOGRID 5		ANSYS TurboGrid		3D-IMP-MULTI	
	РК1	РК2	РК1	РК2	РК1	РК2
Число лопаток	10	14	10	14	10	14
Радиальный зазор, мм	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Число элементов	1 091 377	811 757	1 098 826	809 312	1 088 332	807 451
Суммарное число элементов	1 903 134		1 908 138		1 895 783	
Высота первого пристеночного элемента	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Число элементов по высоте	89	89	89	89	89	89



**Рис. 2.** Расчетная сетка в межлопаточном канале:  
*a* — NUMECA AUTOGRID 5; *б* — ANSYS TurboGrid; *в* — 3D-IMP-MULTI

При решении задачи рассматривался сектор каждого венца (рис. 3), соответствующий одному межлопаточному каналу. Для областей рабочих колес от входа и до выхода задавалась частота вращения для режима относительной частоты вращения  $\bar{n} = 1$  и 0,9. Моделирование турбулентного течения осуществлялось с использованием RANS-подхода с замыканием уравнений МТ Менгера — SST,  $k-\omega$ ,  $k-\varepsilon$ .

**Численный метод.** Решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса при использовании ПК NUMECA получены с помощью конечно-разностной схемы Джемсона (2-го–4-го порядков) с применением многосеточной стратегии [6]. В ПК ANSYS CFX с помощью схемы 2-го порядка High Resolution [7], в ПК ЦИАМ 3D-IMP-MULTI использовалась модифицированная схема Годунова [8, 9].

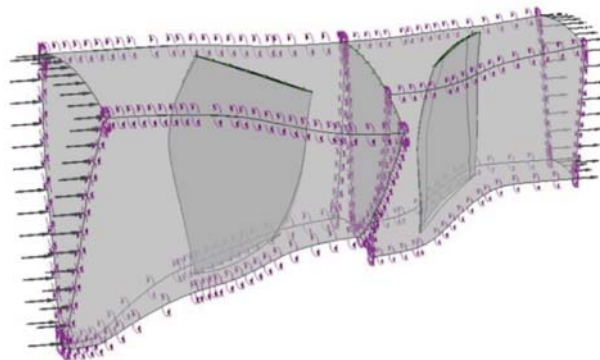


Рис. 3. Расчетная область с граничными условиями

Далее приведены значения полуэмпирических коэффициентов МТ, установленных в ПК.

Модель  $k-\omega$  (ANSYS CFX, 3D-IMP-MULTI):

$$\beta' = 0,09, \alpha_1 = 5 / 9, \beta_1 = 0,075, \sigma_k = 2, \sigma_\omega = 2.$$

Модель  $k-\varepsilon$  (ANSYS CFX, NUMECA, 3D-IMP-MULTI):

$$C_\mu = 0,09, C_{\varepsilon 1} = 1,44, C_{\varepsilon 2} = 1,92, \sigma_{k1} = 1, \sigma_{\varepsilon 1} = 1,3.$$

Модель SST (ANSYS CFX, NUMECA, 3D-IMP-MULTI):

$$\beta' = 0,09, \alpha_1 = 5 / 9, \beta_1 = 0,075, \sigma_{k1} = 1,176, \sigma_{\omega 1} = 2, \alpha_2 = 0,44, \beta_2 = 0,0828, \sigma_{k2} = 1, \sigma_{\omega 2} = 1 / 0,856.$$

Для приведенных параметров потока задавались следующие граничные условия:

вход потока — полное давление 101 325 Па; полная температура 288,15 К; осевое направление абсолютной скорости;

выход потока — статическое давление на втулочном сечении из условия радиального равновесия;

условие периодичности;

условие «прилипания» и отсутствия теплопередачи на стенке;

модели SST,  $k-\omega$ ,  $k-\varepsilon$ ;

mixing Plane — Stage (настройка ANSYS CFX от венца к венцу) — осреднение потока по окружности при передаче информации о потоке от одной области к другой.

**Анализ полученных результатов и сопоставление с экспериментом.**

В ходе расчета, помимо среднеквадратического значения по остатку RMS (Root Mean Square), выводился график изменения приведенного расхода на входе и выходе, степени повышения полного давления, адиабатического КПД. При слабом отклонении этих параметров в течение длительного времени расчет останавливался и анализировался в постпроцессоре.



В ПК NUMECA с МТ  $k-\omega$  не удалось добиться установления решения ни на одном из режимов, поэтому указанная постановка не приводится в настоящей работе.

