

УДК 629.735.03-226.2

## **Анализ влияния низких чисел Рейнольдса на потери в решетке турбины низкого давления**

**Хайрулин В. Т.\***, **Бажин С.В.\*\***, **Швырев А.А.\*\*\***,  
**Тихонов А.С.\*\*\*\***, **Гаскаров А.В.**, **Самохвалов Н.Ю.\*\*\*\*\***

*Компания «Авиадвигатель»,*

*Комсомольский проспект, 93, Пермь, 614990, Россия*

*\*e-mail: khairulin@avid.ru*

*\*\*e-mail: bagin@avid.ru*

*\*\*\*e-mail: shvyrev@avid.ru*

*\*\*\*\*e-mail: tikhonov@avid.ru*

*\*\*\*\*\*e-mail: samohvalov@avid.ru*

### **Аннотация**

Представлены результаты продувок трех пакетов плоских решеток с «передне», «средне» и «задне» - нагруженными профилями при числах Рейнольдса от 500.000 до 200.000. Выполнено детальное моделирование экспериментальной установки и проведена верификация экспериментальных данных на различных RANS и URANS моделях турбулентности. По результатам проведённых работ выбраны оптимальные модели турбулентности, имеющие хорошее схождение с экспериментом и позволяющие оценить место возникновения отрыва пограничного слоя и величину генерируемых потерь.

**Ключевые слова:** низкие числа Рейнольдса, установка, испытания, модель турбулентности, лопатка турбины низкого давления.

## **Введение**

Улучшение экономических характеристик двигателя с одновременно растущей эффективностью узлов являются ключевыми и приоритетными направлениями создания конкурентоспособных высокоэкономичных газотурбинных двигателей. Одним из направлений по уменьшению удельного расхода топлива двигателя является увеличение степени двухконтурности и увеличение диаметра вентилятора, однако для сохранения параметров, частота вращения ротора низкого давления уменьшается, растет количество ступеней турбины низкого давления (ТНД), ее масса и себестоимость. Для компенсации этого явления была разработана High-lift и Ultra High lift технологии профилирования с нагрузкой по Цвайфелю от 1.2 до 1.8, позволяющая уменьшить количество лопаток ТНД до 40% от первоначального количества. Однако, с уменьшением частоты вращения уменьшились скорости в проточной части, уменьшилось число Рейнольдса и течение в последних ступенях ТНД стало иметь ламинарный характер, что привело к росту потерь.

## **Описание эксперимента**

Для анализа влияния низких чисел Рейнольдса на потери в решетке ТНД были спроектированы, изготовлены и собраны в 3 пакета плоских решеток с профилями различной нагруженности – рисунок 1.



Вид спереди



Вид сзади

Рисунок 1. Пакет плоских решеток

Для анализа было выбрано 3 типа профилей:

- «Передне» - нагруженные профили
- «Средне» - нагруженные профили
- «Задне» - нагруженные профили

Распределение скоростей по обводу профилей представлено на рисунке 2. Эксперимент проводился в диапазоне чисел  $\lambda_{2ад}$  от 0.4 до 1.0 при различной интенсивности турбулентности на входе в решетку – 2%, 5% и 12%. Оценка приведенной адиабатической скорости осуществляется по замеренным параметрам:

- полное давление на входе в объект испытаний
- статическое давление в выходном канале объекта испытаний.

