

**Тестирование моделей турбулентности
применительно к расчетам трехмерного
течения и торцевого теплообмена
в решетках утолщенных сопловых
лопаток**

Левченя А.М., Рис В.В., Смирнов Е.М.



Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет
Кафедра гидроаэродинамики
E-mail: aero@phmf.spbstu.ru

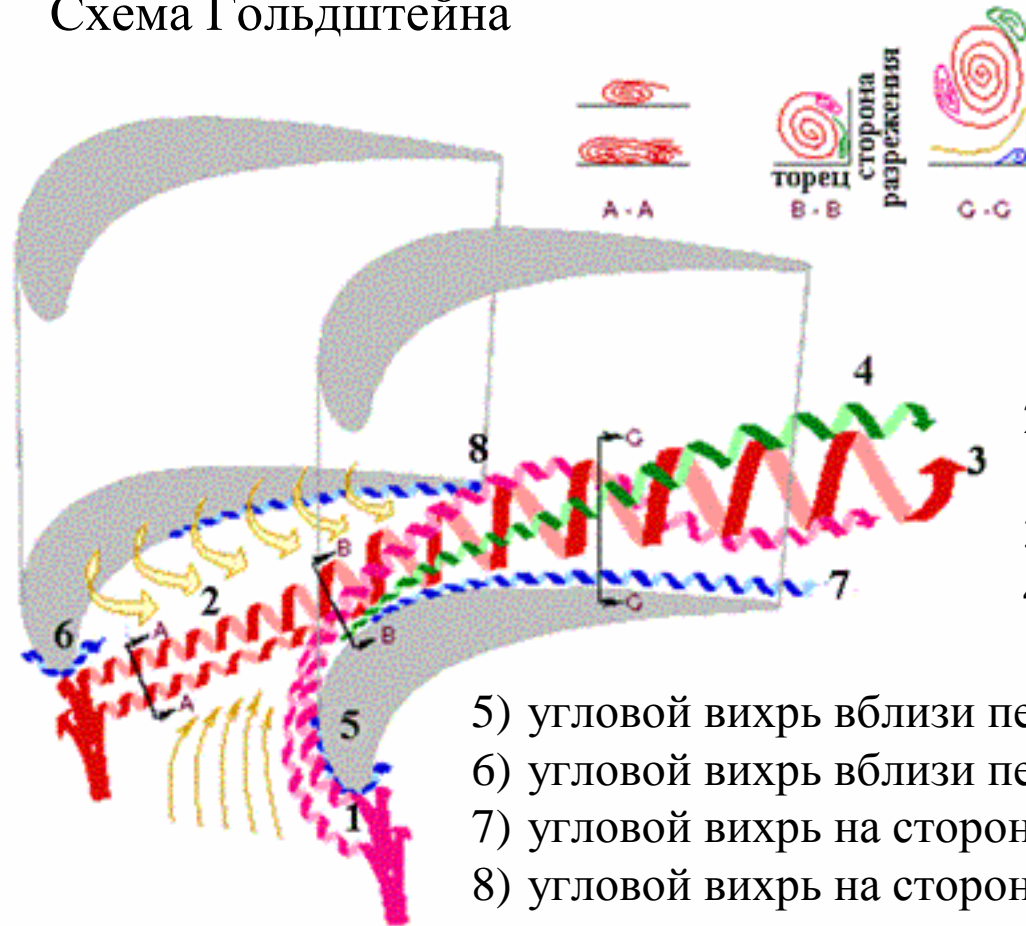
СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. Введение в проблему, постановка исследований по предсказанию характеристик торцевого теплообмена в турбинных решетках, накопленный ранее опыт (докладчик - Е.М. Смирнов)

Часть 2. Численное моделирование трехмерного течения и торцевого теплообмена в решетках утолщенных сопловых лопаток (докладчик - А.М. Левченя)