Для каждого ПК построены графики зависимости степени повышения полного давления  $\pi^*$  и адиабатического КПД  $\eta_{ад}^*$  (рис. 4) от приведенного расхода с определением границы устойчивых режимов (ГУР) для режимов  $\bar{n}=1$  и 0,9 в сравнении с результатами экспериментальных исследований (эксперименту соответствует черная линия с желтыми маркерами). Напорная характеристика рассчитывалась при изменении противодавления на выходе расчетной области. При приближении к ГУР шаг по противодавлению уменьшался для более точного определения границы срыва и коэффициента запасов.

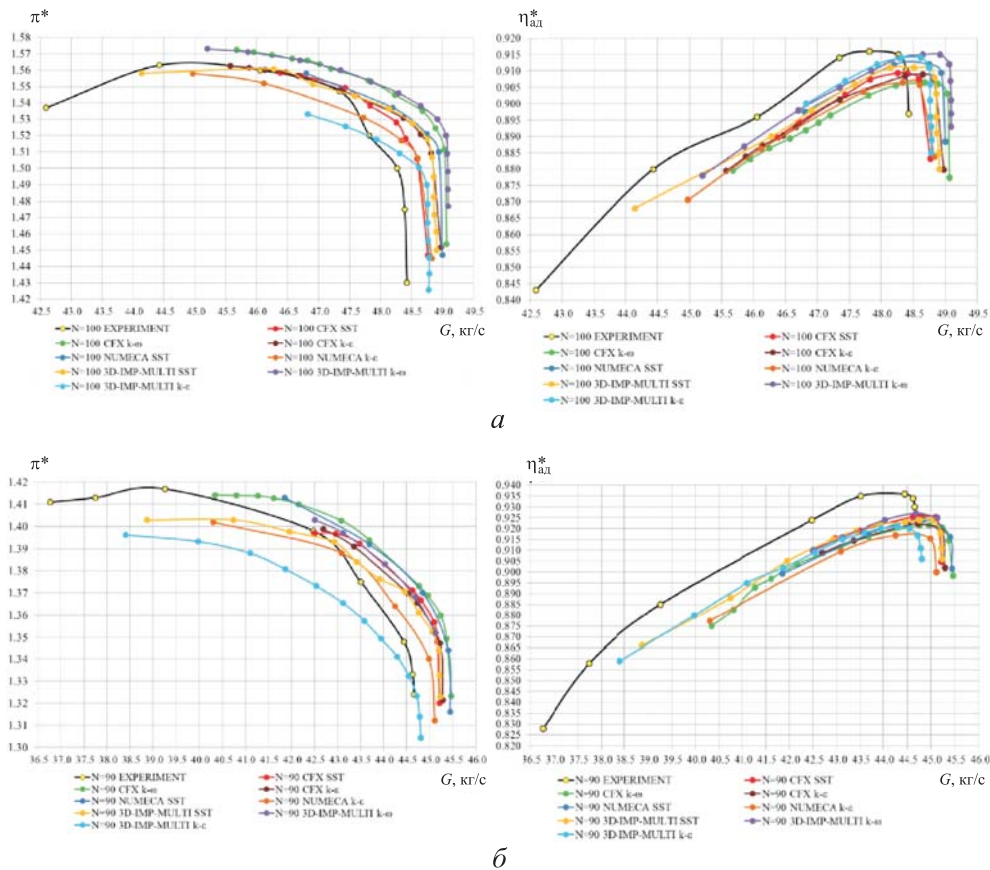


Рис. 4. Интегральные характеристики вентилятора на режиме  $\bar{n} = 1$  (а) и 0,9 (б)

Анализ полученных интегральных характеристик показал, что для режима  $\bar{n} = 1$  максимальный и наиболее близкий к эксперименту КПД демонстрируют результаты расчета с использованием ПК ЦИАМ

3D-IMP-MULTI с МТ  $k-\omega$ . Наиболее близкими к экспериментальной точке ГУР являются точки, полученные с использованием ПК 3D-IMP-MULTI с МТ  $k-\varepsilon$  и SST. Лучшее согласование значений максимального расхода воздуха (отличие от эксперимента  $\sim 0,6$  %) показали постановки 3D-IMP-MULTI МТ  $k-\varepsilon$ , NUMECA МТ  $k-\varepsilon$ , CFX МТ SST.

Анализ полученных с различными МТ значений коэффициента запасов газодинамической устойчивости (ГДУ)  $\Delta K_y$  относительно точки максимума КПД для режима  $\bar{n} = 1$  (табл. 2) показал, что экспериментальное значение  $\Delta K_y$  превышает расчетные величины более чем на 4 % во всех постановках, кроме варианта с использованием ПК 3D-IMP-MULTI с МТ SST, для которого разность составила 2 %. Такое расхождение экспериментальных и расчетных данных указывает на несовершенство используемых МТ при расчете течения вблизи границы устойчивой работы лопаточных машин при наличии интенсивных скачков уплотнения и масштабных отрывных зон, а также при усилении нестационарной составляющей параметров потока, не учитываемой при RANS-подходе (Reynolds Average Navier — Stokes).

