Конкурсная работа

АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА БИРОТАТИВНОГО ВЕНТИЛЯТОРА С ПРИВОДОМ ЧЕРЕЗ РЕДУКТОР ДЛЯ ТРДД НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Повышение топливной эффективности авиационных двухконтурных турбореактивных двигателей (ТРДД) неизменно связано с увеличением параметров их цикла ($T^*_г$, π^*_Σ) и степени двухконтурности (m). Параметры цикла определяют совершенство ТРДД как тепловой машины, а степень двухконтурности определяет совершенство ТРДД как движителя.

Начиная со степени двухконтурности m ~ 4, в период с 1970 годов авиадвигательные компании мира разрабатывали ТРДД, в которых используются однорядные вентиляторы с прямым приводом от турбины низкого давления (ТНД). В настоящий момент уже эксплуатируются ТРДД со степенью двухконтурности более 10 как с прямым приводом от тихоходной ТНД, так и с высокоскоростой ТНД с приводом через редуктор. Наибольшая степень двухконтурности, равная 12, реализована в семействе ТРДД PW-1000G....1450G компании Pratt-Whitney. Двигатели этого семейства имеют редуктор в трансмиссии вентилятор-ТНД, что дает возможность более оптимально согласовать окружные скорости вентилятора и приводящей его турбины и заметно уменьшает уровень акустической эмиссии, в сравнении с ТРДД без редуктора. Следующий этап развития авиационных ТРДД периода 2020-2030 годов при неизменном повышении параметров цикла предполагает переход на еще более высокие значения степени двухконтурности (m > 16). В этом случае в качестве возможных сценариев следует рассматривать использование уже традиционного однорядного вентилятора с приводом через редуктор, а также возможность использования альтернативной схемы с использованием биротативного вентилятора в сочетании с дифференциальным планетарным редуктором. Во второй половине 80-х годов прошлого века в ПАО «Кузнецов» велась разработка ТРДД НК-93 (рисунок 1) с использованием второй схемы. При этом вентилятор был регулируемым, что позволяло эффективно обеспечивать режимы взлета, крейсерского полета, а также режим флюгирования. За счет последнего обеспечивалось минимальное сопротивление силовой установки при полетах с неработающим двигателем.

В ходе разработки НК-93 были испытаны каскады компрессора в составе изолированных компрессорных установок, а также совместно с каскадами турбины в составе газогенераторных установок. Было изготовлено семь полноразмерных изделий. Экспериментальное исследование биротативного вентилятора велось как в составе полноразмерных изделий, так и в составе модельных вентиляторных установок в ЦАГИ и ЦИАМ. Последнее полноразмерное изделие проходило экспериментальную проверку на летающей лаборатории (с 2005 по 2010 гг.), после чего работы по изделию были свернуты, как на тот момент полагалось, в пользу более перспективных разработок авиадвигателестроительной отрасли России.

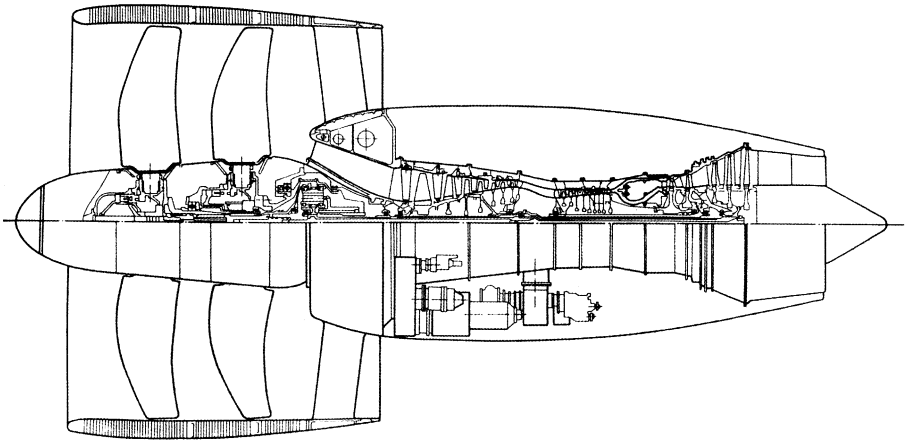

Рисунок 1 - ТРДД НК-93

Накопленный опыт по ТРДД НК-93 позволил ПАО «Кузнецов» стать участником российско-европейского научно-исследовательского проекта *COBRA*, основной целью которого была отработка проектных технологий по реализации биротативного вентилятора с учетом ограничений по редуктору для перспективного ТРДД нового поколения со степенью двухконтурности m > 20. Работа длилась несколько лет и была закончена в 2017 году. Координатором российской стороны был ФГУП ЦИАМ. Ответственность ПАО «Кузнецов» предполагала:

- обобщение данных по вентилятору НК-93 с целью формирования условного базиса достигнутых параметров;
- формирование параметрических требований к вентилятору на базе термодинамической модели перспективного ТРДД 2025-2030 гг.;
- оценка улучшения показателей ТРДД НК-93 при гипотетическом использовании в нем вентилятора перспективного исполнения.

Кроме отмеченных работ в ходе проекта ПАО «Кузнецов» провело аэродинамическую разработку своего альтернативного варианта вентилятора, который имел близкие параметры к основному варианту, разрабатываемому ФГУП ЦИАМ, но имел принципиальные геометрические отличия. В данной работе приводятся короткое представление результатов деятельности ПАО «Кузнецов» в ходе проекта *COBRA*.

На первом этапе было проведено обобщение параметров вентилятора ТРДД НК-93. Предполагалось, что в ходе проекта *COBRA* будут достигнуты значительное улучшение показателей аэродинамической эффективности (адиабатического КПД), по отношению к вентилятору ТРДД НК-93. В ходе работы по первому этапу отмечено, что, несмотря на проведенные многочисленные экспериментальные исследования вентилятора ТРДД НК-93, сложности экспериментальной оценки незначительной величины степени подогрева в вентиляторе привели к значительному разбросу адиабатического КПД и не позволили сделать однозначное заключение о достигнутом уровне аэродинамического совершенства исходного вентилятора. В связи с этим оценка аэродинамического совершенства вентилятора НК-93 была выполнена с использованием средств численного (математического) моделирования. В ходе численного моделирования был проведен расчет характеристики исходного вентилятора (см. далее рисунок 9). На рисунке 2 приведена его пространственная геометрия.

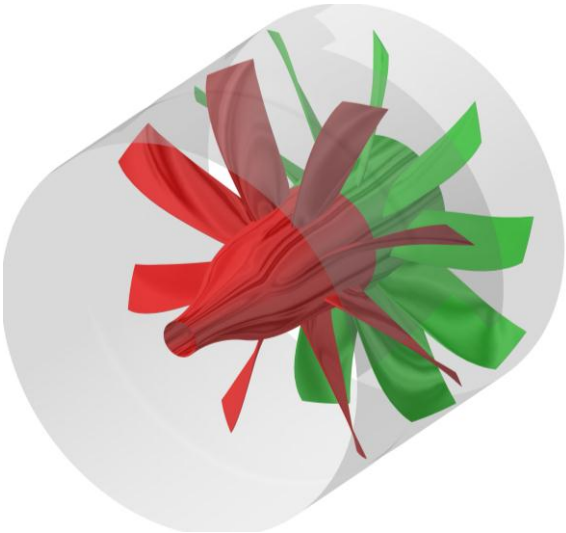

Рисунок 2 - Пространственная геометрия исходного вентилятора ТРДД НК-93.

