

Расчет тонального шума вентилятора РСУ с поворотными лопатками

Авторы: Россихин А.А., Панков С.В., Милешин В.И.

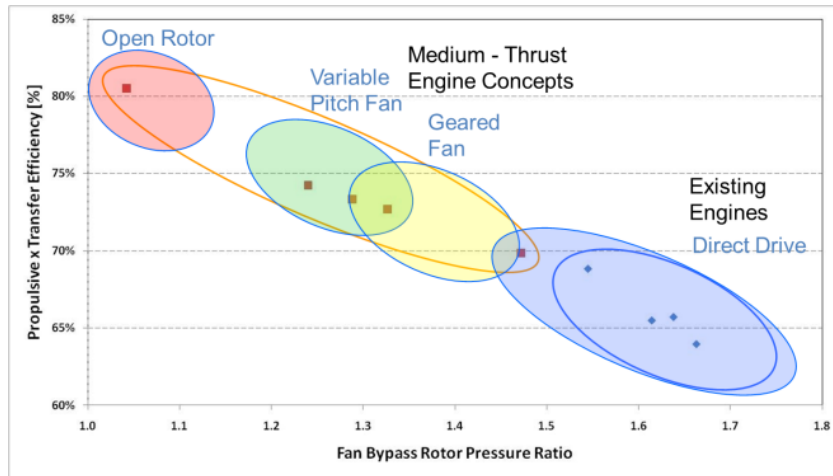
Докладчик: Россихин А.А.



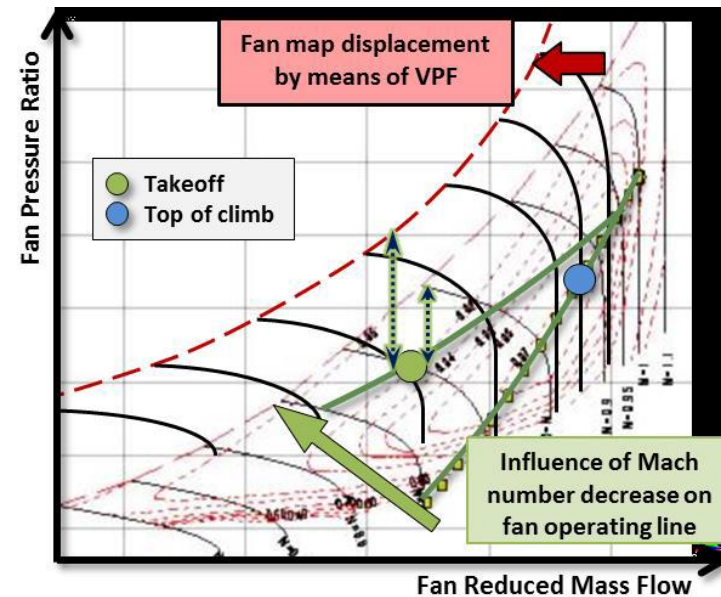
Вентиляторы с поворотными лопатками

Мотивация к использованию поворотных лопаток

- Необходимость обеспечения реверса
- Поворотные лопатки могут быть необходимы для повышение запасов ГДУ на взлетных и посадочных режимах



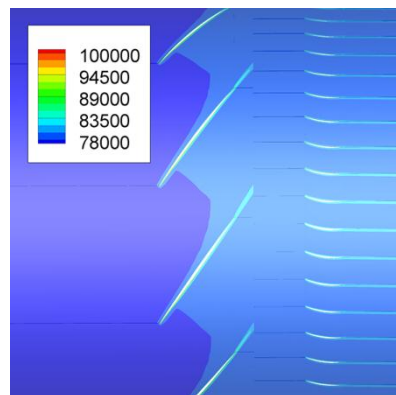
Зависимость полетного КПД от степени повышения полного давления



Смещение рабочей линии для вентилятора с поворотными лопатками разработанного в рамках программы ENOVAL

Метод исследования

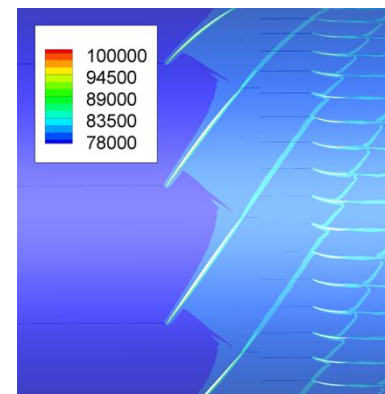
Расчет стационарного поля течения



Метод расчёта ЦИАМ

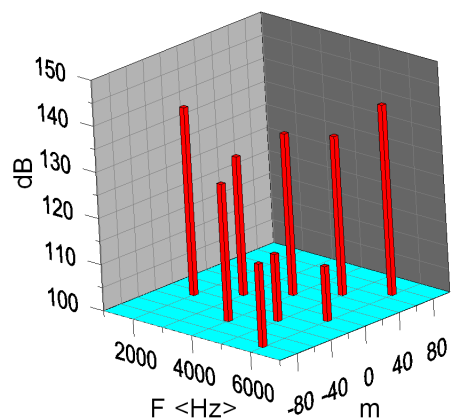
Цилиндрическое сечение – энтропийная функция

Расчет нестационарных возмущений

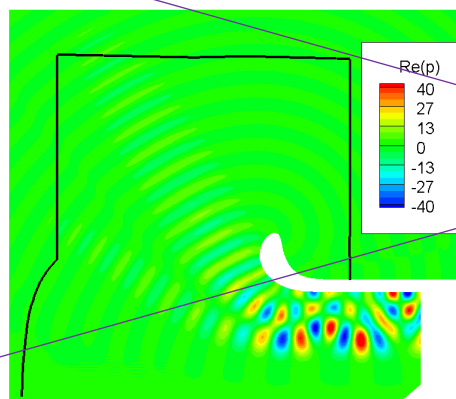


Метод расчёта ЦИАМ

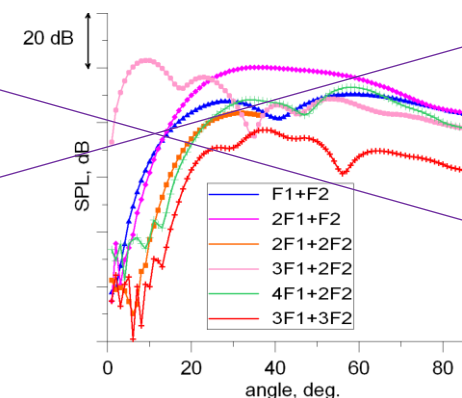
Модальный анализ



Расчет распространения



Расчет пульсаций давления в дальнем поле



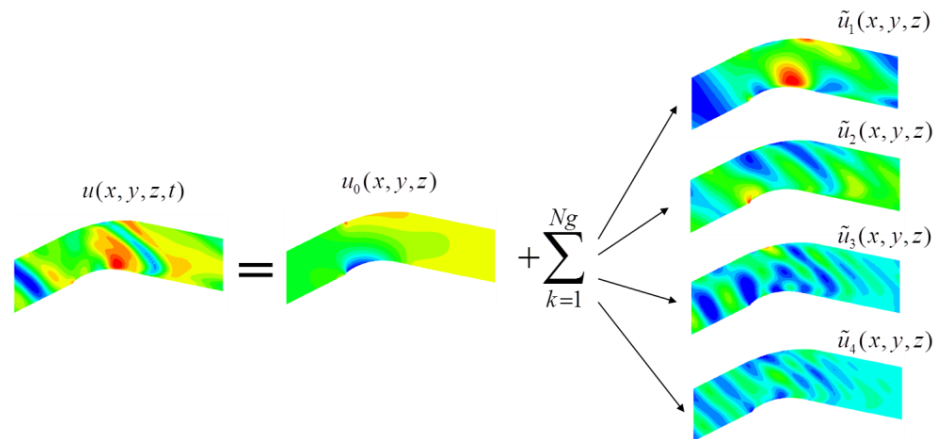
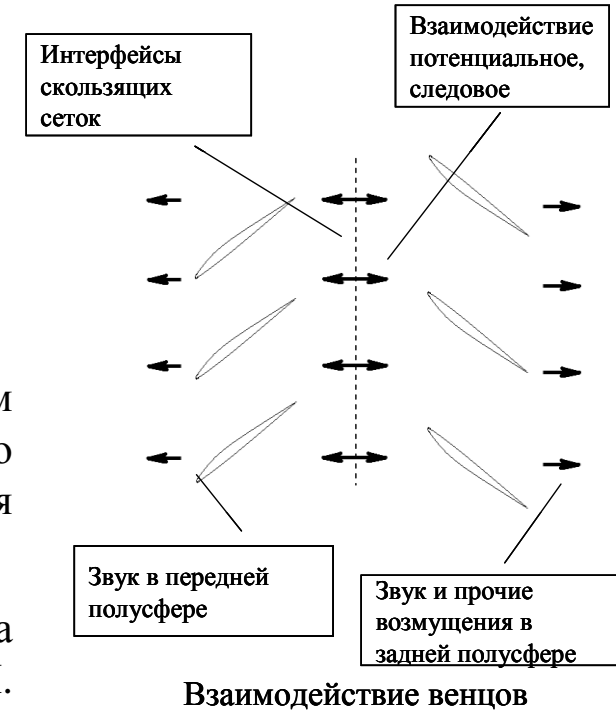
Метод расчёта ЦИАМ