Таблица 2

**Значения коэффициента запасов газодинамической устойчивости  $\Delta K_y$  (%) для режима  $\bar{n} = 1$**

Модель турбулентности	ANSYS CFX	NUMECA	3D-IMP-MULTI
$k-\omega$	9	–	10
$k-\varepsilon$	10	10	6
SST	6	7	12
Эксперимент	14		

Сравнение значений  $\Delta K_y$ , полученных в ПК NUMECA с МТ SST и  $k-\varepsilon$  показало, что при использовании МТ  $k-\varepsilon$  удастся достичь решения при больших значениях противодавления по сравнению с МТ SST, что означает большую устойчивость пограничного слоя к градиенту давления при моделировании.

На режиме  $\bar{n} = 0,9$  максимальный и наиболее близкий к экспериментальному значению КПД показали 3D-IMP-MULTI с МТ  $k-\omega$  и SST, ANSYS CFX — с МТ SST. Результаты, наиболее близкие к экспериментальной точке ГУР, получены в 3D-IMP-MULTI с МТ  $k-\varepsilon$  и SST. Вблизи экспериментальной точки запираания расчетные значения ПК NUMECA с МТ  $k-\varepsilon$ , ANSYS CFX с МТ  $k-\varepsilon$  и SST и 3D-IMP-MULTI с МТ  $k-\varepsilon$  лучше всего согласуются между собой.

Анализ полученных с различными моделями турбулентности значений коэффициента запасов ГДУ  $\Delta K_y$  относительно точки максимума КПД при оборотах  $\bar{n} = 0,9$  (табл. 3) показал, что экспериментально полученное значение  $\Delta K_y$  превышает расчетные величины для всех рассматриваемых в работе постановок более чем на 7 %. Такое сильное различие в расчетных и экспериментальных значениях коэффициента запасов ГДУ объясняется характерной особенностью рассматриваемого вентилятора — высоким значением  $\Delta K_y$  на режиме  $\bar{n} = 0,9$ , что характерно для биротативных лопаточных машин с высокой степенью двухконтурности и низкой плотностью венцов. Для таких вентиляторов на некоторых режимах работы определение границы бесрывной работы затруднено и интерпретируется границей, определяемой по максимальному уровню вибраций лопаток, а не по помпажу компрессора в традиционном понимании.

Таблица 3

**Значения коэффициента запасов газодинамической устойчивости  $\Delta K_y$  (%) для режима  $\bar{n} = 0,9$**

Модель турбулентности	ANSYS CFX	NUMECA	3D-IMP-MULTI
$k-\omega$	14	–	8
$k-\varepsilon$	7	13	20
SST	8	11	20
Эксперимент	27		

Полученные отличия в интегральных характеристиках между ПК ЦИАМ 3D-IMP-MULTI и коммерческими ПК ANSYS CFX и NUMECA можно объяснить особенностями построения расчетной сетки и используемой численной конечно-разностной схемы решения системы осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса. В 3D-IMP-MULTI используется топология сетки H-типа, в ANSYS TurboGrid и NUMECA AUTOGRID 5 сетка H-O-H-типа.

Для каждого рабочего колеса в ПК ANSYS CFX, NUMECA и 3D-IMP-MULTI были построены эпюры распределения  $\pi^*$  и  $\eta_{ад}^*$  (рис. 5–7) по высоте  $r$  для точек максимума КПД на обоих режимах. Экспериментальные результаты на графиках радиальных распределений не представлены, поскольку отсутствуют измерения локальных параметров в межвенцовом зазоре вентилятора.

Явно наблюдаются отличия распределений, полученных по ПК 3D-IMP-MULTI, от полей, полученных по коммерческим ПК. Причиной этому может быть как использование разных топологий расчетных сеток, так и численных схем.