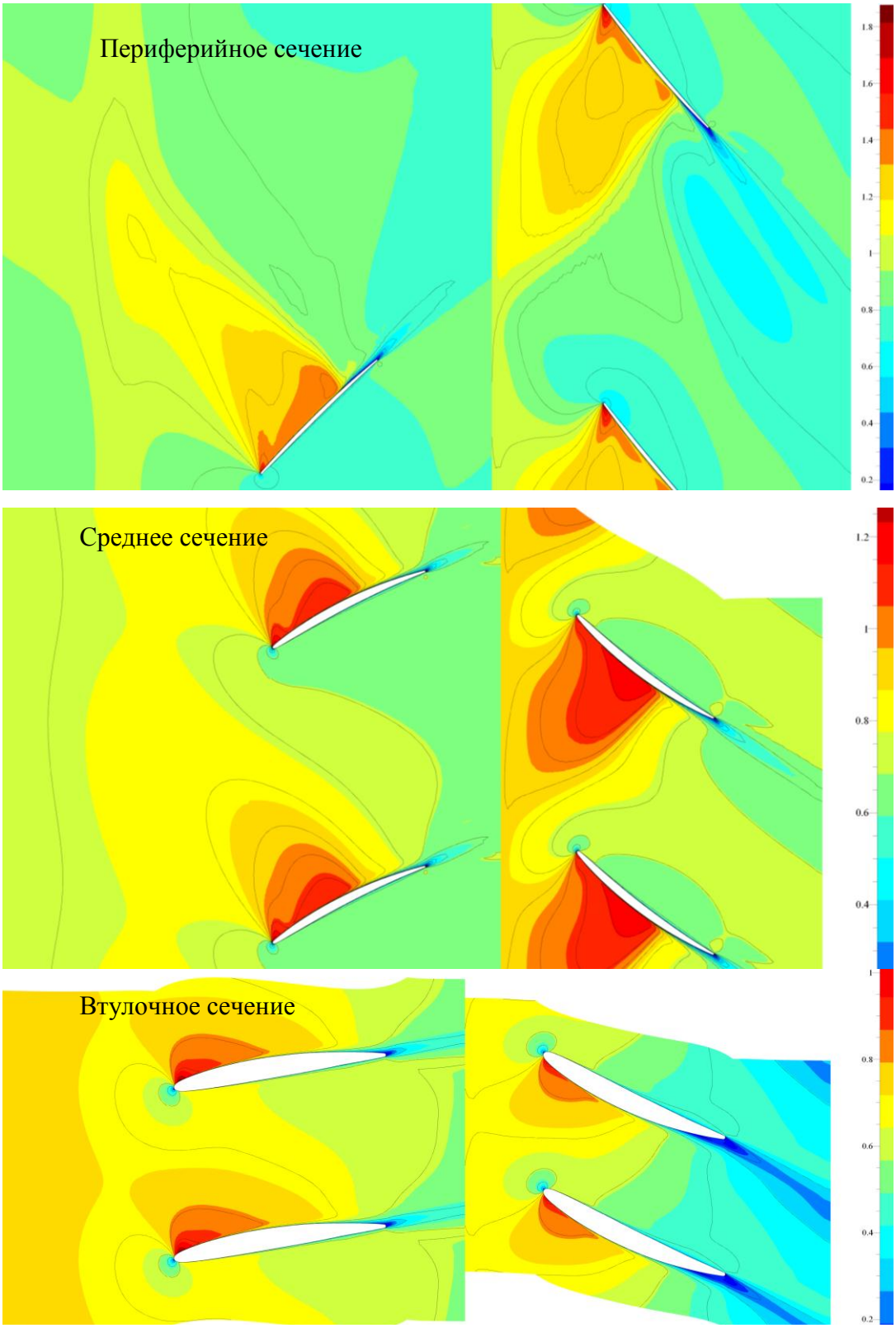

Рисунок 3 - Расчетное поле чисел Маха в относительном движении.