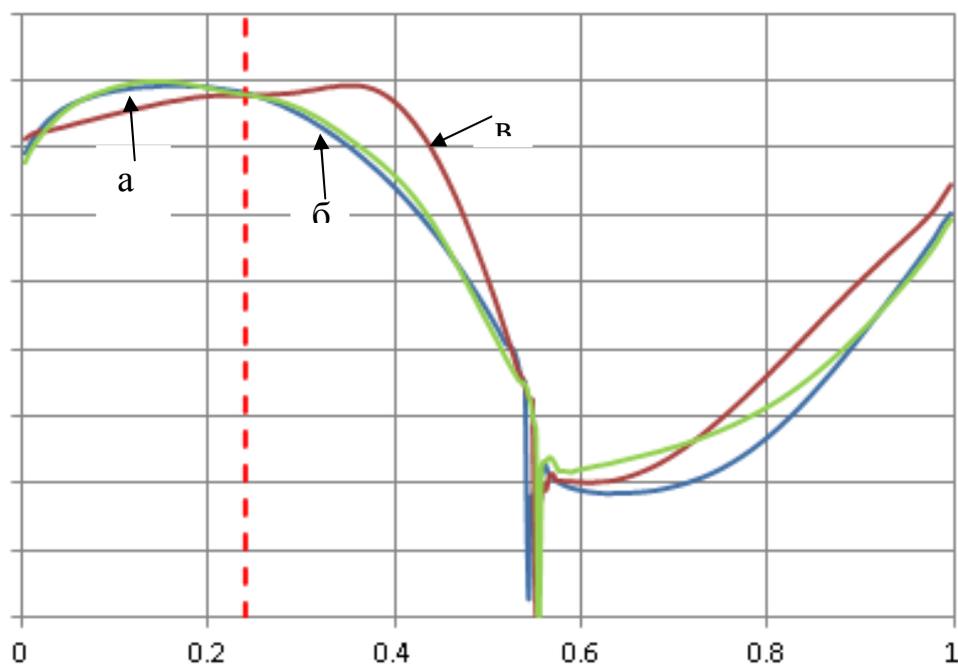


Рисунок 2. Распределение скоростей по обводу профилей ( а – «передне» - нагруженный профиль, б – «средне» - нагруженный профиль, в- «задне» - нагруженный профиль)

Интенсивность турбулентности на входе в решетку создавалась путем установки тарированных турбулизирующих сеток. Диапазон изменения чисел Рейнольдса составил от 500.000 до 200.000. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 3.

По результатам проведенного эксперимента были обработаны экспериментальные данные и получены зависимости потерь кинетической энергии от числа Рейнольдса для 3-х профилей при различной интенсивности турбулентности на входе в решетку. На рисунках 4, 5 и 6 представлен график зависимости потерь от числа Рейнольдса для различных типов профилей при интенсивности турбулентности на входе 2, 5 и 12% соответственно.