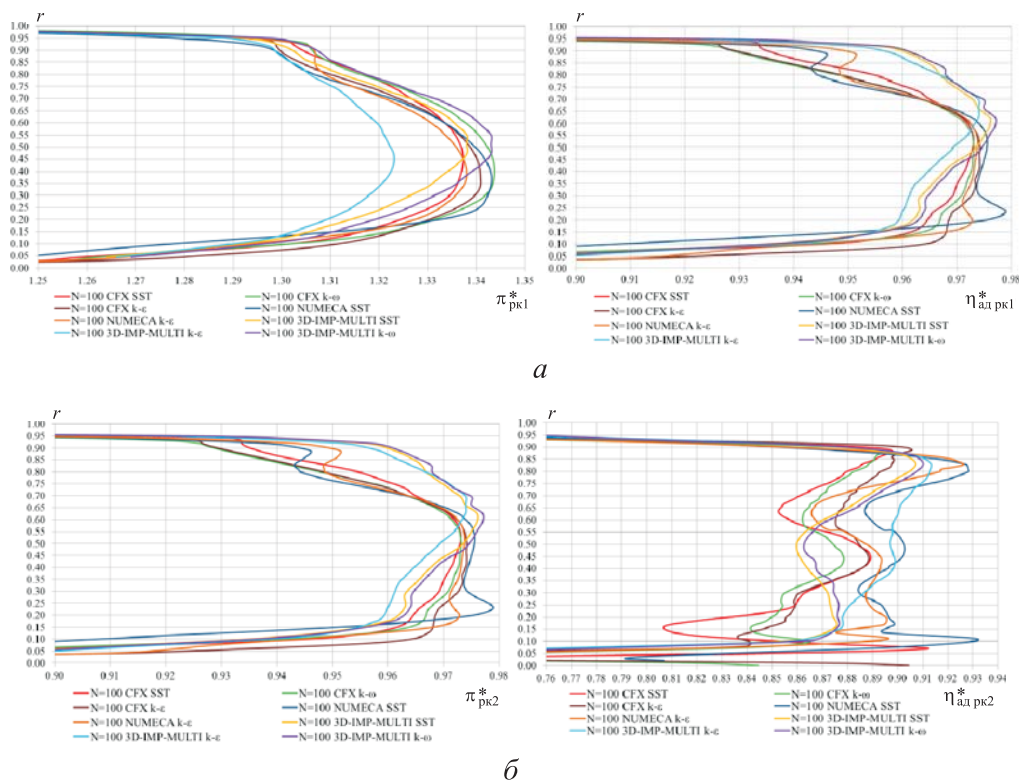


Рис. 5. Интегральные характеристики первого (а) и второго (б) рабочих колес на режиме  $\bar{n} = 1$

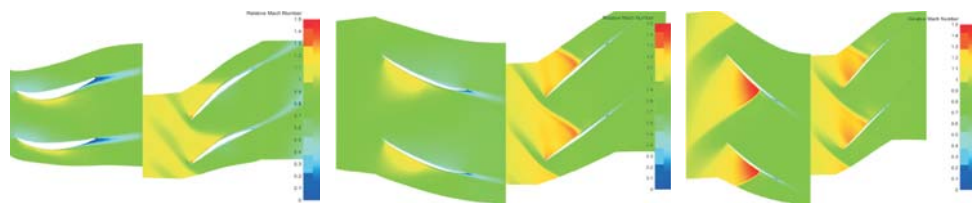


Рис. 6. Распределения относительного числа Маха на относительных высотах 0,1(левый), 0,5 (средний), 0,9 (правый) в точке максимума КПД для ПК NUMECA с МТ SST на режиме  $\bar{n} = 1$ :  $G = 48,75$  кг/с;  $\pi^* = 1,52$ ;  $\eta_{ад}^* = 0,912$

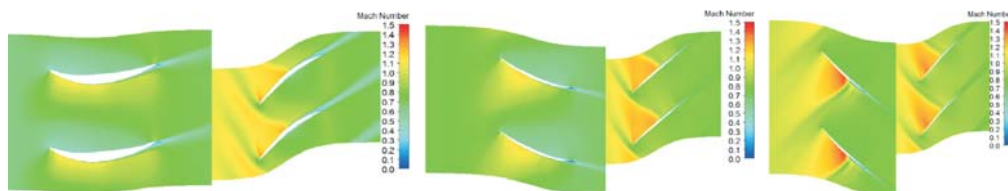


Рис. 7. Распределения относительного числа Маха на относительных высотах (см. рис. 6) в точке максимума КПД для ПК ANSYS CFX с МТ SST на режиме  $\bar{n} = 1$ :  $G = 48,26$  кг/с;  $\pi^* = 1,53$ ;  $\eta_{ад}^* = 0,909$

На режиме  $\bar{n} = 1$  эпюры распределения КПД рабочего колеса 1 идентичных МТ двух ПК отличаются незначительно, КПД рабочего колеса 2 для МТ SST в NUMECA больше, чем в ANSYS CFX. На рис. 6 и 7 приведены картины течения в виде разверток межлопаточных каналов на относительных высотах  $\bar{h} = 0,1; 0,5$  и  $0,9$  для обоих ПК.