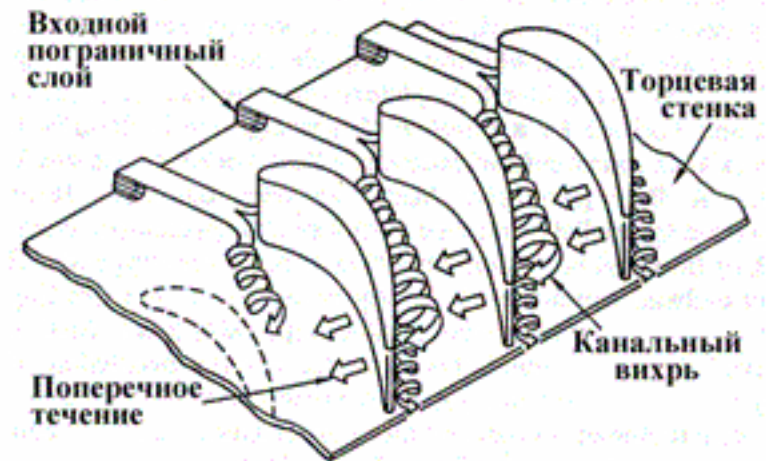
Структура вторичных течений

Схема Гольдштейна



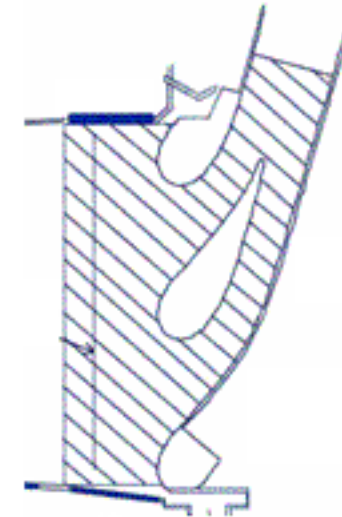
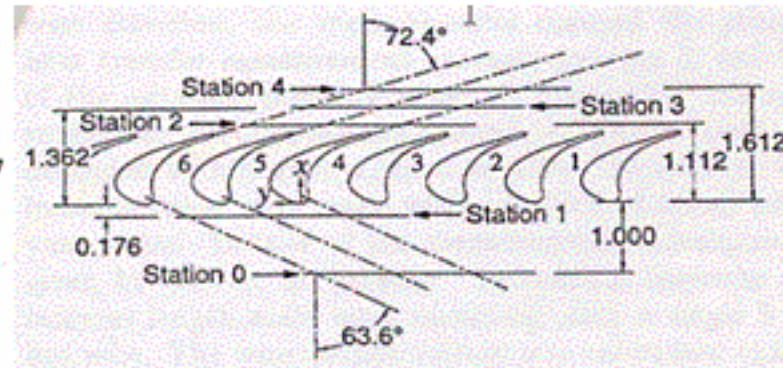
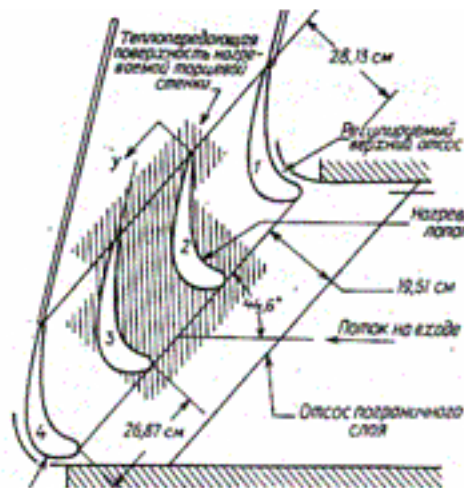
- 1) ветвь подковообразного вихря на стороне разрежения
- 2) ветвь подковообразного вихря на стороне давления
- 3) канальный вихрь
- 4) пристенный вихрь, индуцированный канальным вихрем
- 5) угловой вихрь вблизи передней кромки на стороне разрежения
- 6) угловой вихрь вблизи передней кромки на стороне давления
- 7) угловой вихрь на стороне разрежения
- 8) угловой вихрь на стороне давления

Схема Лэнгстона



- 1) ветвь подковообразного вихря на стороне разрежения
- 2) ветвь подковообразного вихря на стороне давления
- 3) канальный вихрь
- 4) пристенный вихрь, индуцированный канальным вихрем

Доступные тесты по торцевому теплообмену в решетках лопаток



Организация	United Technologies Corp., USA	NASA Glenn Research Center	Virginia Polytechnic Institute
Авторы	Graziani <i>et al</i>	Giel P.W. <i>et al</i>	Thole K.A. <i>et al</i>
Год публикации	1980	1996	1999
Тип лопатки	Рабочая	Рабочая	Сопловая
$Re_{\text{ВХОД}}$	10^6	$0,5 \div 1 \cdot 10^6$	$0,6 \div 1,2 \cdot 10^6$
$M_{\text{ВЫХОД}}$	0,16	0,98; 1,32	0,08

Инструментарий межкафедральной*) научной группы вычислительной гидрогазодинамики и теплообмена

Собственные программные средства

- Расчетное ядро **SINF** (*Supersonic-to-Incompressible Flows*, 1992-...)
- Средства генерации 2D/3D блочно-структурированных сеток (1994 ...)
- Семейство программ **FLAG** (*Flow Analysis Graphics*, 1993-...)
- Интегрированный CFD пакет **FLOS** (*Flow Studio*, 2002-...)
- Статистический анализ нестационарных полей **TSTAT** (2005...)