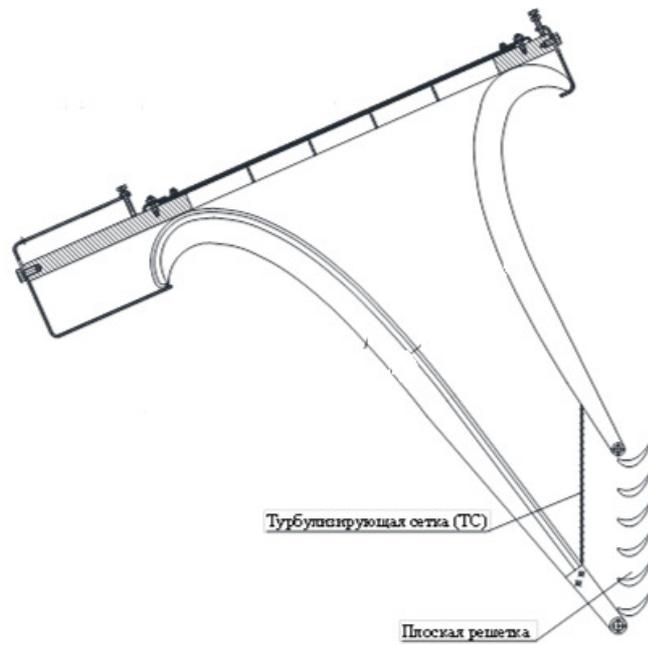


Рисунок 3. Схема экспериментальной установки по продувке плоских решеток

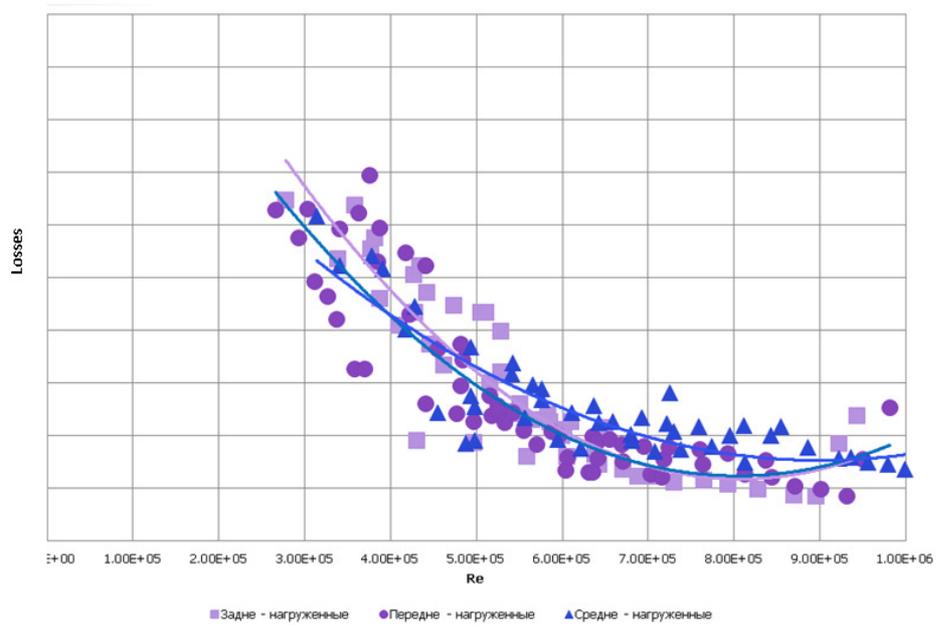


Рисунок 4. Зависимость потерь кинетической энергии от числа Рейнольдса при интенсивности турбулентности на входе в решетку 2%

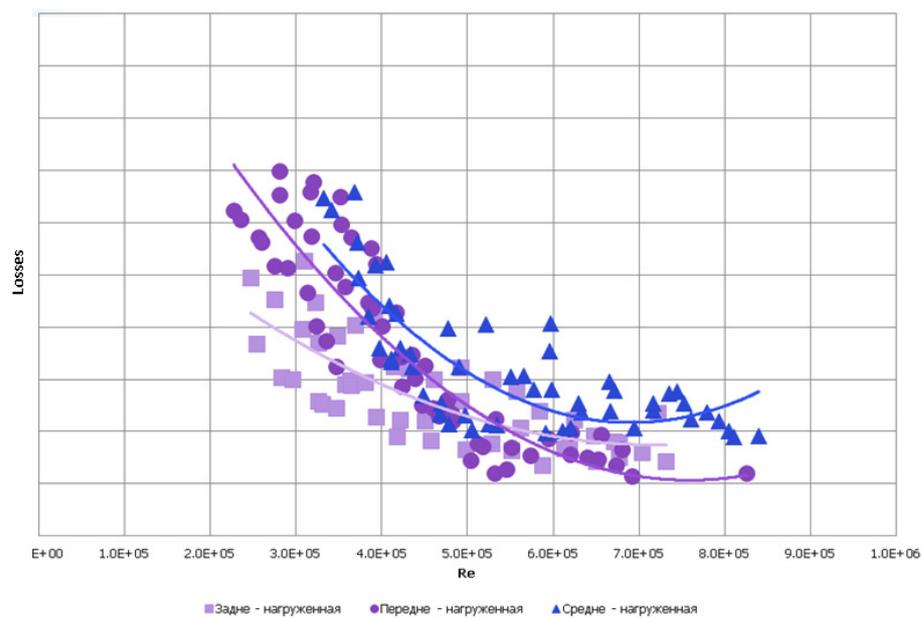


Рисунок 5. Зависимость потерь кинетической энергии от числа Рейнольдса при интенсивности турбулентности на входе в решетку 5%