Видно, что основное отличие течения наблюдается в ядре потока и на периферии. Анализ полей течения в межлопаточных каналах биротативного вентилятора показал, что обтекание профилей первого ротора в привтулочной части имеет дозвуковой характер. Во втулочном сечении второго ротора присутствует сверхзвуковая зона, ограниченная замыкающим скачком уплотнения. Для распределения, полученного с помощью ПК NUMECA, характерно более втянутое положение скачка уплотнения в каналах второго ротора по сравнению с результатом, полученным в ANSYS CFX. Подобные различия обнаруживаются также в среднем и периферийном сечениях. Обтекание профилей лопаточных венцов первого ротора практически не различимо за исключением более высокого значения числа Маха перед скачком уплотнения для ПК NUMECA. Обнаруженные различия проявляются в интегральных характеристиках в виде более высокого значения расхода воздуха в расчете по ПК NUMECA (рис. 8).

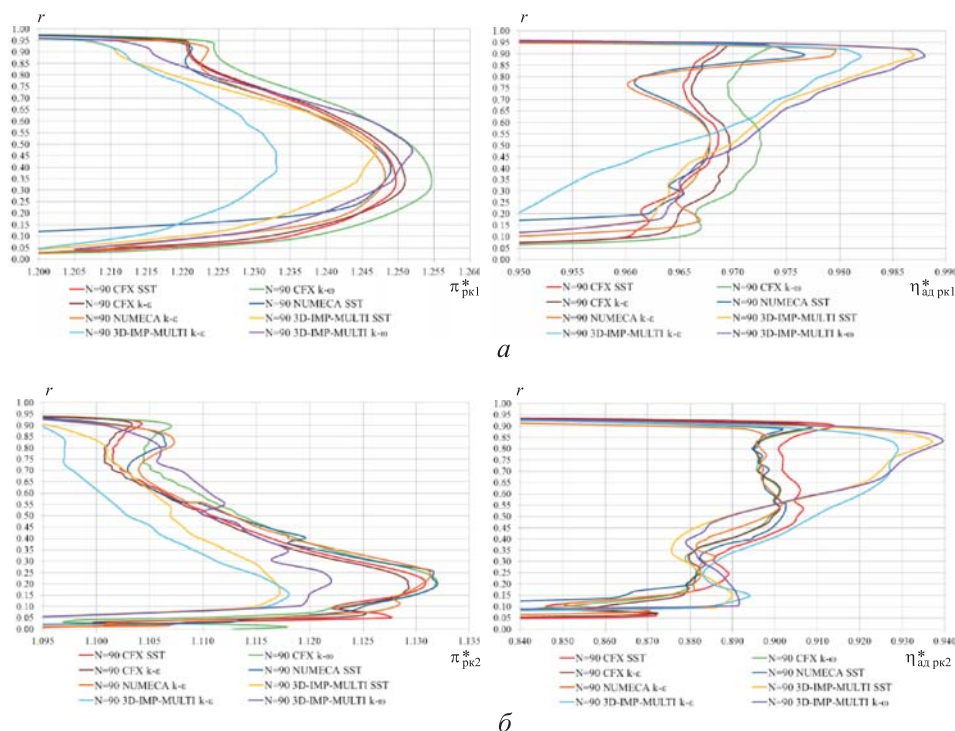
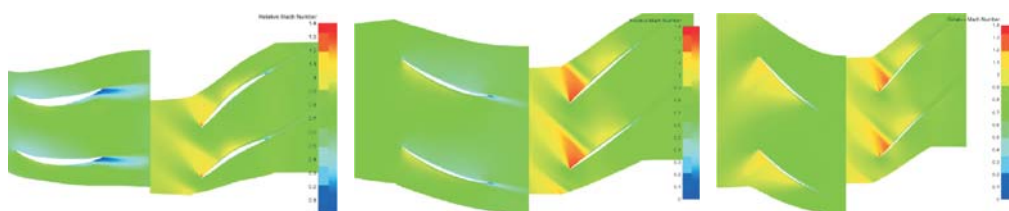
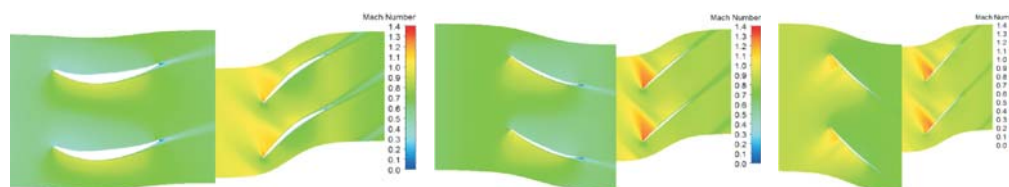