Использование коммерческих CFD кодов

- Fluent (2001-...)
- Star-CD (2001-2003)
- CFX-TASCflow (2002-2005)
- NUMECA Fine/Turbo (2003-...)
- ANSYS-CFX (2005-...)

*) кафедра гидроаэродинамики и кафедра теоретических основ теплотехники СПбГПУ

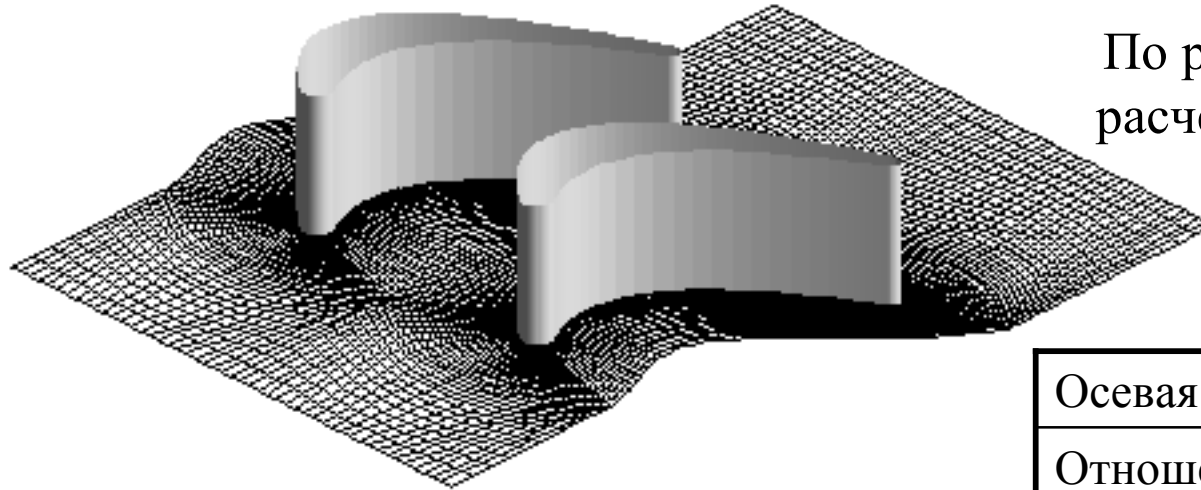
Программный комплекс SINF

(Supersonic-to-INcompressible Flows; 3D Navier-Stokes solver)

- стационарные и нестационарные потоки жидкости и газа
- абсолютная и вращающаяся системы отсчета
- скользящие сетки; опции взаимодействия статор-ротор
- деформируемые сетки; опция аэроупругости
- сопряженный тепло- и массообмен
- современные модели турбулентности RANS (k , v_t -SA, k - ϵ , k - ω , MSST, v^2 - f); опции LES и RANS/LES (DES)

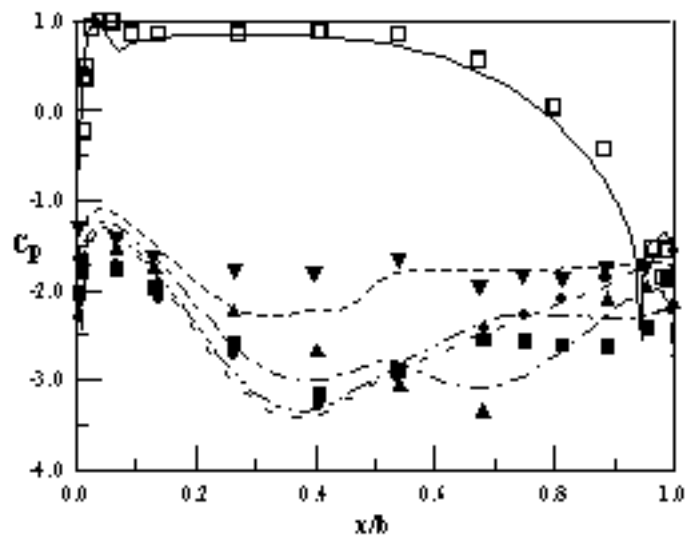
- блочно-структурированные сетки; опции стыковки блоков
- пространственная дискретизация $2^{\text{го}}$ порядка точности (метод конечного объема)
- неявная схема $2^{\text{го}}$ порядка по физическому времени
- параллельные вычисления (Domain Decomposition; MPI)