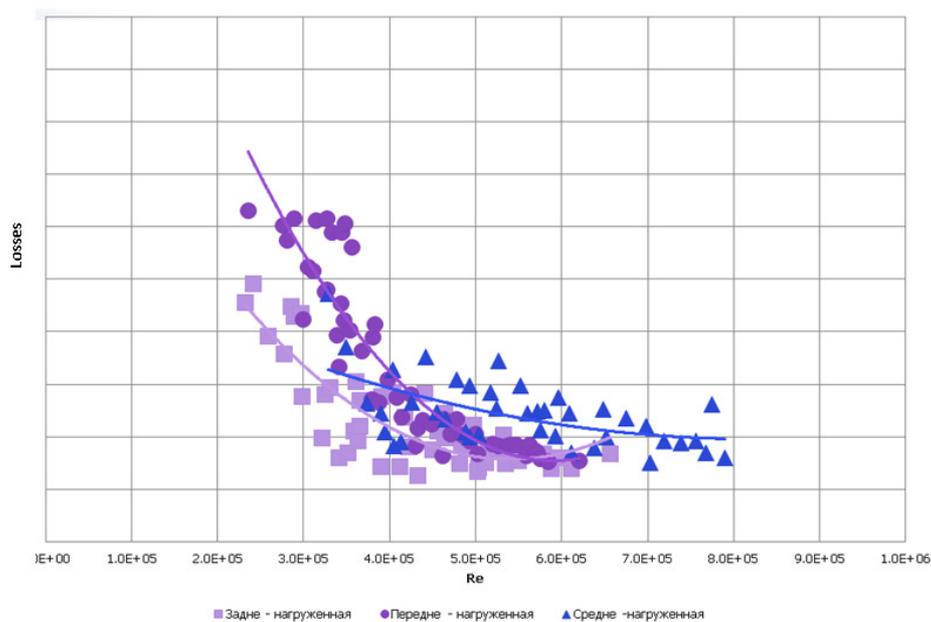


Рисунок 6 . Зависимость потерь кинетической энергии от числа Рейнольдса при интенсивности турбулентности на входе в решетку 5%

Уровень потерь при интенсивности турбулентности на входе 2% для всех профилей примерно одинаковый. При интенсивности турбулентности на входе 5 % решетка с «задне» - нагруженными профилями имеет меньшие потери, чем «передне» и «средне» -нагруженные решетки. При интенсивности турбулентности потока на входе в решетку 12% «задне» - нагруженная решетка имеет меньшие потери, чем «передне» - нагруженная. «Средне» - нагруженная решетка на числах Рейнольдса ниже 300.000 экспериментальных точек не имеет, поэтому нельзя сделать однозначных выводов о ее профильных потерях.

Для анализа влияния интенсивности турбулентности на профильные потери были построены графики зависимости потерь от числа Рейнольдса для каждой решетки – рисунок 7, 8, 9.

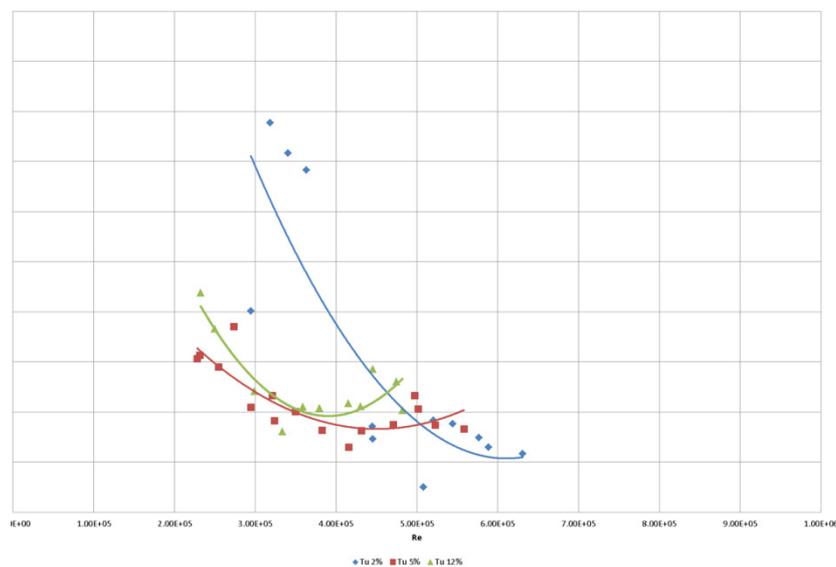


Рисунок 7. Влияние потерь от числа Рейнольдса при различной интенсивности турбулентности на входе для «задней», нагруженной решетки