Рис. 8. Интегральные характеристики первого (а) и второго (б) рабочих колес на режиме  $\bar{n} = 0,9$

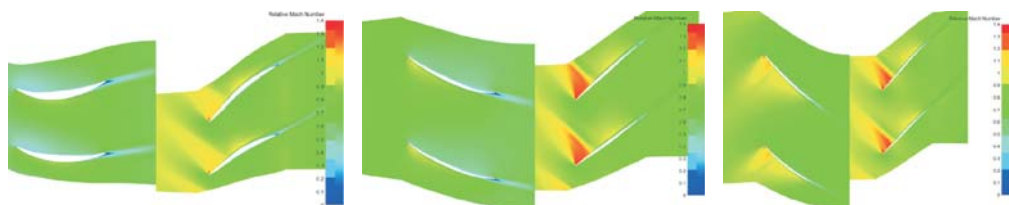
Отметим, что на режиме  $\bar{n} = 0,9$  значения адиабатического КПД на эпюре распределения по высоте для МТ SST в NUMECA в первом рабочем колесе меньше по всей высоте, кроме периферийной области; во втором рабочем колесе значения адиабатического КПД в ANSYS CFX больше по всей высоте. Для МТ  $k-\varepsilon$  в первом рабочем колесе в ANSYS CFX были получены большие значения КПД, кроме локальных областей во втулочном и периферийном сечениях; во втором рабочем колесе наблюдается практически одинаковая эпюра распределения в обоих ПК. На рис. 9–12 приведены развертки межлопаточных каналов для МТ SST и  $k-\varepsilon$ .



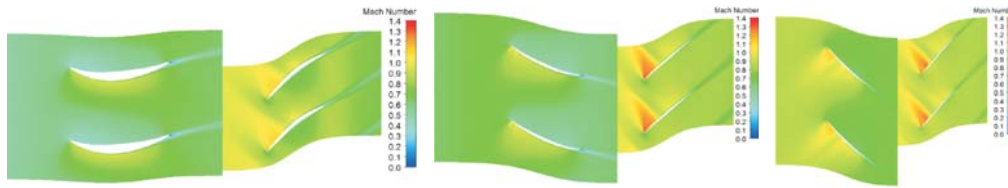
**Рис. 9.** Распределения относительного числа Маха на относительных высотах (см. рис. 6) в точке максимума КПД для ПК NUMECA с МТ SST на режиме  $\bar{n} = 0,9$ :  $G = 44,85$  кг/с;  $\pi^* = 1,37$ ;  $\eta_{ад}^* = 0,924$



**Рис. 10.** Распределения относительного числа Маха на относительных высотах (см. рис. 6) в точке максимума КПД для ПК ANSYS CFX с МТ SST на режиме  $\bar{n} = 0,9$ :  $G = 44,81$  кг/с;  $\pi^* = 1,37$ ;  $\eta_{ад}^* = 0,926$



**Рис. 11.** Распределения относительного числа Маха на относительных высотах (см. рис. 6) в точке максимума КПД для ПК NUMECA с МТ  $k-\varepsilon$  на режиме  $\bar{n} = 0,9$ :  $G = 44,25$  кг/с;  $\pi^* = 1,36$ ;  $\eta_{ад}^* = 0,917$



**Рис. 12.** Распределения относительного числа Маха на относительных высотах (см. рис. 6) в точке максимума КПД для ПК ANSYS CFX с МТ  $k-\varepsilon$  на режиме  $\bar{n} = 0,9$ :  $G = 44,73$  кг/с;  $\pi^* = 1,37$ ;  $\eta_{ад}^* = 0,922$

Видно, что во втулочном сечении первого рабочего колеса вентилятора в области выходной кромки на спинке наблюдается зона отрыва пограничного слоя при решении с использованием ПК NUMECA. Во всех сечениях видны более втянутые скачки уплотнения при использовании ПК ANSYS CFX. Обнаруженные различия объясняют разность в КПД в виде большего значения в ANSYS CFX.

В результате анализа течения при использовании МТ  $k-\varepsilon$ , как и в МТ SST, видны локальные зоны отрыва пограничного слоя в области выходной кромки на спинке первого рабочего колеса в NUMECA, наблюдается сверхзвуковое обтекание профилей первого рабочего колеса в ANSYS CFX, что не проявляется в NUMECA. Стоит отметить более втянутое положение скачков уплотнения в ANSYS CFX. Эти отличия проявились в результате на интегральных характеристиках всего вентилятора и каждого венца.