Низкоскоростное течение (Langston et al, 1977) и теплообмен (Graziani et al, 1980) в решетке рабочих лопаток



По результатам
расчетов 2001 г.

$Re \cong 10^6$;
 $M \cong 0,16$;
 $Pr \cong 0,72$



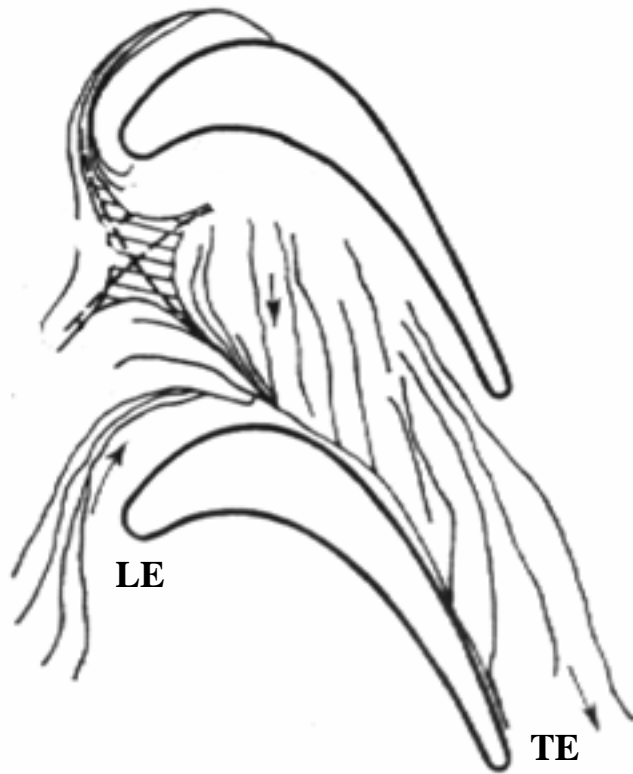
Символы - эксперимент
 □ — P.S.
 ▼ — S.S., 2,5%
 ▲ — S.S., 12,5%
 ■ — S.S., 25%
 ● — S.S., 50%
 Линии - расчет

Распределение давления по поверхности лопатки

Осевая ширина b_x , мм	281,3
Отношение хорды к ширине	1,2242
Отношение шага к ширине	0,9555
Отношение высоты к ширине	0,9888
Угол касательной к средней линии на входе	44°
Угол касательной к средней линии на выходе	26°
Скорость в ядре потока на входе, V_{in} , м/с	33,5
Угол входа потока в решетку	$44,7^\circ$

