

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОКРУЖНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НА РАБОТУ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА

Д.В. Ворошнин¹, А.С. Муравейко¹, О.В. Маракуева¹, К.Н. Подгорский²,
А.В. Михайлютенко², А.В. Меняйлов²

¹ ООО «НУМЕКА», Санкт-Петербург, d.voroshnin@numeca-ru.com

² АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина, ugk@motorsich.com

Рассматривается влияние входной окружной неоднородности поля полного давления на работу центробежного компрессора. Входная система состоит из патрубка и фермы. Неоднородность поля давления создается путем расположения пластины в различных положениях во входном патрубке перед фермой. Расчетные исследования выполнены с использованием нелинейного гармонического метода NLH. Проводится сравнение расчетного и экспериментального уровня неоднородности на нескольких частотах вращения. Анализируются распределения по окружности полного давления перед и за рабочим колесом.

Для получения сертификата на эксплуатацию летательного аппарата требуется проведение испытаний по оценке влияния эксплуатационных условий на устойчивую работу авиационного ГТД. Поэтому предварительно проводятся стендовые испытания ГТД с затенением потока на входе с помощью пластин и определением влияния неоднородности поля давления на работу компрессора. Количество точек замеров давления в стендовых испытаниях ограничено в силу загромождения потока приемниками, поэтому экспериментальная оценка неоднородности может не отражать реальной картины.

Цель работы - создание расчетной модели входной системы и рабочего колеса (РК) вертолетного двигателя для оценки неоднородности потока. Входная часть включает в себя патрубок и ферму. Затенение потока осуществляется путем установления пластины перед фермой в различных положениях. В работе рассматривались два положения: ближе к соплу и ближе к редуктору (Рис.1).

Замеры полного давления в эксперименте проведены в сечении перед РК на расстоянии 30 мм в 7-ми положениях по окружности и 4-х точках по высоте, всего 28 замеров (Рис.2).

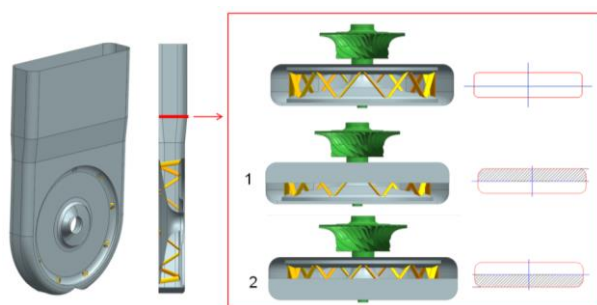


Рис.1. Геометрическая модель исследуемого объекта.

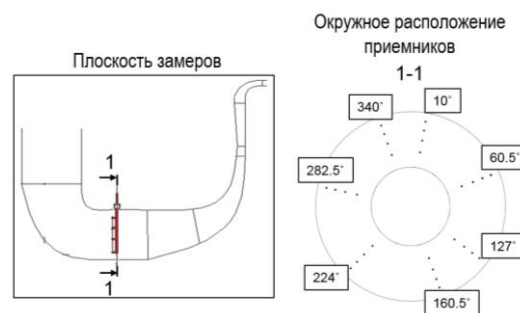


Рис.2. Экспериментальное положение приемников.

Измерения осуществлялись в течение 10 секунд с частотой 50 Гц, после чего находилось среднее значение. Уровень неоднородности определялся по формуле:

$$\sigma = \frac{P_{\max}^* - P_{\min}^*}{P_{\text{среднее}}^*} \times 100\% \quad (1)$$

Использовались приемники полного давления, учитывающие только осевую компоненту скорости. Приемники, расположенные в одинаковом угловом положении, собраны в короб, который может вносить значительные возмущения в течение из-за больших габаритов (Рис. 3).



Рис.3. Приемники полного давления: слева – в масштабе в проточной части, справа - фотография установки.

Расчёты выполнены в ПО *NUMECA FINE/Turbo v.11.2*. Решались осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье - Стокса методом конечных объёмов, для замыкания системы уравнений использовалась модель турбулентности *k-ε* с подключением расширенного пристеночного моделирования. В качестве рабочего тела выбран термически совершенный газ. Граничные условия на входе: P^* , T^* , направление потока, граничное условие на выходе – P .