Метод расчёта

Задача расчета взаимодействия решается с использованием нестационарных уравнений Эйлера для возмущений поверх стационарного поля течения, записанных в консервативных переменных в системе отсчета связанной с венцом. Взаимодействие между венцами осуществляется с помощью интерфейса скользящих сеток

Численная схема

- Дискретизация по пространству построена на основе метода конечных объемов с использованием обобщенной на метод конечных объемов DRP схемы (Dispersion Relation Preserving Scheme). Это оптимизированная для решения задач аэроакустики схема четвертого порядка, имеющая семиточечный шаблон. (С. Tam, J. Webb, 1993)
- Аппроксимации по времени осуществляется на основе явной четырехшаговой схемы Рунге-Кутты второго порядка (LDDRK – Low Dissipation and Dispersion Runge-Kutta Schemes). (F. Hu, M. Hussaini, J. Manthey, 1994). Также могут использоваться схемы Рунге-Кутта типа HALE-RK (High-accuracy large-step explicit Runge-Kutta) четвертого порядка

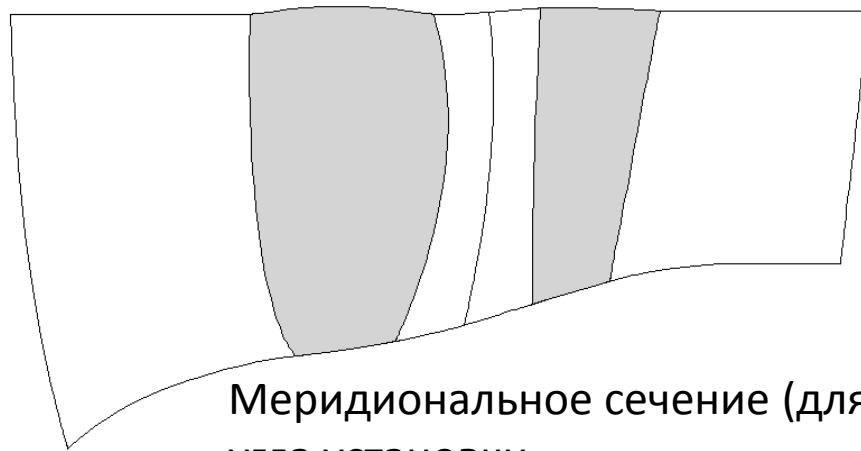


Программный комплекс позволяет проводить расчет генерации и распространения возмущений как во временной области так и в частотной области для заданного набора гармоник в каждом и венцов

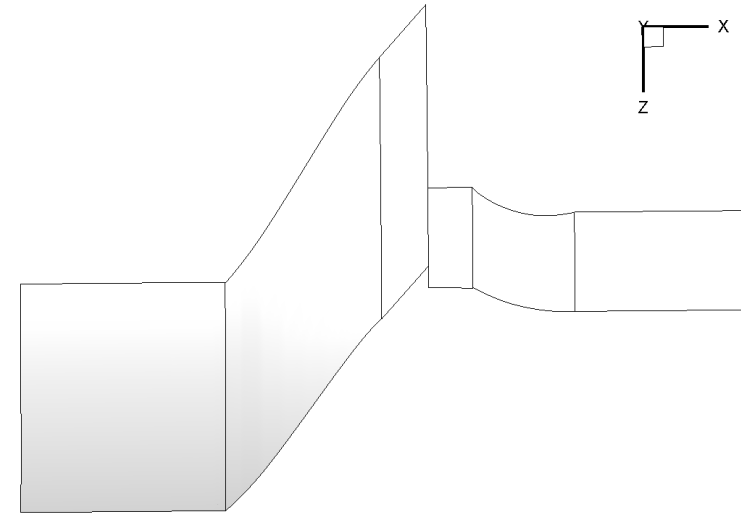
В данной работе используется только расчет в частотной области

Объект исследования

В работе представлено исследование тонального шума вентилятора, разработанного в рамках работ по вентилятору распределённой силовой установки (РСУ) с поворотными лопатками. Исследование выполнено для режима «посадка»



Меридиональное сечение (для номинального угла установки)



Вид сверху

Рассматриваемый вентилятор представляет собой модель радиусом 715 мм

Расчётное значение окружной скорости вращения рабочих лопаток на проектном режиме для номинального угла установки лопаток $n_{пр} = 340$ м/с.

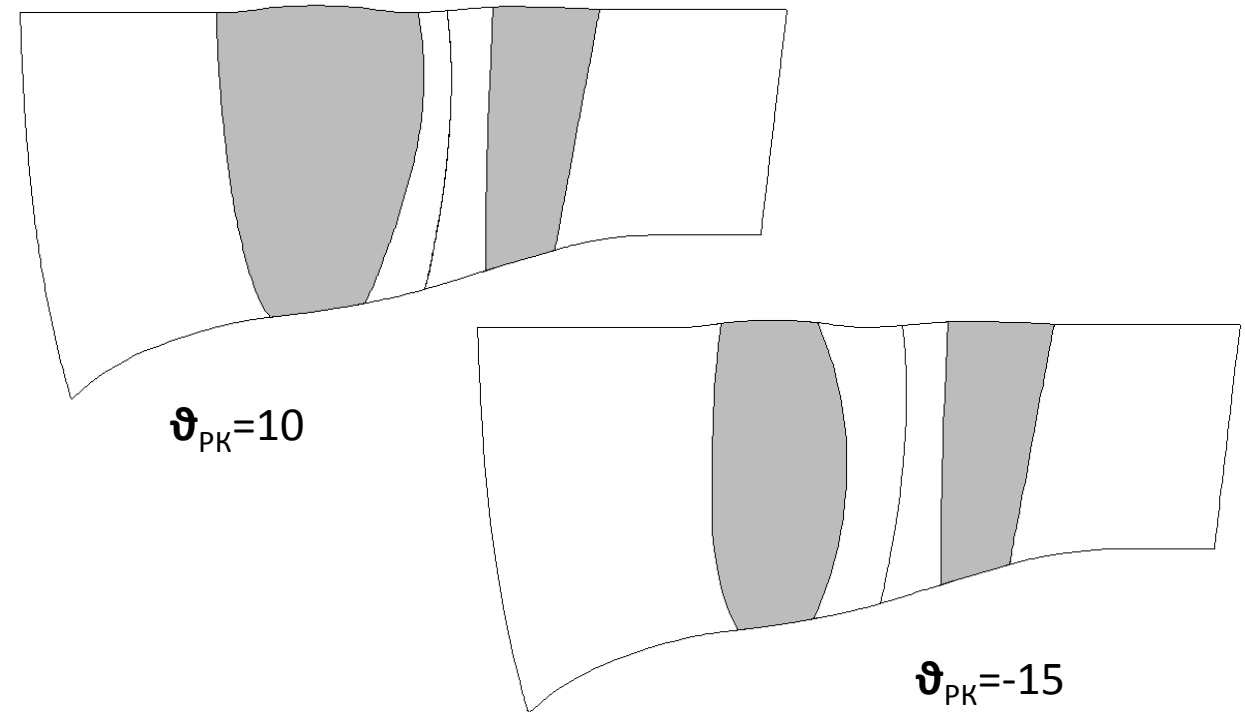
Модель имеет в рабочем колесе (РК) 11 лопаток, в спрямляющем аппарате (СА) – 29 лопаток.

Расчетная модель

Серия расчетов была выполнена с помощью разработанного в ЦИАМ метода расчёта аэродинамических характеристик

Для проведения расчетов был построен набор сеток для 12 разных углов установки. Углы установки задавались через величину ϑ_{PK} , равную углу поворота лопатки рабочего колеса от номинального угла установки. При отклонении угла установки лопатки от номинального угла установки в сторону раскрытия он принимает положительное значение, а в сторону закрытия - отрицательное значение.