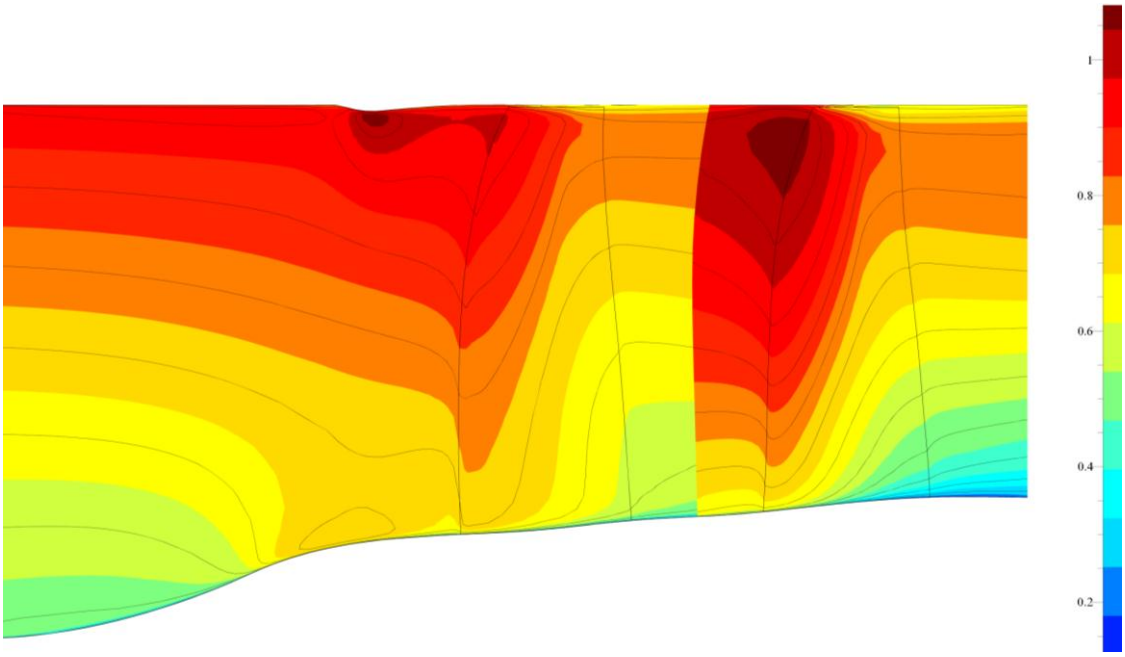

Рисунок 4 - Расчетное поле осредненных в окружном направлении чисел Маха в относительном движении.

На рисунках 3 и 4 приведены результаты расчета в виде полей чисел Маха в относительном движении для крейсерского (проектного) режима.

Следует отметить, что исходный вариант вентилятора ТРДД НК-93 имел несколько исполнений. В данной работе представлены результаты расчетного исследования последнего композитного варианта, разработанного и изготовленного ОАО «АЭРОСИЛА». При этом, несмотря на достаточно революционный облик, ТРДД НК-93 по уровню используемых технологий соответствует ТРДД 4 поколения.

На втором этапе с использованием термодинамической модели форсированного варианта ТРДД НК-93 (ТРДД перспективного исполнения) с привязкой к планеру были определены параметры перспективного вентилятора. С учетом общей закономерности увеличения температуры газа перед турбиной высокого давления в сочетании с ростом степени двухконтурности степень повышения полного давления перспективного вентилятора осталась практически на уровне аналогичного параметра ТРДД НК-93. В ходе анализа параметров вентилятора НК-93 был отмечен повышенный уровень окружных скоростей рабочих колес (РК) первого и второго рядов исходного варианта, что определяло повышенный уровень акустической эмиссии в передней полусфере. В перспективном варианте был значительно уменьшен уровень окружной скорости обоих рядов РК. К тому

же в отличие от исходного вентилятора в вентиляторе перспективного исполнения первый ряд вентилятора имеет меньший уровень окружной скорости, чем второй. Последнее обстоятельство продиктовано обеспечением более оптимальной аэродинамической нагрузки в сочетании с ограничением по дифференциальному планетарному редуктору, которое требует обеспечение соотношения крутящего момента рабочих колес второго и первого рядов на уровне 1,44 (в отличие от 1,5 на НК-93). Изменение же соотношения крутящих моментов продиктовано увеличением степени двухконтурности с 16 до 20 и, как следствие, уменьшением диаметров турбины вентилятора по отношению к диаметру вентилятора. В таблице 1 приведено сопоставление параметров вентиляторов исходного и перспективного исполнения.

Таблица 1 - Параметры вентиляторов исходного и перспективного исполнения

Параметр	Исходн.	Перспект.
Суммарный приведенный расход воздуха, $G_{пр}$, кг/с	1340	1270
Степень двухконтурности	16	20
Степень повышения полного давления, $\pi_в$*	1,27	1,28
Диаметр вентилятора на входе, $D_в$, м	2,9	2,8
Приведенная осевая скорость на входе $C_{а,пр,вх}$, м/с	220	220
Приведенная окружная скорость, $U_{рк1}$, м/с	248	200,6
Приведенная окружная скорость, $U_{рк2}$, м/с	248	222,0
Отношение крутящего момента, M_2/M_1	1,50	1,44