Ротор - статор взаимодействие моделировалось с помощью поверхности смешения (*Mixing Plane*) в стационарной постановке, в случае решения задачи нелинейным гармоническим методом (*NLH*) использовались неотражающие граничные условия.

Во всех расчетах не учитывалась диффузорная система. Расчетная сетка - блочно-структурированная гексагональная (Рис.3), более детальная информация представлена в таблице 1.

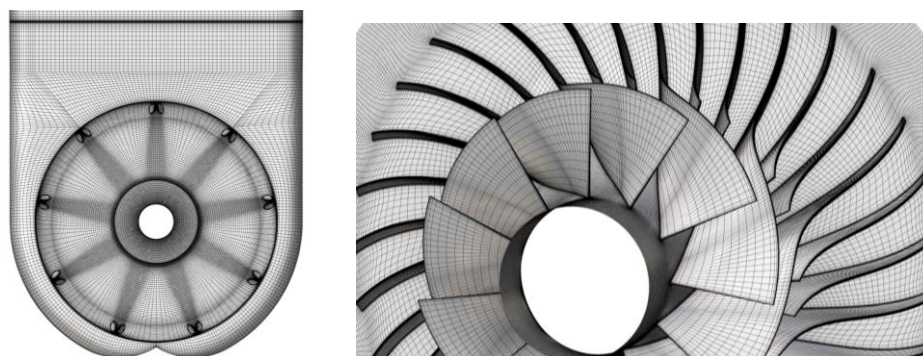


Рис.3. Расчетная сетка входного патрубка, фермы и центробежного колеса.

Таблица 1

Параметры сеточной модели

	Входной патрубок без пластины	Ферма	Рабочее колесо
Сеточный генератор	IGG	автоматический генератор AutoGrid5	
Размер сетки, млн	4,6	8.2 полный разворот	5,2 межлопаточный канал
Мин. скошенность, град	17,5	18,8	23,4
Макс. соотношение сторон	2177	888	2600
Макс. коэффициент роста	1,8	2,7	3,2
Y^+	< 5	< 2	< 2

На первом этапе для оценки течения в РК проведены расчеты в стационарной постановке на всех режимах работы без учета входного патрубка. Ниже на рисунке 4 показаны напорные ветки РК. Вертикальными линиями отмечены экспериментальные границы устойчивости полного компрессора,

включая диффузор, и его рабочие точки, на которых производились замеры полного давления для оценки неоднородности. Из данного графика видно, что на низких оборотах в точке экспериментальных замеров РК находится в срыве.

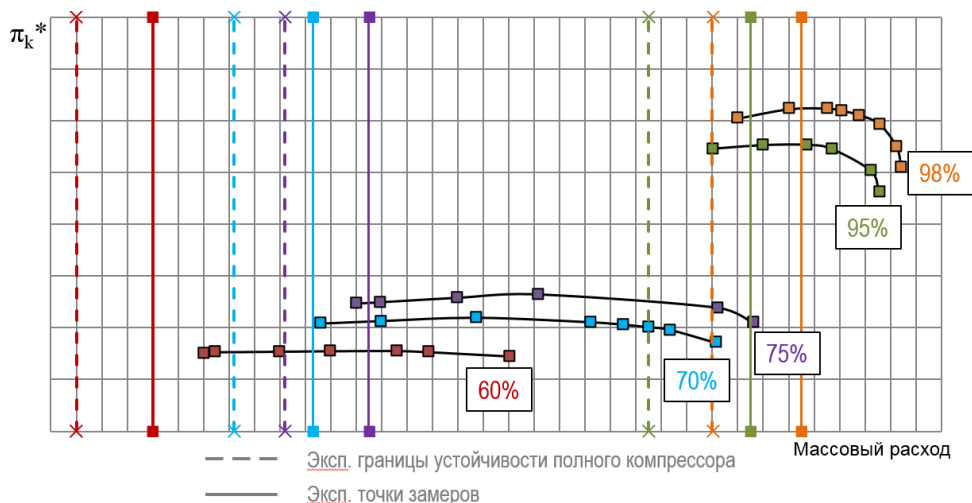


Рис.4. Поле характеристик РК.