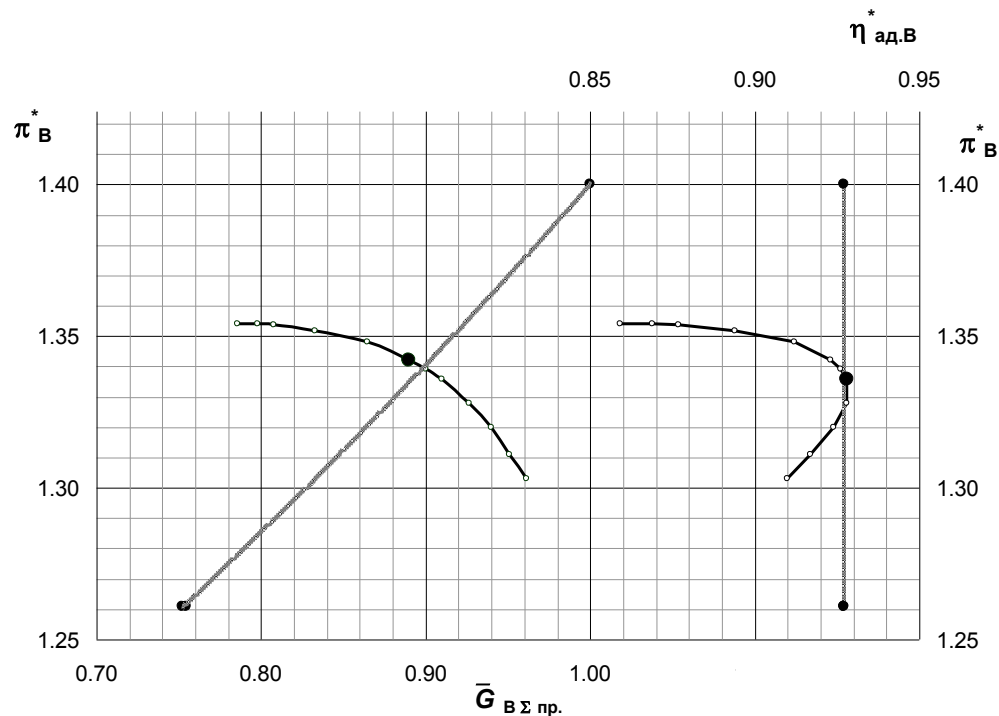
Меридиональные сечения



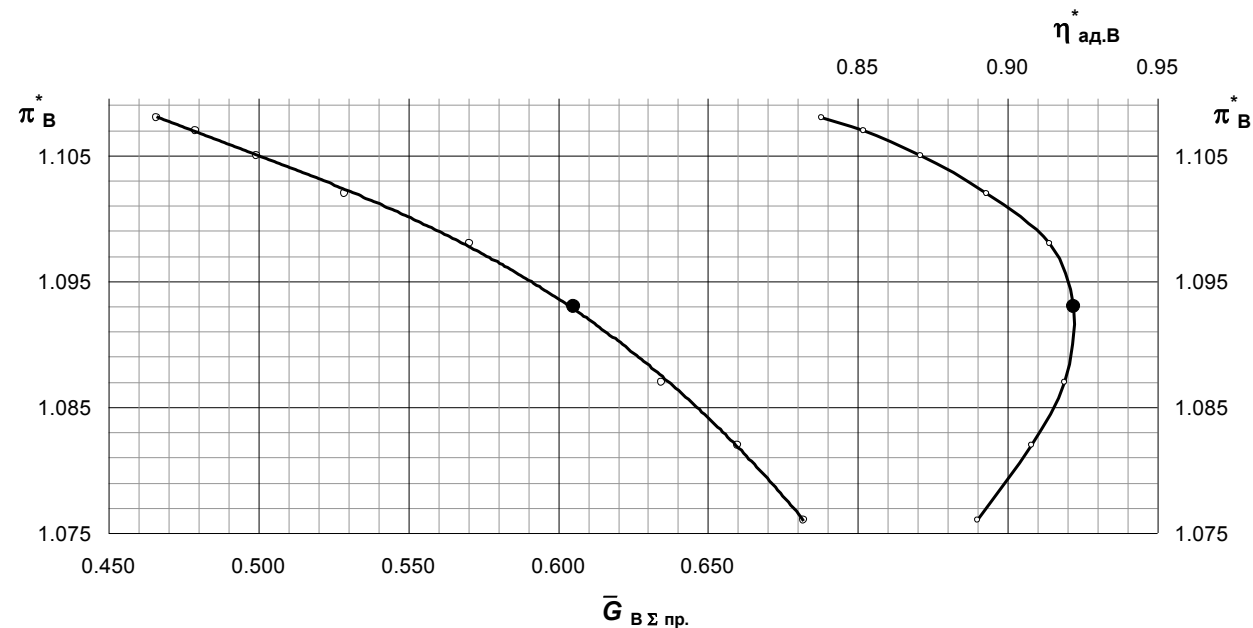
Параметры расчетных сеток

Колесо	$l_m \times J_m \times K_m$	Ячеек на лопатку	Кол-во ячеек
PK	250 × 60 × 60	150 × 60 × 60	900000
СА	200 × 60 × 60	125 × 60 × 60	720000
Всего:			1620000

Аэродинамические характеристики вентилятора для номинального угла установки лопаток

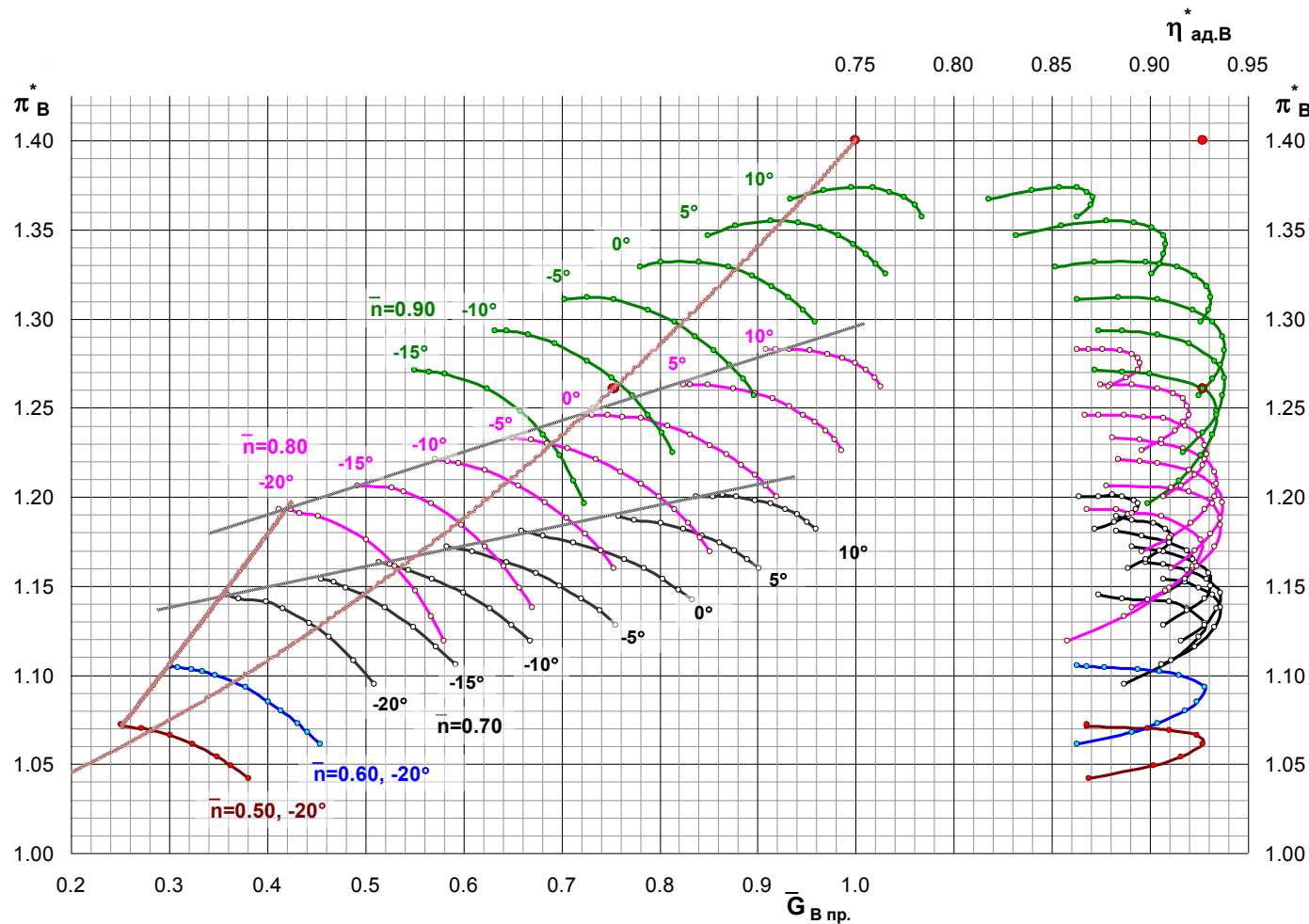


Характеристики вентилятора на режиме «взлёт», $\bar{n}=0.905$, $\vartheta_{рК}=0^\circ$, выделена точка максимума КПД; показаны расчётные точки, $\bar{n}=1.00, 0.900$



Характеристики вентилятора на режиме «посадка», $\bar{n}=0.54$, $\vartheta_{рК}=0^\circ$, выделена точка максимума КПД.