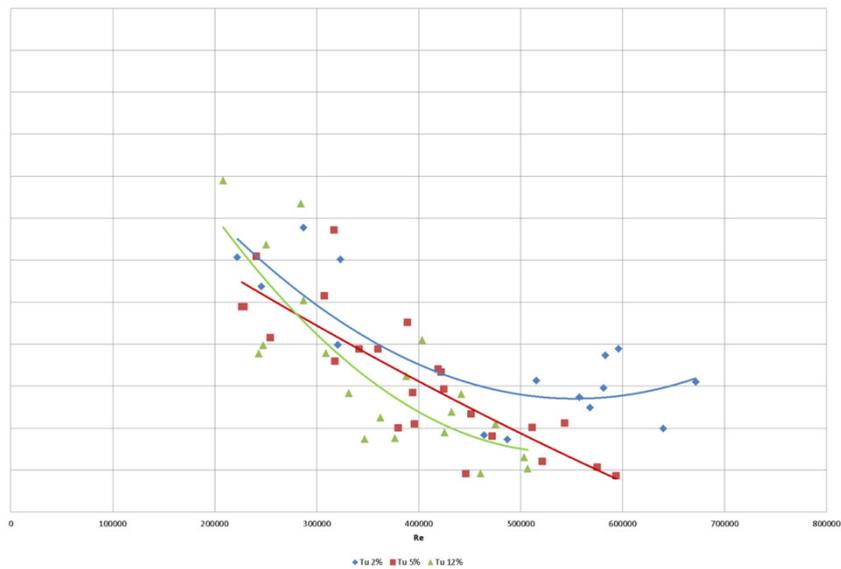


Рисунок 8. Влияние потерь от числа Рейнольдса при различной интенсивности турбулентности на входе для «передне», нагруженной решетки

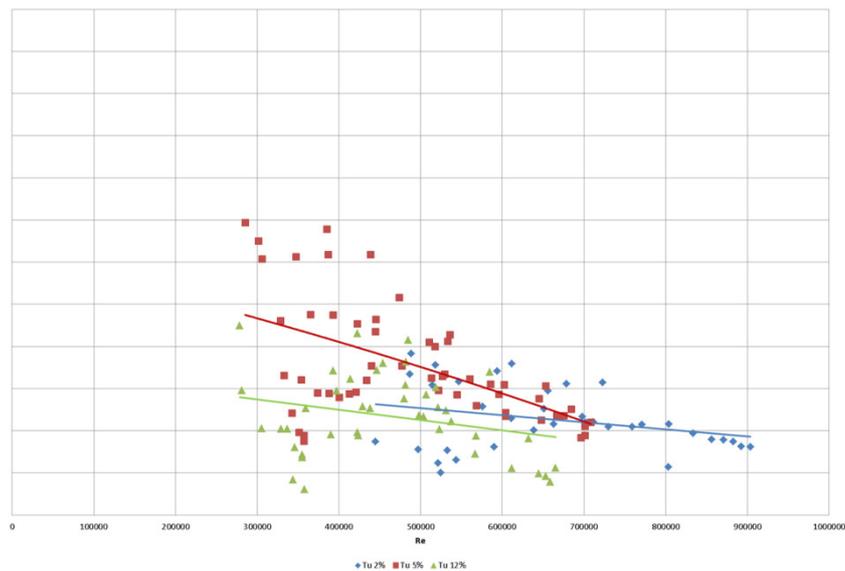


Рисунок 9. Влияние потерь от числа Рейнольдса при различной интенсивности турбулентности на входе для «средне», нагруженной решетки

При росте уровня турбулентности на входе в «задне» - нагруженную решетку с 2 до 5% уровень потерь кинетической энергии падает при числах Рейнольдса

менее 400.000. При росте уровня турбулентности на входе в решетку с 5 до 12% - не изменяется. «Средне» - нагруженная решетка имеет аналогичный характер изменения потерь с изменением уровня интенсивности турбулентности на входе. Для «передне» - нагруженной решетки при росте уровня турбулентности на входе с 2 до 5 % не наблюдается увеличения потерь, однако при увеличении уровня турбулентности на входе до 12% потери увеличиваются. Кроме того, для всех решеток наблюдается общий тренд – потери при интенсивности турбулентности на входе в решетки 2% больше, чем при 5 и 12%. Это объясняется наличием крупномасштабных вихрей на входе в испытываемую решетку, генерируемые входным дросселирующим устройством, что подтверждается результатами верификации экспериментальных данных.

### **Верификация экспериментальных данных**

Современные численные методы позволяют провести оценку достоверности полученных экспериментальных данных и дать их качественную оценку, что позволяет исключить ошибки, возможные при проектировании новых продуктов и изделий, а также снизить их стоимость.

Для верификации экспериментальных данных была смоделирована конструкция установки по продувке пакетов плоских решеток с учетом особенностей геометрии и составных частей, включая дросселирующее устройство с силовыми элементами на входе в экспериментальную установку, спрямляющие лемнискаты турбулизирующую сетку на входе в пакет, различные варианты установленных пакетов лопаток («передне», «средне» и «задне» - нагруженные

профиля) и др – рисунок 10., а также проведено моделирование испытаний на различных RANS и URANS моделях турбулентности в пакетах Ansys CFX 14.5 и Ansys Fluent.