На 60% частоты вращения в проточной части реализуются нестационарные вихревые структуры, обуславливающие высокий уровень неоднородности, полученный в расчете и эксперименте (Рис. 5-6).

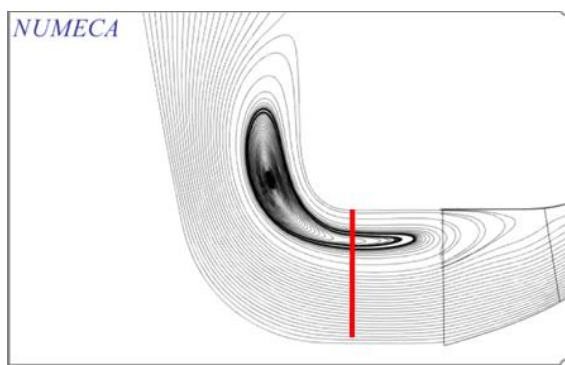


Рис.5. Срывное течение в рабочем колесе на 60% частоты вращения.

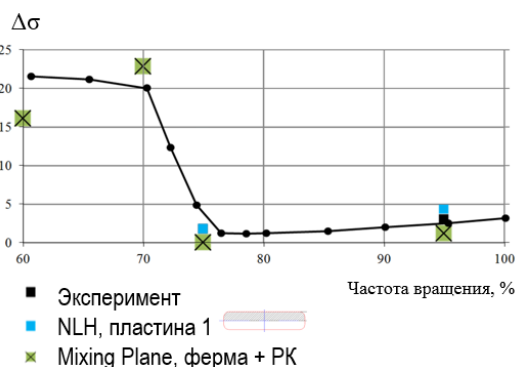


Рис.6. Уровень неоднородности на различных частотах вращения.

Последующие расчеты проведены с учетом входной системы с использованием нелинейного гармонического метода NLH. В данном методе нестационарная составляющая газодинамических переменных раскладывается в ряд Фурье с гармониками, кратными частоте вращения лопаток. В целях установления необходимого количества гармоник для обеспечения качества проводимого анализа выполнены расчеты с 5-ю и 10-ю гармониками. Результаты показали, что при использовании 5-ти гармоник существенная часть входной неравномерности сглаживается после прохождения ротор-статор интерфейса, поэтому в дальнейшем анализе использовались 10 (Рис.7).

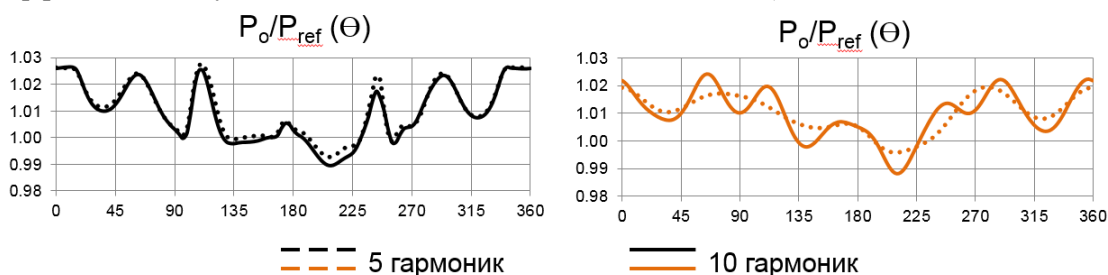


Рис.7. Моделирование неравномерности различным количеством гармоник

Влияние положения пластины на входе рассматривалось для 95% частоты вращения РК (Рис.8). Все данные приведены к стандартной атмосфере на входе в РК. Влияние наличия и положения пластины на интегральные параметры колеса незначительно: пластина приводит к понижению степени сжатия и КПД.