Зависимость аэродинамических характеристик от угла установки лопаток

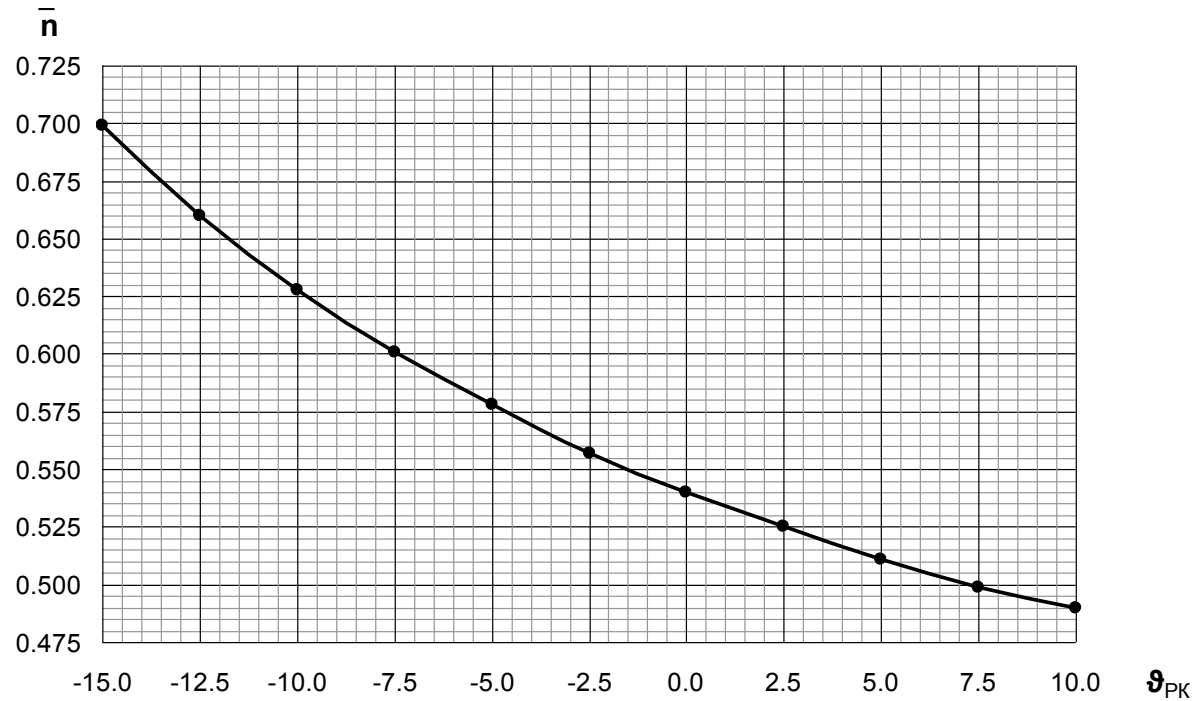


Для одного значения оборотов для разных углов установки характеристики вентилятора существенно различаются

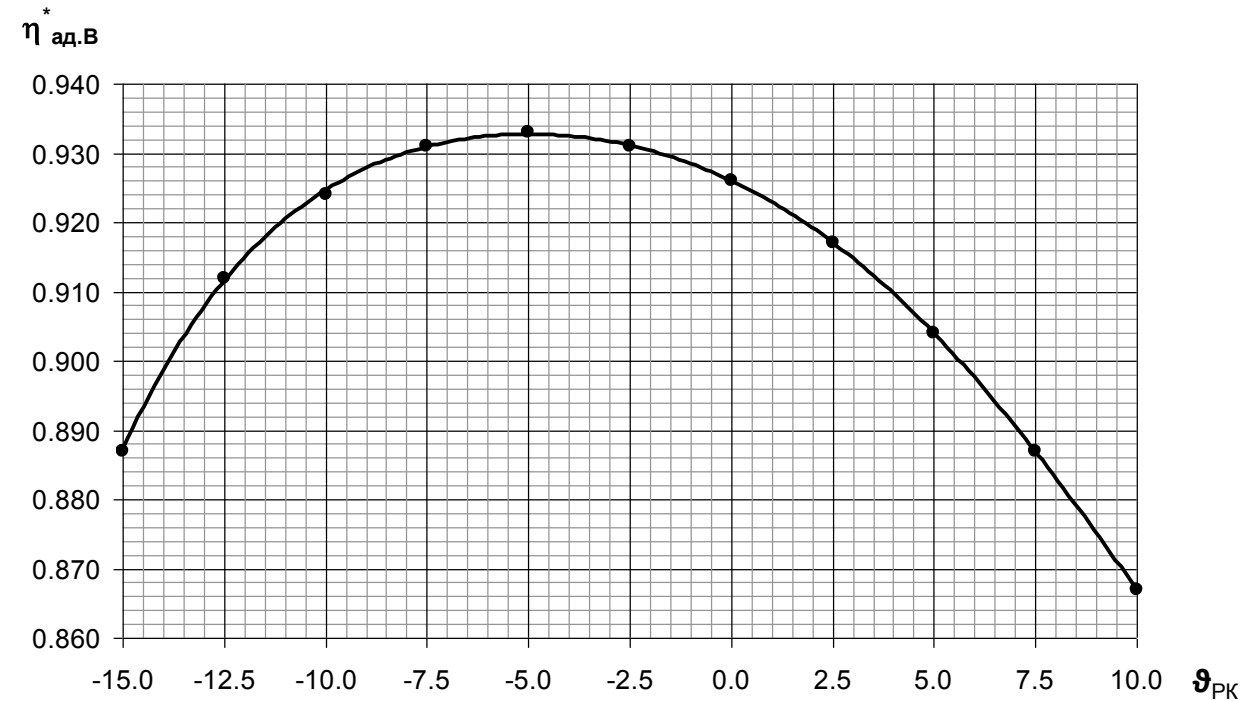
Подбирая значения углов установки можно оптимизировать аэродинамические и акустические характеристики вентилятора для отдельных режимов

Расчётные(3D-RANS) характеристики вентилятора с поворотными лопатками,
 $n_{пр.}=0.5, \vartheta_{ПК}^{\circ}=-20, \bar{n}_{пр.}=0.6, \vartheta_{ПК}^{\circ}=-20; \bar{n}_{пр.}=0.7, \vartheta_{ПК}^{\circ}=-20,-15,-10, -5,0, 5, 10;$
 $n_{пр.}=0.8, \vartheta_{ПК}^{\circ}=-20,-15,-10, -5,0, 5, 10; n_{пр.}=0.9, \vartheta_{ПК}^{\circ}=-15,-10, -5, 0, 5, 10.$

Зависимость аэродинамических характеристик от угла установки лопаток



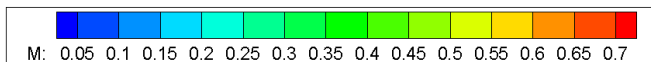
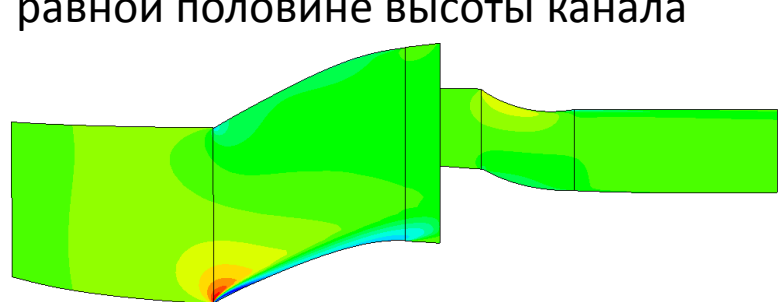
Определение частоты вращения \bar{n} в зависимости от угла установки лопаток ротора $\vartheta_{РК}$, так, чтобы при повороте рабочих лопаток вокруг вертикальной оси в другое положение обеспечить прежние значения $\bar{G}_{В пр} = 0.605$ и $p^*_B = 1.0930$ (режим «посадка»)



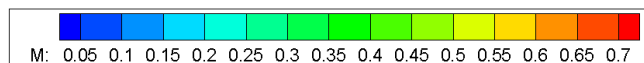
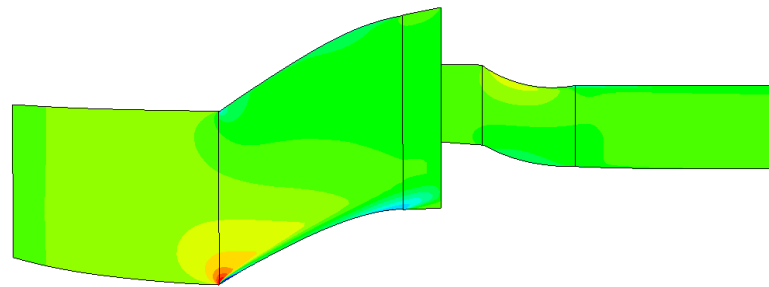
Изменение адиабатического КПД вентилятора в зависимости от угла установки рабочих лопаток при выдерживании одинаковых значений $\bar{G}_{В пр} = 0.605$ и $p^*_B = 1.0930$ за счёт выбора необходимых величин частоты вращения \bar{n} (режим «посадка»)

Стационарное поле течения

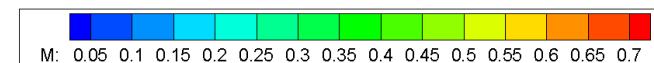
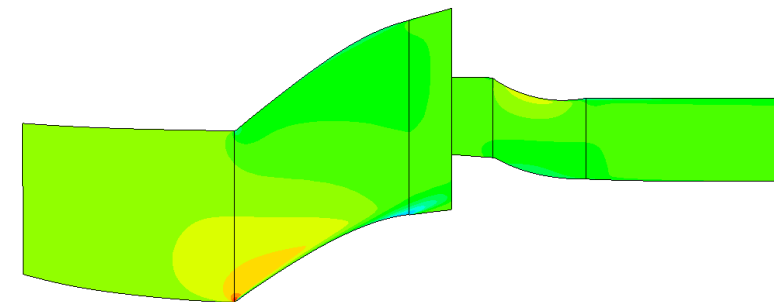
Поля относительного числа Маха на сечении с высотой равной половине высоты канала