**Заключение.** При исследовании течения в биротативном вентиляторе CRTF2A были рассмотрены варианты МТ в различных ПК.

Наибольший и наиболее близкий к эксперименту КПД на режиме  $\bar{n} = 1$  показал ПК ЦИАМ 3D-IMP-MULTI с использованием МТ  $k-\omega$ , на режиме  $\bar{n} = 0,9$  — ПК 3D-IMP-MULTI с МТ  $k-\omega$  и ANSYS CFX с МТ SST.

Лучший результат по сравнению с экспериментальной точкой ГУР на режиме  $\bar{n} = 1$  показал расчет в ПК 3D-IMP-MULTI с МТ  $k-\varepsilon$  и SST. На режиме  $\bar{n} = 0,9$  лучшее согласование по  $\Delta K_y$  показал расчет с использованием ПК 3D-IMP-MULTI с МТ  $k-\varepsilon$  и SST.

Вблизи экспериментальной точки записания расчетные значения ПК NUMECA с МТ  $k-\varepsilon$ , ANSYS CFX с МТ  $k-\varepsilon$  и SST и 3D-IMP-MULTI с МТ  $k-\varepsilon$  лучше всего согласуются между собой, при этом расчетные значения расхода превышают экспериментальные на  $\sim 0,6$  % при  $\bar{n} = 1$ . Для расчетов на режиме  $\bar{n} = 0,9$  также характерно превышение максимального значения расхода воздуха для всех постановок, кроме расчета в ПК 3D-IMP-MULTI с МТ  $k-\varepsilon$ , в котором получено практически точное совпадение с экспериментом по расходу вблизи записания.

Экспериментальное значение коэффициента запаса ГДУ  $\Delta K_y$  при  $\bar{n} = 1$  превышает расчетное значение более чем на 2 %, при  $\bar{n} = 0,9$  — на 7 %.

Полученные результаты могут быть рекомендованы при верификации расчетов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Волков К.Н., Емельянов В.Н. Течение и теплообмен в каналах и вращающихся полостях. М., Физматлит, 2010.
- [2] Mileschin V.I., Pankov S.V., Fateev V.A., et al. Ducted counter-rotating fan blades optimization based on 3D inverse problem solution aiming at fan gasdynamics improvement. *Proc. ISABE Int. Conf.*, Montreal, Canada, 2009, no. ISABE-2009-1334.
- [3] Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in mathematical models of turbulence. Academic Press, 1972.
- [4] Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD. DCW Industries Inc., 1998.
- [5] Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.  
DOI: 10.2514/3.12149
- [6] Jameson A. Time dependent calculations using multigrid, with applications to unsteady flows past airfoils and wings. *10th Computational Fluid Dynamics Conf.*, 1991, no. AIAA-91-1596. DOI: 10.2514/6.1991-1596
- [7] Barth T.J., Jespersen D.C. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes. *27th Aerospace Sciences Meeting*, 1989, no. AIAA-89-0366.  
DOI: 10.2514/6.1989-366
- [8] Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М., Наука, 1976.
- [9] Gouskov O.V., Korchenov V.I., Nikiforov D.A. Flow numerical simulation in the propulsion elements of aviation space system within full Navier — Stokes equations. *Proc. Int. Conf. Methods of Aerophysical Research*. Vol. I. Novosibirsk, 1994, pp. 104–109.

**Мартиросян Арутюн Артушович** — инженер отделения «Аэродинамика компрессоров воздушно-реактивных двигателей и газотурбинных установок» Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (Российская Федерация, 111116, Москва, Авиамоторная ул., д. 2).

**Милешин Виктор Иванович** — канд. физ.-мат. наук, начальник отделения «Аэродинамика компрессоров воздушно-реактивных двигателей и газотурбинных установок» Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (Российская Федерация, 111116, Москва, Авиамоторная ул., д. 2).

**Дружинин Ярослав Михайлович** — инженер отделения «Аэродинамика компрессоров воздушно-реактивных двигателей и газотурбинных установок» Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (Российская Федерация, 111116, Москва, Авиамоторная ул., д. 2).



**Кожемяко Павел Георгиевич** — начальник сектора отделения «Аэродинамика компрессоров воздушно-реактивных двигателей и газотурбинных установок» Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (Российская Федерация, 111116, Москва, Авиамоторная ул., д. 2).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Мартиросян А.А., Милешин В.И., Дружинин Я.М. и др. Расчетно-экспериментальное исследование аэродинамических характеристик биротативного вентилятора с использованием различных программных комплексов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 2, с. 115–130.