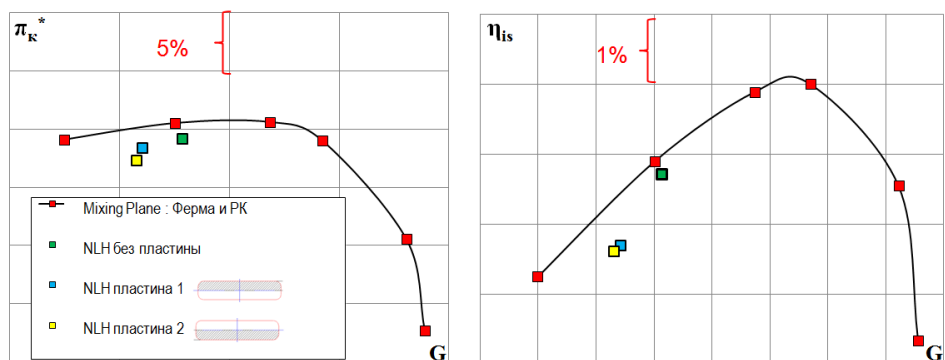


Рис.8. Интегральные параметры на частоте вращения РК 95%.

Осредненная во времени неоднородность поля полного давления перед РК сильно зависит от положения пластины (Рис.9). Неоднородность вдоль канала перед РК эволюционирует: при приближении к РК зона вторичных течений вблизи периферии в верхнем секторе увеличивается.

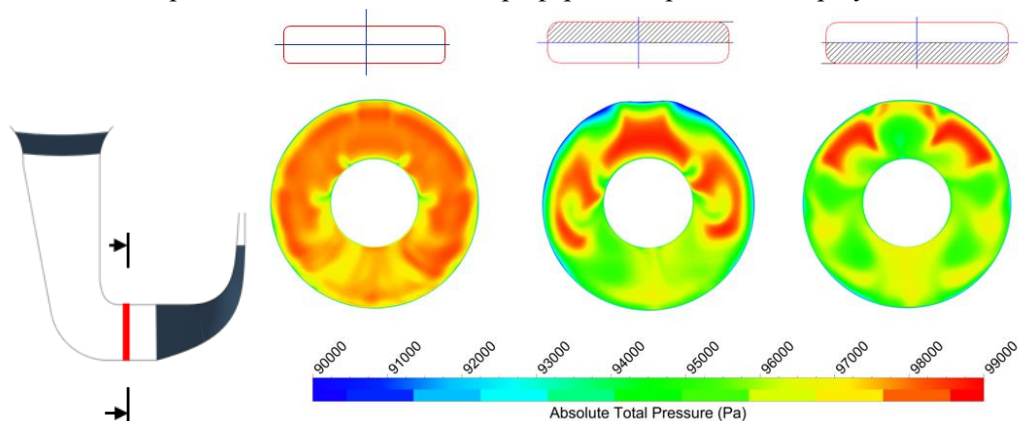


Рис.9. Осредненная неоднородность давления перед РК.

Для расчетов с пластиной проводилось сравнение окружных эпюр давления в сечении перед РК на различных радиусах: экспериментальной с 7-ю замераами по окружности и расчетных с 7-ю и 120-ю замераами (Рис.10). Сравнение показало, что 7-ми точек замеров по окружности недостаточно для оценки неоднородности, высока вероятность попадания в локальный экстремум. Во времени наблюдаются большие пульсации давления, амплитуды которых достигают 3%.

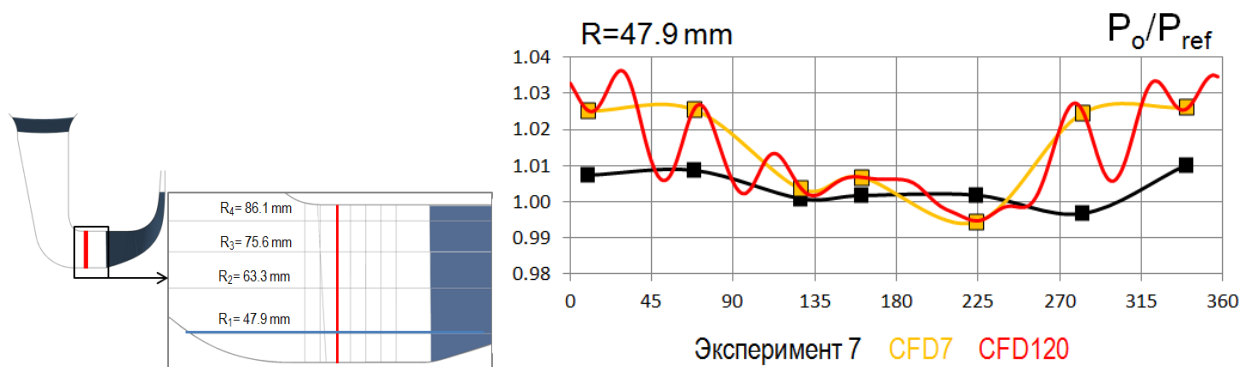


Рис.10. Распределения по окружности осредненного полного давления.