На третьем этапе под параметры таблицы 1 выполнялось аэродинамическое проектирование перспективного вентилятора. В ходе проектирования было принято решение сохранить количество лопаток в рядах вентилятора на уровне исходного варианта, т.е. 8 лопаток в РК 1 и 10 лопаток в РК 2. С учетом того, что с одной стороны использование биротативного вентилятора с приводом через дифференциальный редуктор позволяет существенно уменьшить окружную скорость концов лопаток вентилятора, т.е. уменьшается дискретный шум основного тона, а с другой стороны повышается вклад в уровень звуковой эмиссии от взаимодействия следа 1 РК с лопаткой 2 РК, в варианте перспективного исполнения проведено дополнительное увеличение осевого зазора между РК 1 и РК 2. Данное обстоятельство положительно влияет на снижение шума

взаимодействия рядов, однако в присутствии значительного уровня осевой скорости приводит к уменьшению аэродинамической эффективности. Трактовые обводы, проточная часть перспективного вентилятора приведены на рисунке 5, а на рисунке 6 приведена пространственная геометрия биротативного вентилятора перспективного исполнения.

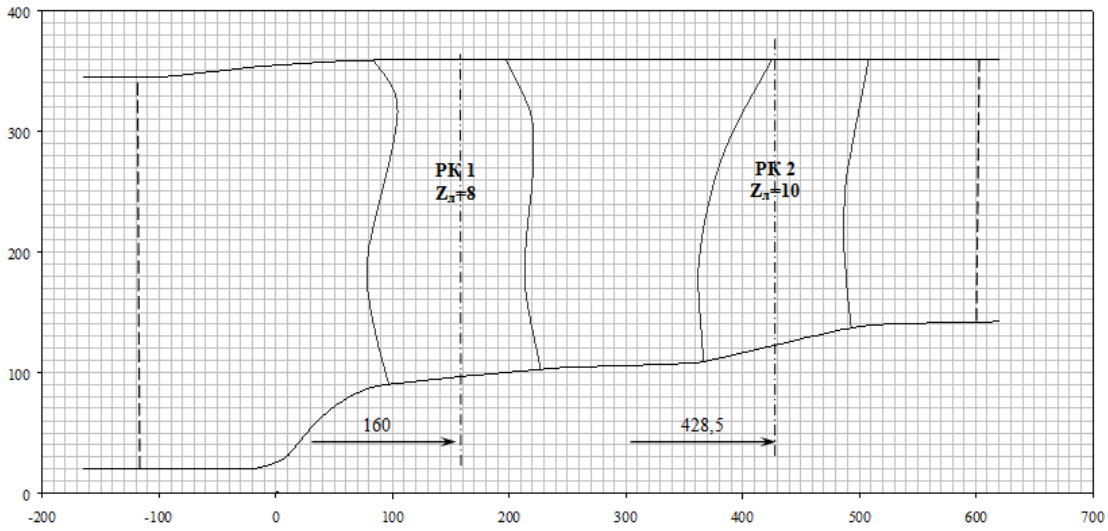

Рисунок 5 - Трактовые обводы биротативного вентилятора перспективного исполнения (размеры модели).

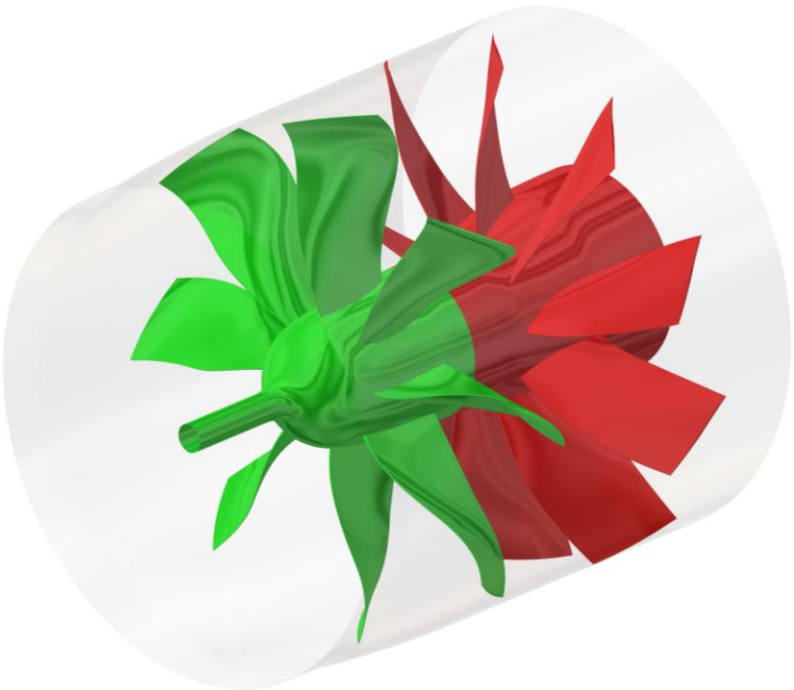

Рисунок 6 - Пространственная геометрия биротативного вентилятора перспективного исполнения