DOI: 10.18698/0236-3941-2019-2-115-130

**COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION  
OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A COUNTER-ROTATING  
FAN USING VARIOUS SOFTWARE PACKAGES**

**A.A. Martirosyan**

marutyun@bk.ru

**V.I. Mileshin**

mileshin@ciam.ru

**Ya.M. Druzhinin**

druzhinin.yar@yandex.ru

**P.G. Kozhemyako**

kozhemyako-pasha@yandex.ru

**P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development,  
Moscow, Russian Federation**

---

**Abstract**

The paper presents the results of computing aerodynamic properties of the CRTF2A counter-rotating cowled fan developed as part of the European VITAL program. To achieve these results, we used the following software packages: NUMECA FINE TURBO, ANSYS CFX and CIAMs own 3D-IMP-MULTI hydrocode. We use the RANS approach to model turbulent flows. We performed a three-dimensional computation, completing Reynolds-averaged Navier — Stokes equations by various turbulence models for the following relative angular frequency modes:  $\bar{n}=1$  and 0.9. We used the following turbulence models available in the software packages:  $k-\omega$  (ANSYS CFX, 3D-IMP-MULTI),  $k-\varepsilon$  (ANSYS CFX, NUMECA FINE TURBO, 3D-IMP-MULTI), SST (NUMECA FINE TURBO, ANSYS CFX, 3D-IMP-MULTI). We plotted head characteristics for each software package and determined the main differences. We plotted

**Keywords**

*Counter-rotating fan, ANSYS CFX, 3D-IMP-MULTI, NUMECA FINE TURBO,  $k-\varepsilon$  turbulence model,  $k-\omega$  turbulence model, Shear Stress Transport*

adiabatic efficiency and total pressure ratios as functions of height for the first and second rotors at the maximum efficiency points for both modes in the ANSYS CFX, NUMECA FINE TURBO and 3D-IMP-MULTI software packages

Received 05.02.2018  
© Author(s), 2019

---

## REFERENCES

- [1] Volkov K.N., Emelyanov V.N. *Techenie i teploobmen v kanalakh i vrashchayushchikhsya polostyakh* [Flow and heat exchange in channels and rotating cavities]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010.
- [2] Milesin V.I., Pankov S.V., Fateev V.A., et al. Ducted counter-rotating fan blades optimization based on 3D inverse problem solution aiming at fan gasdynamics improvement. *Proc. ISABE Int. Conf.*, Montreal, Canada, 2009, no. ISABE-2009-1334.
- [3] Launder B.E., Spalding D.B. *Lectures in mathematical models of turbulence*. Academic Press, 1972.
- [4] Wilcox D.C. *Turbulence modeling for CFD*. DCW Industries Inc., 1998.
- [5] Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149
- [6] Jameson A. Time dependent calculations using multigrid, with applications to unsteady flows past airfoils and wings. *10th Computational Fluid Dynamics Conf.*, 1991, no. AIAA-91-1596. DOI: 10.2514/6.1991-1596
- [7] Barth T.J., Jespersen D.C. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes. *27th Aerospace Sciences Meeting*, 1989, no. AIAA-89-0366. DOI: 10.2514/6.1989-366
- [8] Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., et al. *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki* [Numerical solution of gas dynamics multidimensional problems]. Moscow, Nauka Publ., 1976.
- [9] Gouskov O.V., Kopchenov V.I., Nikiforov D.A. Flow numerical simulation in the propulsion elements of aviation space system within full Navier — Stokes equations. *Proc. Int. Conf. Methods of Aerophysical Research*. Vol. I. Novosibirsk, 1994, pp. 104–109.

**Martirosyan A.A.** — Engineer, Department of Aerodynamics of Air-Jet Engine Compressors and Gas Turbine Plants, P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (Aviamotornaya ul. 2, Moscow, 111116 Russian Federation).

**Milesin V.I.** — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Head of Department of Aerodynamics of Air-Jet Engine Compressors and Gas Turbine Plants, P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (Aviamotornaya ul. 2, Moscow, 111116 Russian Federation).

**Druzhinin Ya.M.** — Engineer, Department of Aerodynamics of Air-Jet Engine Compressors and Gas Turbine Plants, P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (Aviamotornaya ul. 2, Moscow, 111116 Russian Federation).

**Kozhemyako P.G.** — Head of Sector, Department of Aerodynamics of Air-Jet Engine Compressors and Gas Turbine Plants, P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (Aviamotornaya ul. 2, Moscow, 111116 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Martirosyan A.A., Mileshin V.I., Druzhinin Ya.M., et al. Computational and experimental investigation of aerodynamic characteristics of a counter-rotating fan using various software packages. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Mechanical Engineering*, 2019, no. 2, pp. 115–130 (in Russ.).

DOI: 10.18698/0236-3941-2019-2-115-130

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
press@bmstu.ru  
<http://baumanpress.ru>

---

Подписано в печать 02.04.2019  
Формат 70×108/16  
Усл.-печ. л. 11,4

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
baumanprint@gmail.com