Как было упомянуто ранее, приемники давления фиксируют только осевую скорость, в то время как расчетные исследования показывают в течении наличие зон с большой закруткой потока

(Рис.11). Таким образом, оценка полного давления в эксперименте проведена с большой погрешностью.

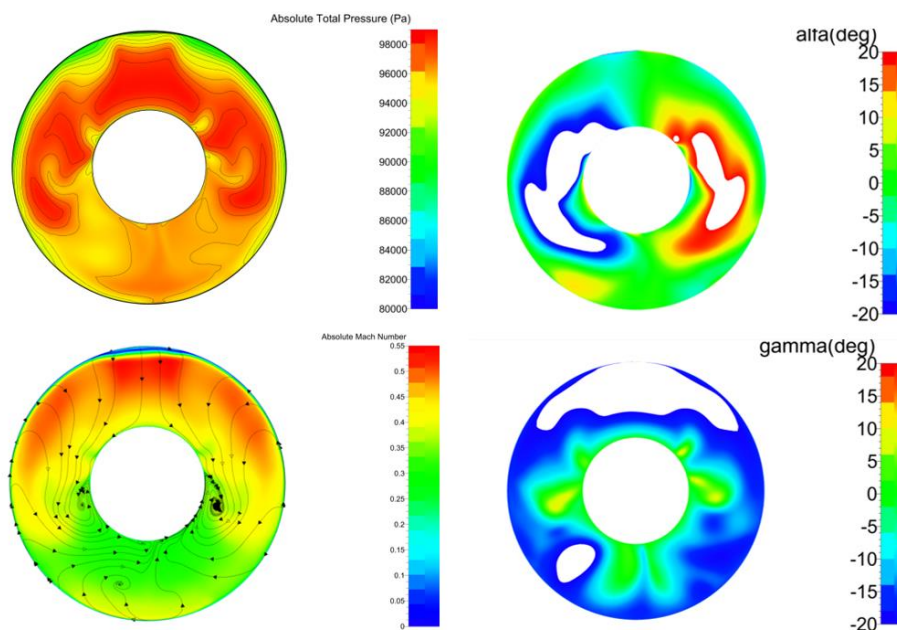


Рис.11. Закрутка потока перед РК.

Влияние РК на уровень неоднородности незначительно, что подтвердили расчеты без него.

Так как целью работ по исследованию входной неоднородности является оценка влияния затенения на работу и запасы ГДУ компрессора, анализировалось осреднённое во времени распределение полного давления и за РК. Высокая неоднородность, которая может сильно ухудшать работу диффузорной системы, присутствует при всех положениях пластины.

Расчетная оценка неоднородности потока на входе в вертолетный двигатель показала несовершенство экспериментальных замеров в силу малого количества приемников, их сильного влияния на поток, неверной оценки полного давления. Анализ неравномерности на низких режимах работы неэффективен из-за срывной работы РК. В дальнейшем предполагается включение геометрии приемников в расчетную модель и рассмотрение других положений пластин.

Литература

1. Japikse D. "Introduction to Turbomachinery", Concepts ETI, Inc., 1997.
2. C. Hirsch, Numerical Computation of Internal & External Flows: the Fundamentals of Computational Fluid Dynamics, 2nd ed. Elsevier, 2007.
3. NUMECA Int., "Flow Integrated Environment", User Manual, Numeca Int., Brussels, Belgium, 2014.
4. Кампти, Н. Аэродинамика компрессоров Текст. / Н. Кампти.- М.: Мир, перевод под ред. Ф. Ш. Гельмедова, 2000.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя (3-е издание). М.: Наука, 1974
6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.-Л.: Гостехиздат, 1950.