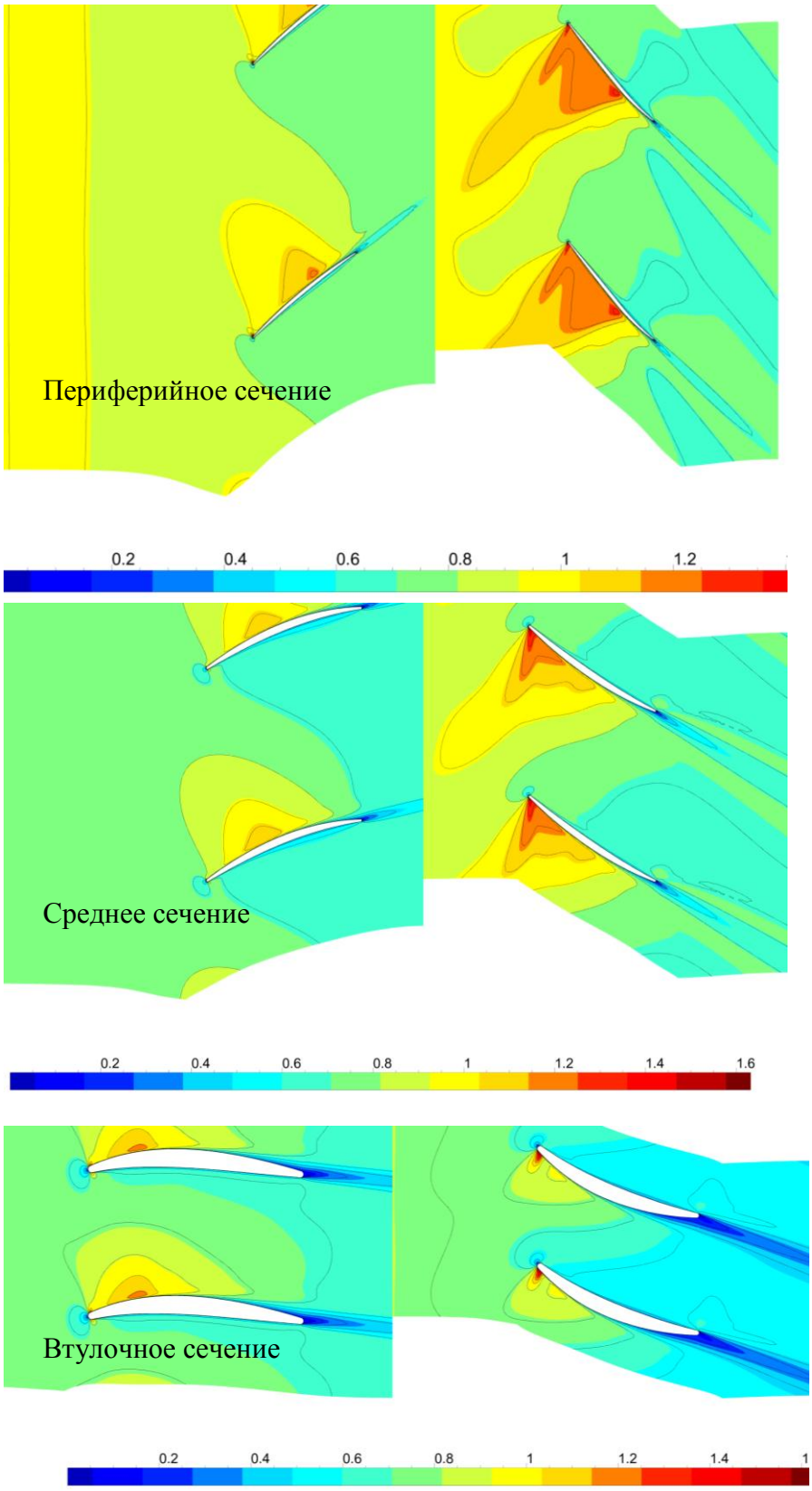

Рисунок 7 - Расчетное поле чисел Маха в относительном движении в варианте перспективного исполнения