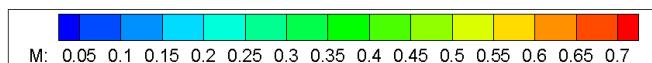
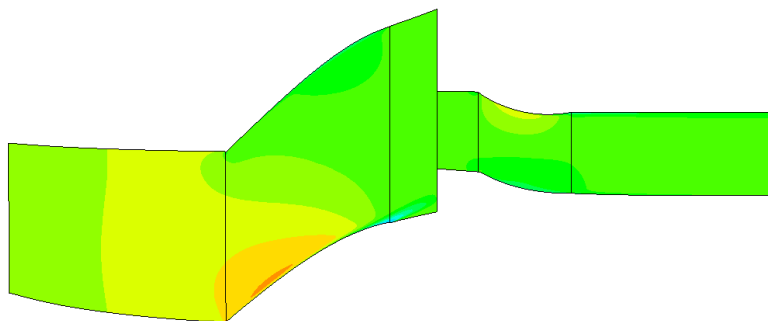
$\vartheta_{PK} = +10$



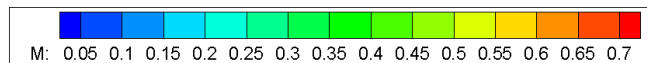
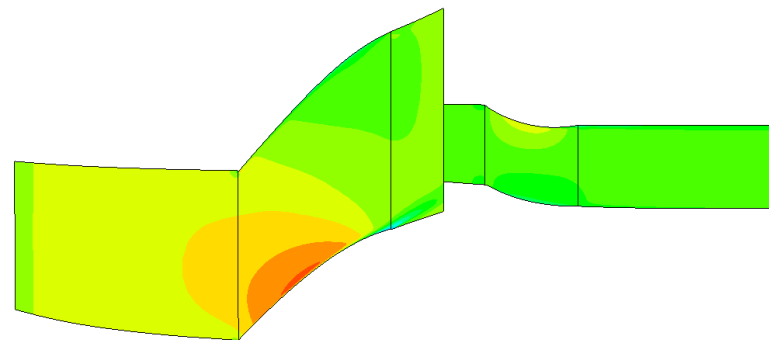
$\vartheta_{PK} = +5$



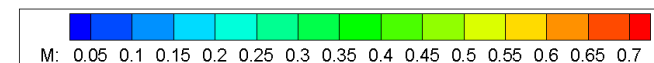
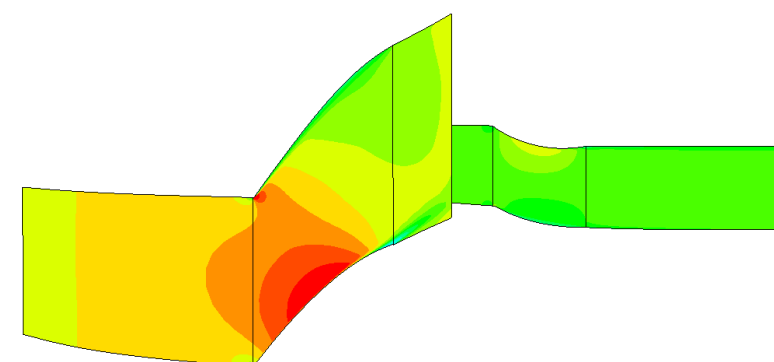
$\vartheta_{PK} = 0$



$\vartheta_{PK} = -5$



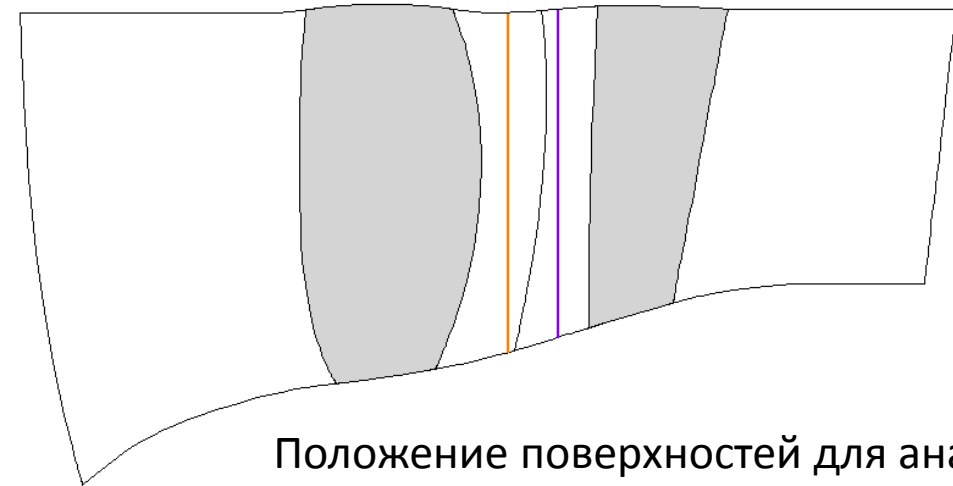
$\vartheta_{PK} = -10$



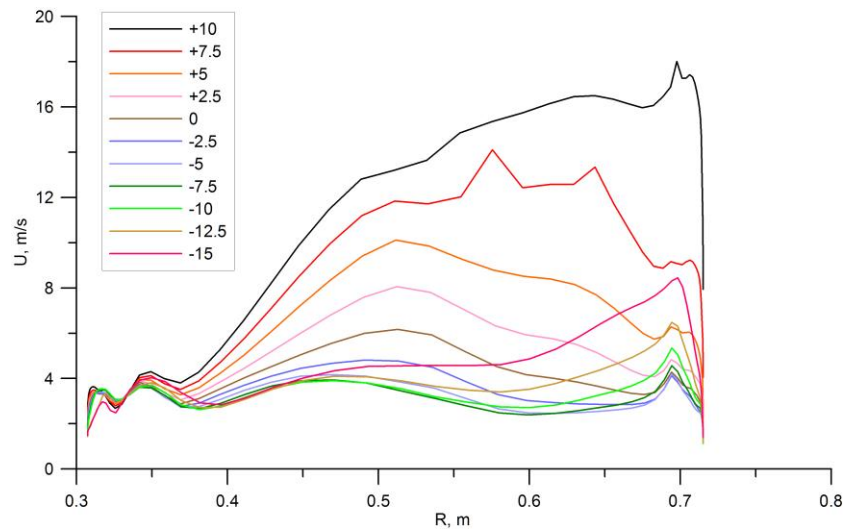
$\vartheta_{PK} = -15$

Следы за лопатками РК

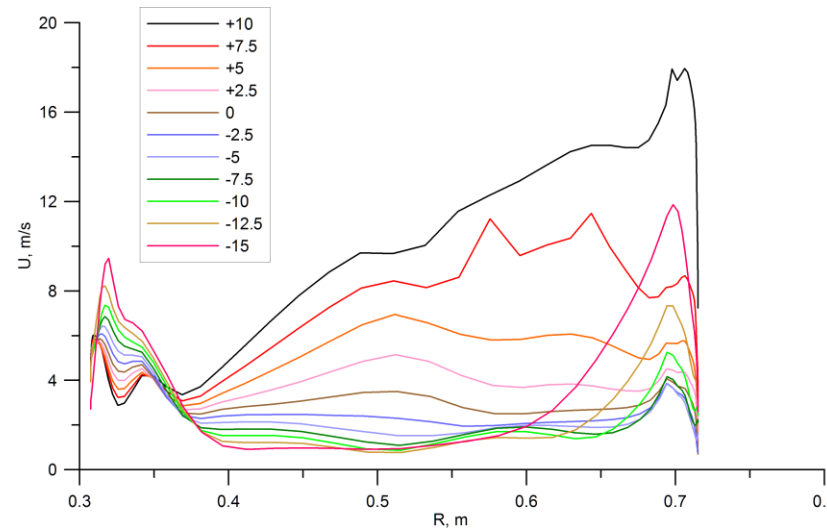
Для всех рассмотренных углов установки лопаток был проведено разложение решения в ряд Фурье по угловой координате на поверхности расположенной по потоку за ротором. Результаты разложения показаны на в виде графиков зависимостей распределения осевой компоненты скорости от радиуса для возмущений с азимутальными числами $m=11;22;33$ (первые три гармоники, характеризующие след лопатки ротора).