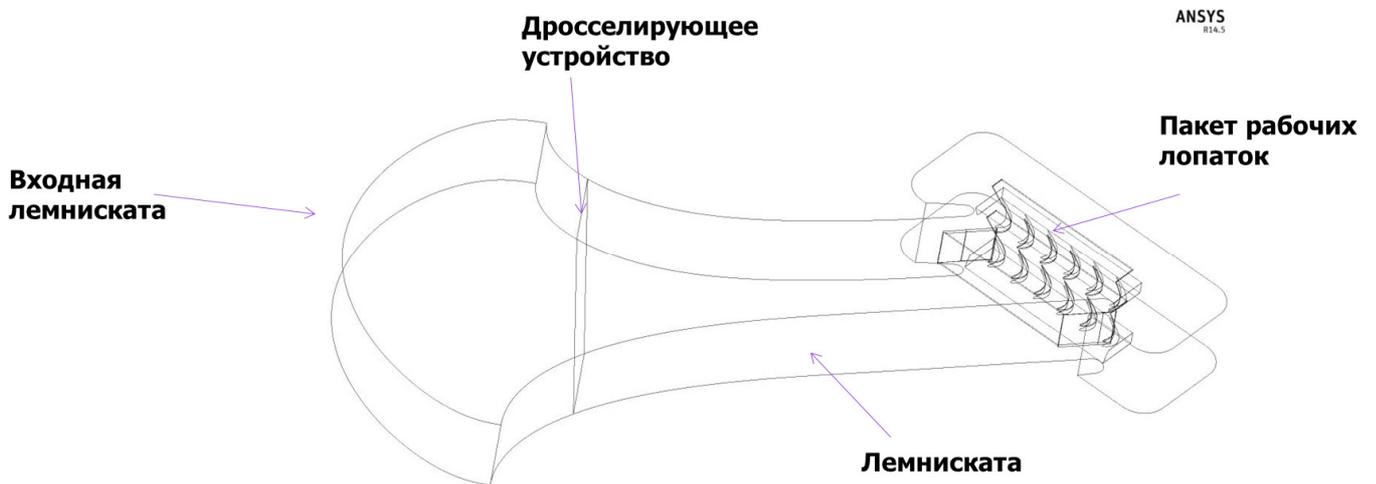


Рисунок 10. Экспериментальная установка по продувке плоских решеток

Основные RANS моделей турбулентности используемые при расчете:

- Shear Stress Transport (SST) model
- BSL model
- k- $\epsilon$  model
- k- $\omega$  model
- k-k1- $\omega$  model
- realizable k- $\epsilon$  model

В качестве граничных условий на входе задавалось полное давление и температура, полученные по результатам замера в эксперименте, на выходе - статическое давление. Расчет проводился на скорости  $\lambda$  от 0,5 до 0,6 и числах

Рейнольдса от 600.000 до 50.000. Ниже представлено сравнение экспериментальных данных и данных, полученных по результатам CFD расчетов – рисунок 11. Сравнение проводилось при интенсивности турбулентности на входе в решетку 5% (т.к уровень турбулентности 4% считается типичным для современных ТНД [1]) для «передне» и «задне» - нагруженных решеток на модели турбулентности realizable k-e и ламинарно-турбулентной модели k-kl- $\omega$ .

По результатам расчетов при числа Рейнольдса более 400.000 «задне» - нагруженная решетка имеет большие потери, чем «передне» - нагруженная. При числах Рейнольдса от 400.000 до 200.000 потери в решетках имеют примерно одинаковые значение, что хорошо согласуется с экспериментом.