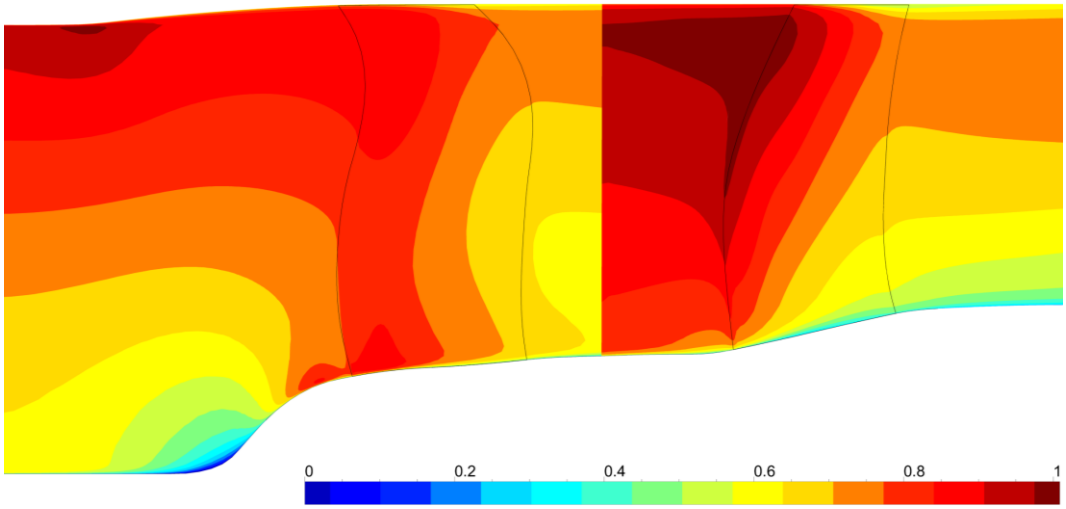

Рисунок 8 - Расчетное поле осредненных в окружном направлении чисел Маха в относительном движении в варианте перспективного исполнения

При профилировании перспективного варианта вместе с уже отмеченным уменьшением окружной скорости была увеличена хорда рабочих колес обоих рядов, а также для периферийных сечений использована профилировка с более оптимальными скоростными свойствами. Отмеченные обстоятельства позволили обеспечить приемлемые значения аэродинамической нагрузки при уменьшенных значениях скорости потока в относительном движении, что позволило в конечном счете значительно увеличить адиабатический КПД. Определение характеристик перспективного вентилятора проведено также в ходе численного моделирования, причем при использовании параметров расчетной модели, которая использовалась для определения характеристик исходного варианта. Такой подход позволяет выделить чистый эффект от нового профилирования. На рисунке 7 и 8 приведены результаты численного моделирования для проектного (крейсерского) режима. Как следует из сопоставления рисунков 4 и 8, уровень числа Маха в относительном движении на периферии РК уменьшился с 1,0 до 0,85 в РК 1 и с 1,1 до 1,0 в РК 2. Данное обстоятельство в сочетании с использованием более оптимальных аэродинамических форм в плоскости решетки позволило существенно уменьшить интенсивность замыкающих скачков уплотнения в периферийных сечениях РК 1 и РК 2 (рисунки 3 и 7). На рисунке 9 приведено сопоставление характеристик исходного и перспективного вариантов вентилятора. В ходе проектирования нового варианта адиабатический КПД вентилятора увеличился на $\delta\eta_{в2} \approx 4\%$.