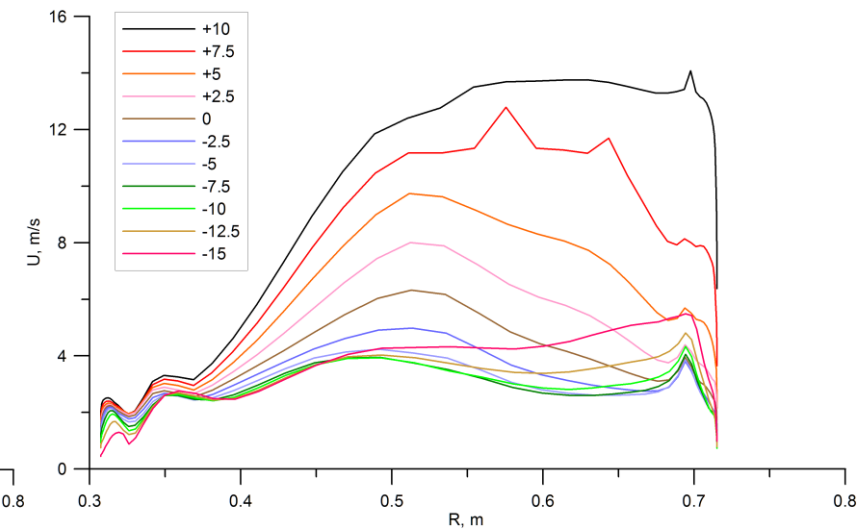
Положение поверхностей для анализа



$m = 11$



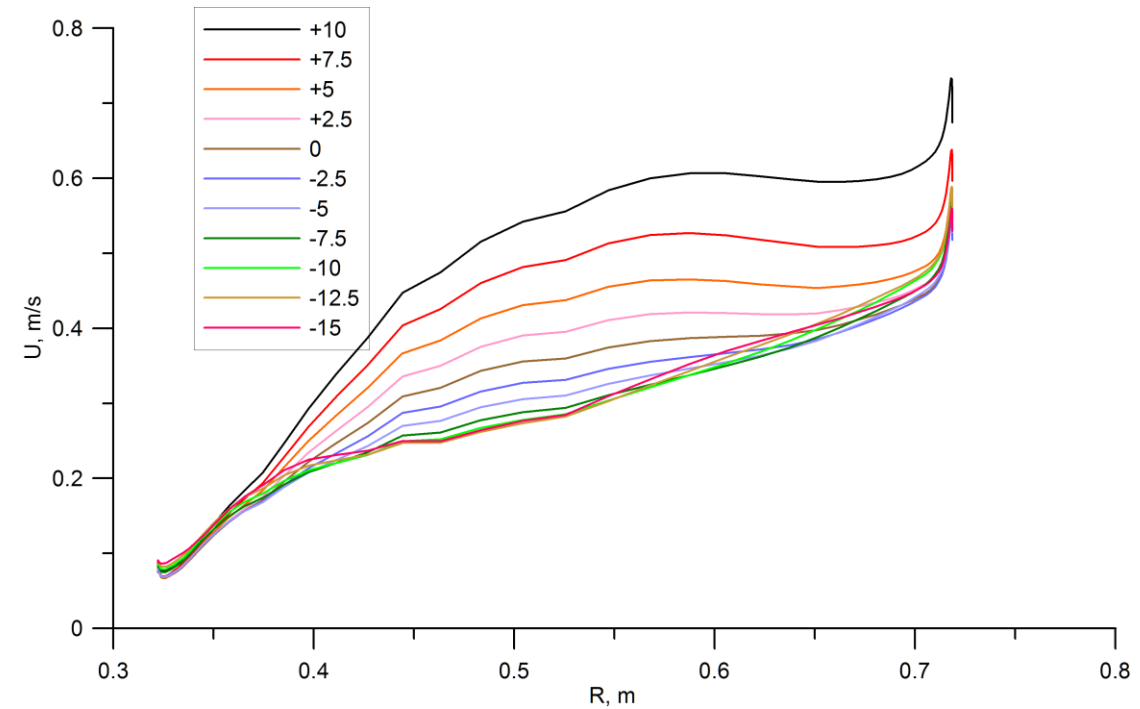
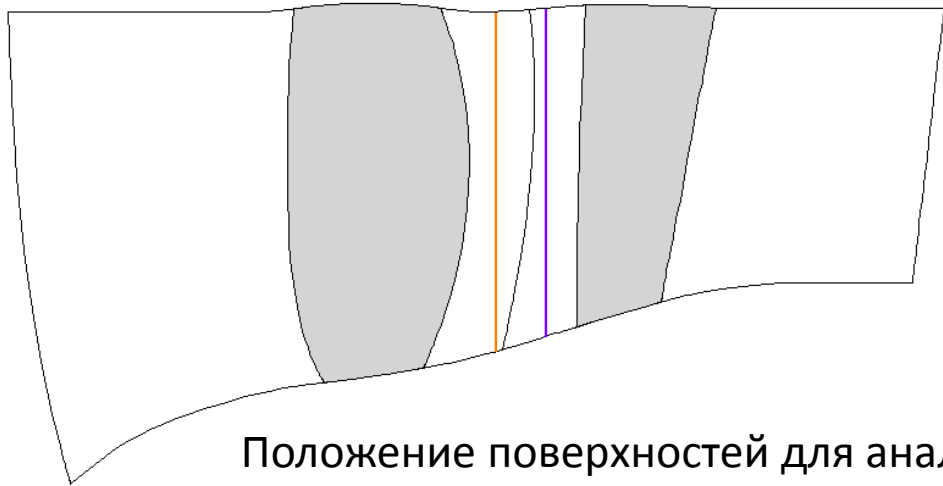
$m = 22$



$m = 33$

Возмущения перед СА

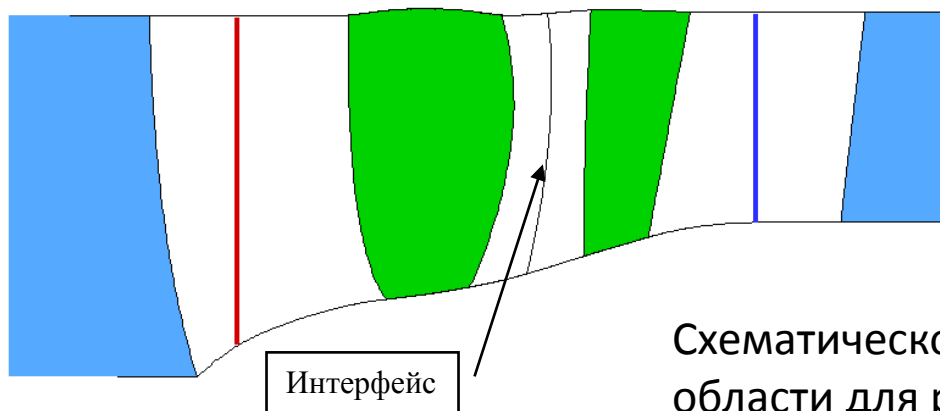
Для всех рассмотренных углов установки лопаток был проведено разложение решения в ряд Фурье по угловой координате на поверхности расположенной перед спрямляющим аппаратом выше по потоку. Результаты разложения показаны на в виде графиков зависимостей распределения осевой компоненты скорости от радиуса для возмущения с азимутальным числом $m=29$ (первая гармоника, характеризующая потенциальное возмущение от лопатки статора).

 $m = 29$

Нестационарный расчет

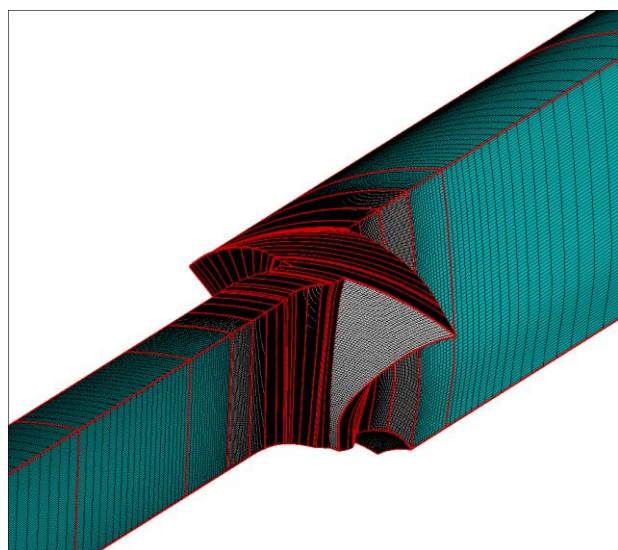
Расчет производился в диапазоне углов ϑ_{PK} от 0 до -15

Распространяющиеся моды (h – номер гармоники частоты вращения РК, m – азимутальное число)



Схематическое изображение расчетной области для расчета нестационарных взаимодействий. Линиями показаны поверхности модального анализа