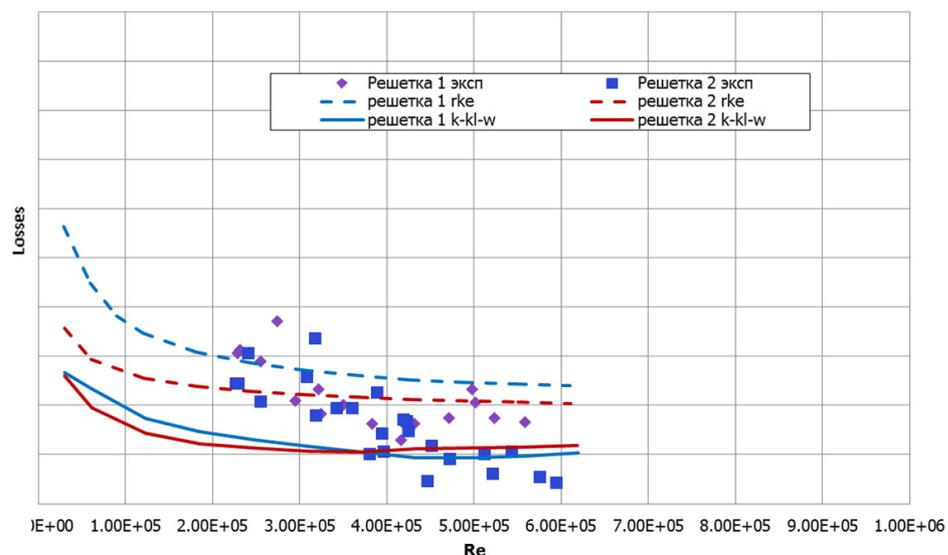
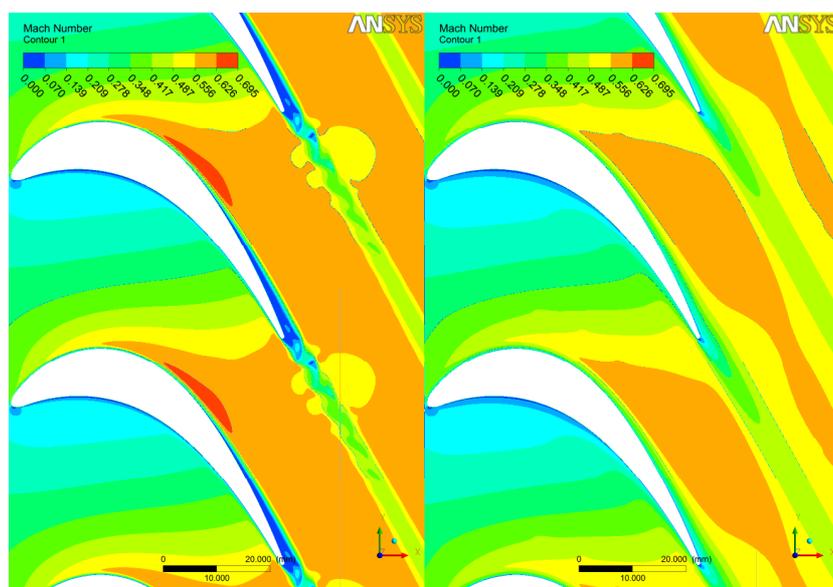


Рисунок 11. Сравнение экспериментальных данных и CFD расчетов при уровне турбулентности на входе 5%

Сравнение различных моделей турбулентности показало, что использование полностью турбулентных RANS моделей (рисунок 12б) не имеет смысла, так как



**а. k-k1- $\omega$**

**б. Realizable k-e**

**Рисунок 12. Сравнение моделей турбулентности**

данные модели не воспроизводят физически корректную картину течения – в них отсутствует ламинарный пограничный слой, а отрывное и тем более возвратное течение полностью отсутствует. Высокий уровень потерь в таких моделях достигается за счет использования «нефизично» высокой турбулентной вязкости. Использование переходной SST GTM модели также не рекомендуется, так как она требует значительной настройки для каждого конкретного случая, плохо моделирует физику течения и не рекомендована самим автором для использования в таких случаях. Ламинарно – турбулентные модели, такие как k-k1- $\omega$  (рисунок 12а), позволяют качественно оценить наличие ламинарного отрыва (особенно при числах Рейнольдса менее 200.000), однако общий уровень потерь остается ниже по сравнению с проведенным экспериментом.

По результатам обработки экспериментальных данных «передне» - нагруженная решетка имеет меньшие потери, чем «задне» - нагруженная, что хорошо подтверждается проведенными CFD расчетами. Незначительная разница между решетками при числах Рейнольдса от 300.000 до 200.000, вероятно, связана с относительно небольшой аэродинамической нагрузкой по Цвайфелю. При ее увеличении разница также будет увеличиваться.

### **Библиографический список**

1. Binder A., Schroeder Th., Hourmouziadis J. Turbulence Measurements in a Multistage Low-Pressure Turbine, *ASME J.Turbomachinery*, 1989, pp.153-161.
2. Popovic I., Zhu J., Dai W., Sjolander S.A, Praisner T., Grover E. Aerodynamics of family of three highly loaded low pressure turbine airfoils: measured effects of Reynolds number and turbulence intensity in steady flow, ASME Paper, GT2006-91271, 2006.