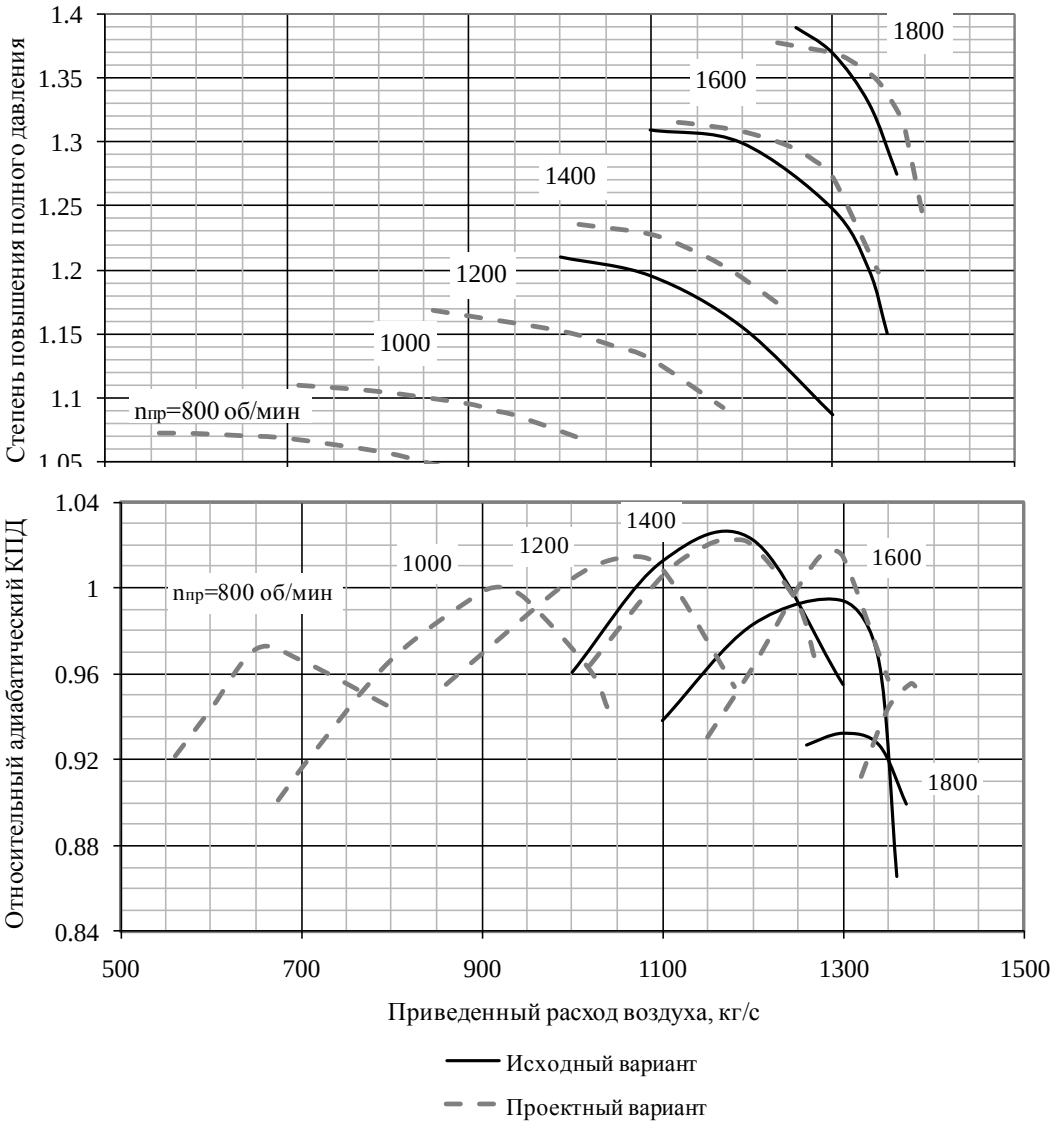

Рисунок 9 - Совмещение характеристик исходного и перспективного (проектного) вариантов вентилятора.

На четвертом этапе проведена оценка улучшения параметров базового ТРДД НК-93 от гипотетического использования в нем вентилятора перспективного исполнения (таблица 2). Данные таблицы 2 позволяют заключить, что по удельному расходу топлива (C_R) перспективный вентилятор значительно улучшает показатели исходного ТРДД НК-93 и смещает его характеристики в область ТРДД поколения 4+.

Таблица 2 – Улучшение параметров ТРДД НК-93 при использовании вентилятора перспективного исполнения.

Параметр	$\delta\eta_{в2}$, %	δC_R,%	$\Delta T^*_г$, К
Крейсерский режим	4,1	-2,43	-11,3