N	h	m
1	22	-7
2	33	4
3	44	15
4	44	-14



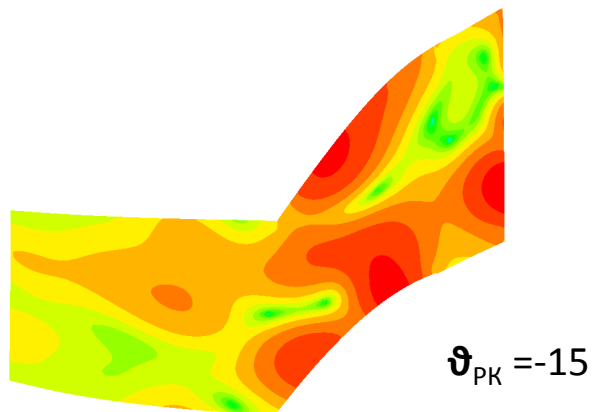
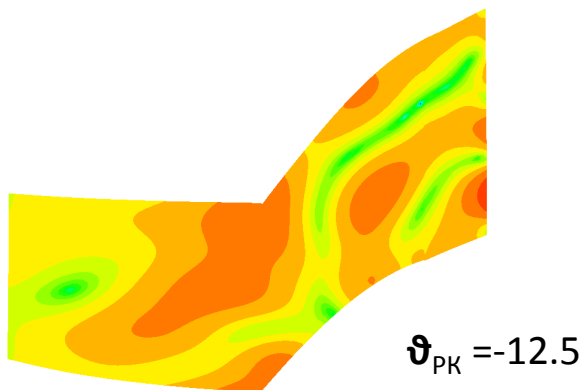
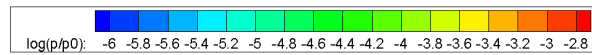
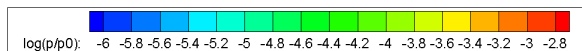
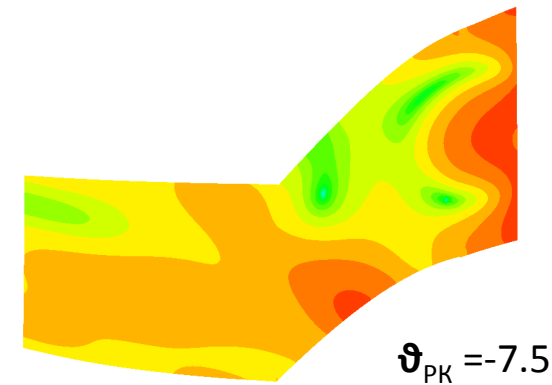
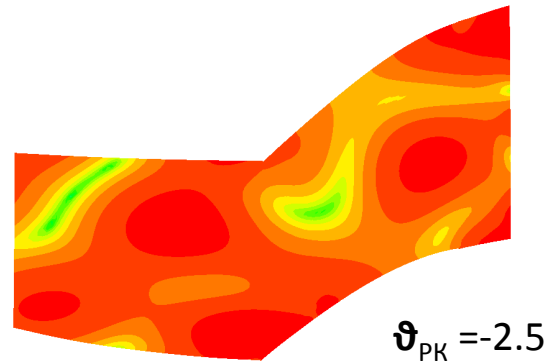
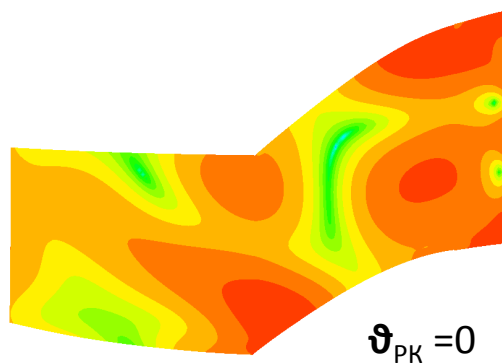
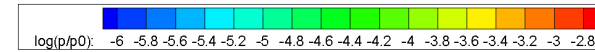
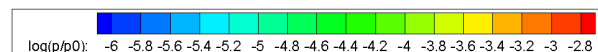
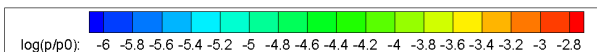
Фрагмент расчетной сетки

Параметры расчетной сетки

Колесо	$I_m \times J_m \times K_m$	Ячеек на лопатку	Кол-во ячеек
РК	560 × 80 × 50	380 × 80 × 50	2240000
СА	300 × 80 × 50	145 × 80 × 50	1200000
Всего:			3440000

Нестационарное поле течения

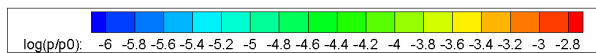
Поля амплитуды пульсаций статического давления в РК на сечении с высотой равной половине высоты канала, для гармоники $29\omega_0$



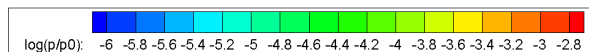
Наблюдается существенная зависимость амплитуды пульсаций от угла установки

Нестационарное поле течения

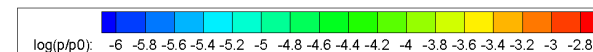
Поля амплитуды пульсаций статического давления в СА на сечении с высотой равной половине высоты канала, для гармоники $22\omega_0$.



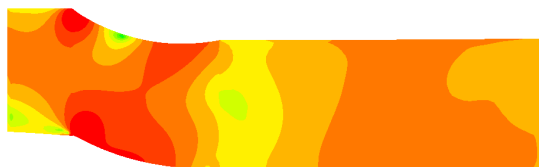
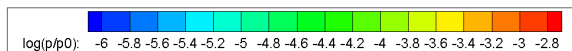
$\vartheta_{PK} = 0$



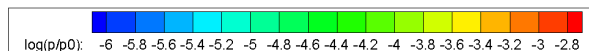
$\vartheta_{PK} = -5$



$\vartheta_{PK} = -7.5$



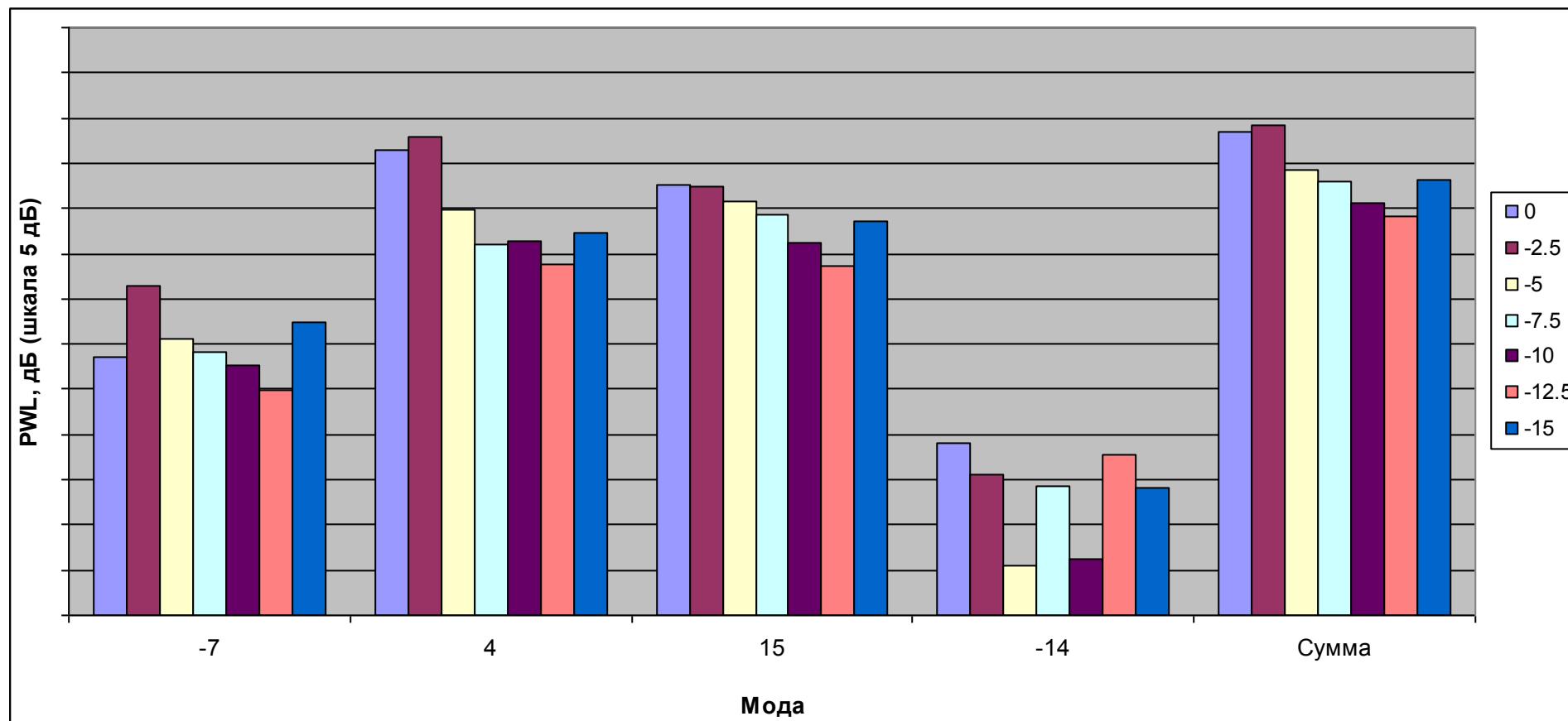
$\vartheta_{PK} = -10$



$\vartheta_{PK} = -15$

Наблюдается существенная зависимость амплитуды пульсаций от угла установки

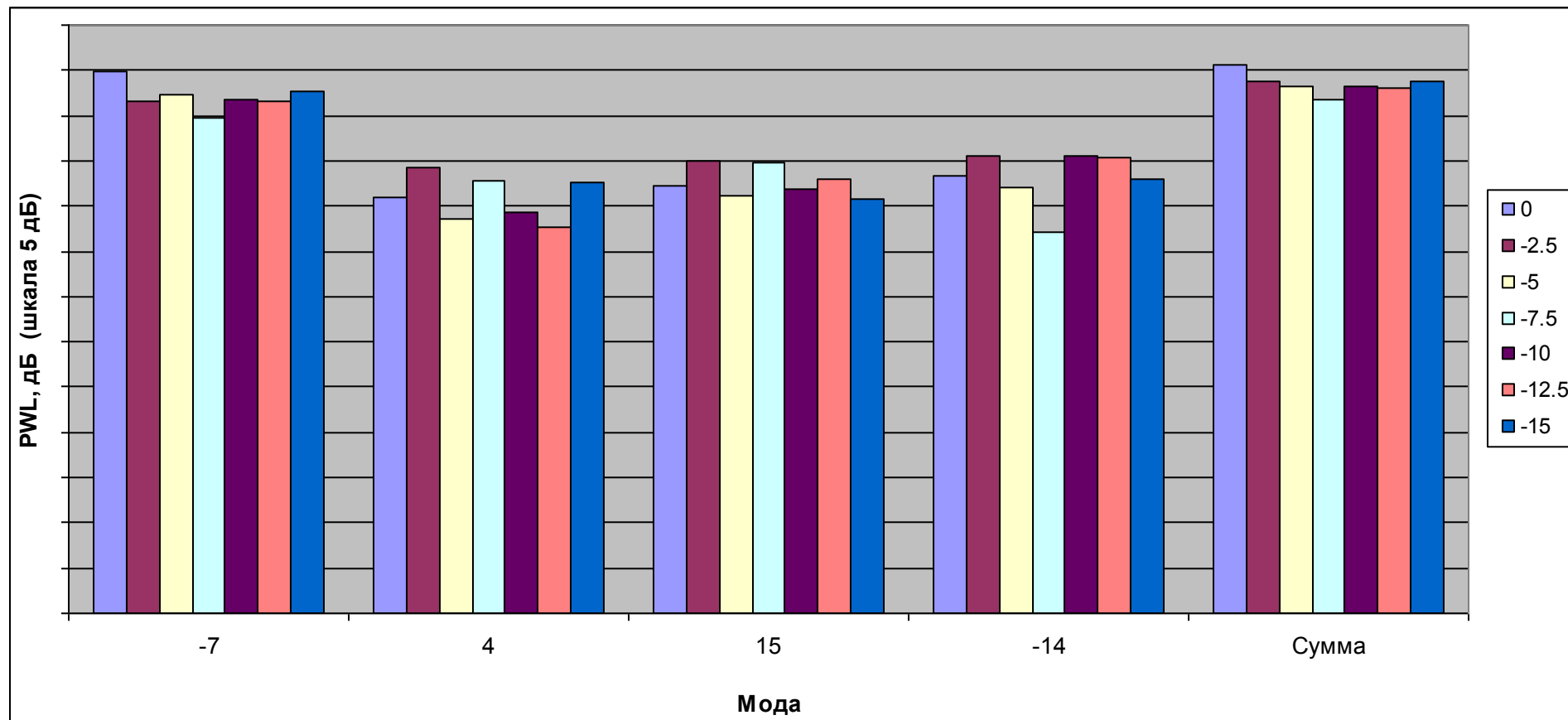
Результаты модального анализа для входа в вентилятор



Разница между минимальным и максимальным значением мощности излучения из воздухозаборника достигает 10.1 дБ.

Для шума, излучаемого из воздухозаборника, минимум мощности излучения наблюдается для угла -12.5° .

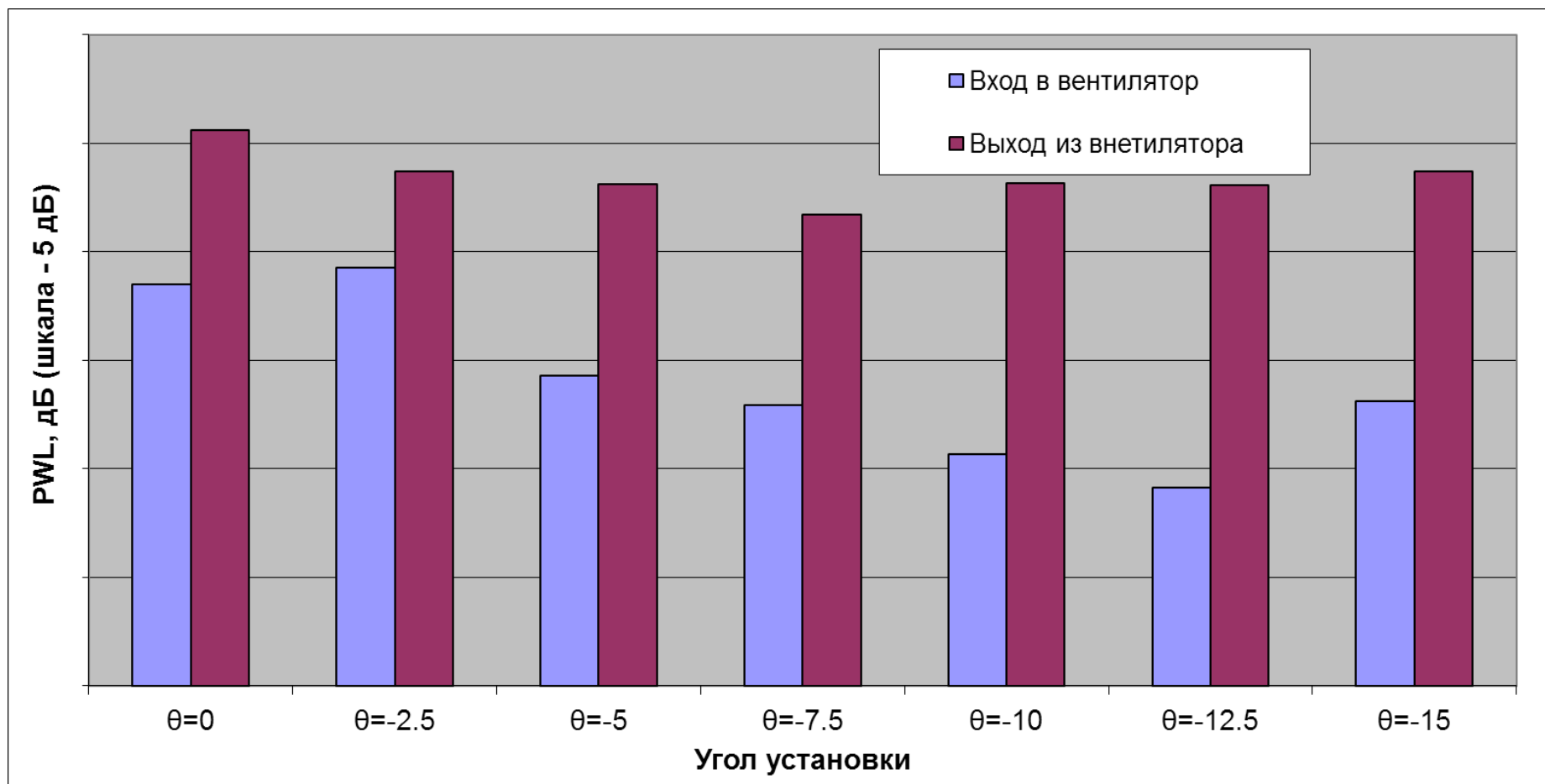
Результаты модального анализа для входа из вентилятора



Разница между минимальным и максимальным значением мощности излучения из сопла достигает 4.1 дБ.

Для шума, излучаемого из сопла, минимальная мощность излучения соответствует углу поворота лопатки от номинального положения -7.5° .

Сопоставление результатов для входа и выхода из вентилятора



Доминирующей компонентой тонального шума является шум излучаемый из сопла

Заключение

В работе представлен расчет тонального шума вентилятора РСУ с поворотными лопатками.

Вычисления были выполнены для режима работы у которого для номинального угла установки лопаток $n_{пр.} = 0.54$. Этот режим примерно соответствует режиму «посадка» для данного вентилятора. Для этого режима был проведен расчет аэродинамических характеристик вентилятора для 11 углов установки лопаток, которые характеризуются отклонением угла установки лопатки от номинального угла установки в диапазоне $\vartheta_{рК} = -15^\circ \dots +10^\circ$ с шагом 2.5° . Показано, что максимальный КПД соответствует углу установки -5° .

В результате расчета с использованием метода расчёта в частотной области были получены поля пульсаций в вентиляторе и мощности излучения через сопло и воздухозаборник для 7 углов установки лопаток $\vartheta_{рК} = -15^\circ \dots 0^\circ$ с шагом 2.5° .

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что шум вентилятора существенным образом зависит от угла установки лопаток (при фиксированных значениях степени повышения полного давления и расхода). При этом более сильная зависимость наблюдается для шума, излучаемого из воздухозаборника. Разница между минимальным и максимальным значением мощности излучения из воздухозаборника достигает 10.1 дБ. Соответствующая разница для излучения из сопла достигает 4.1 дБ.

Для шума, излучаемого из сопла, минимальная мощность излучения соответствует углу поворота лопатки от номинального положения -7.5° . Анализ показывает, что для этого угла наблюдается минимальная интенсивность возмущений в следе за лопаткой ротора. Однако для шума, излучаемого из воздухозаборника, минимум излучения наблюдается для угла -12.5° . Вероятно, это связано с тем, что для данного угла установки ротор отражает более значительную часть падающего на него излучения от статора назад. Другим механизмом, который может быть ответственным за снижение шума при повороте лопатки является увеличение осевого зазора, приводящее к снижению интенсивности потенциального взаимодействия.