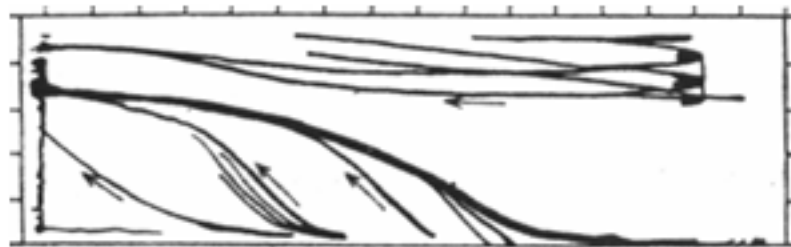
Донные линии тока

Торцевая стенка



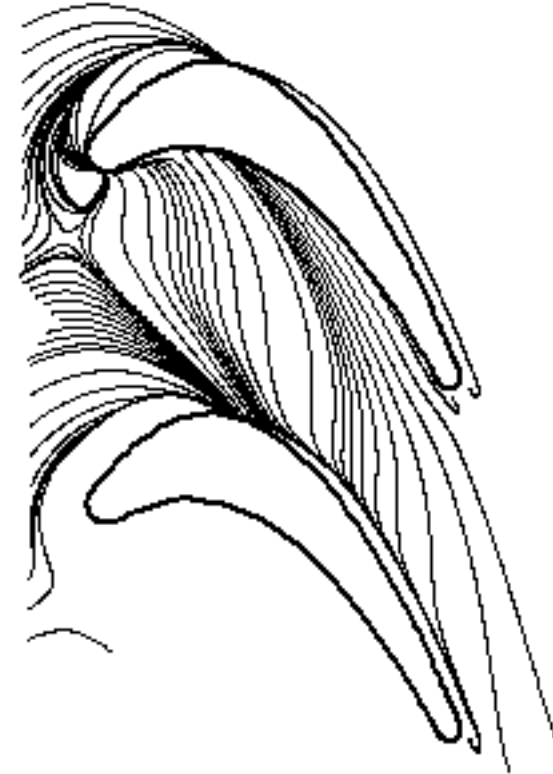
эксперимент (Graziani, 1980)

Среднее сечение

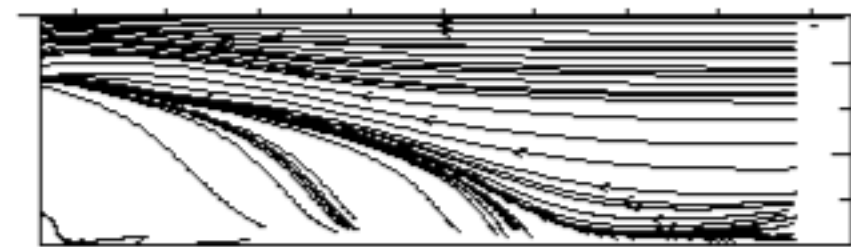


TE

Торцевая стенка



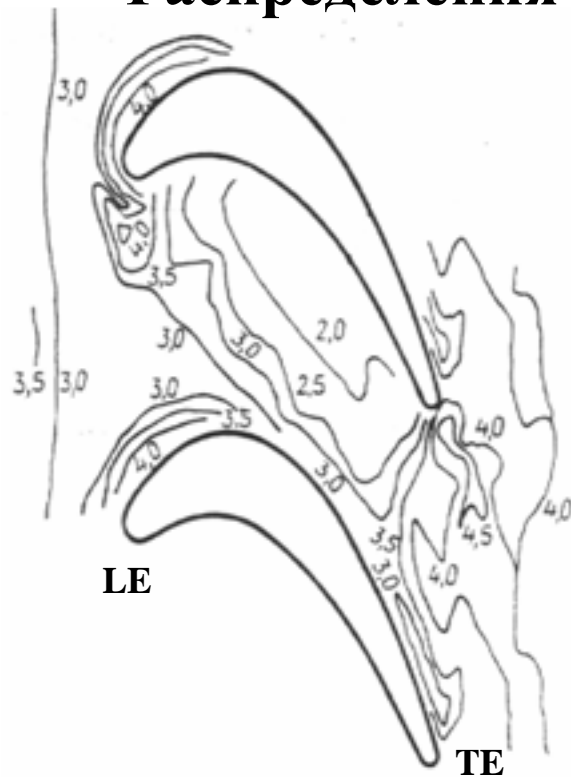
модель Спаларта-Аллмараса, SINF



Поверхность лопатки,
сторона разрезания

Распределения числа Стантона ($\cdot 10^3$)

Торцевая стенка

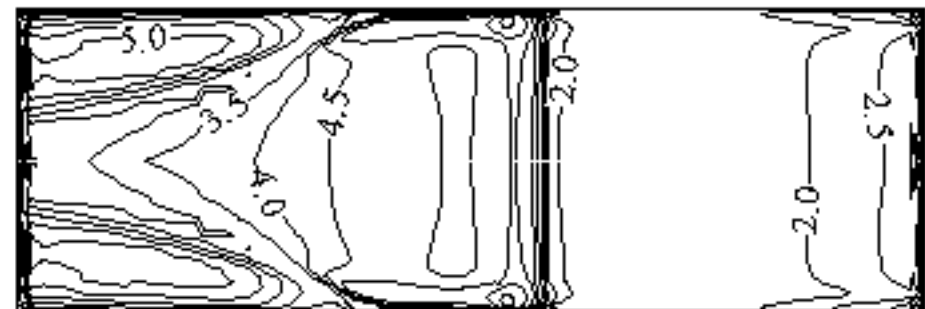


эксперимент (Graziani, 1980)
Торцевая стенка



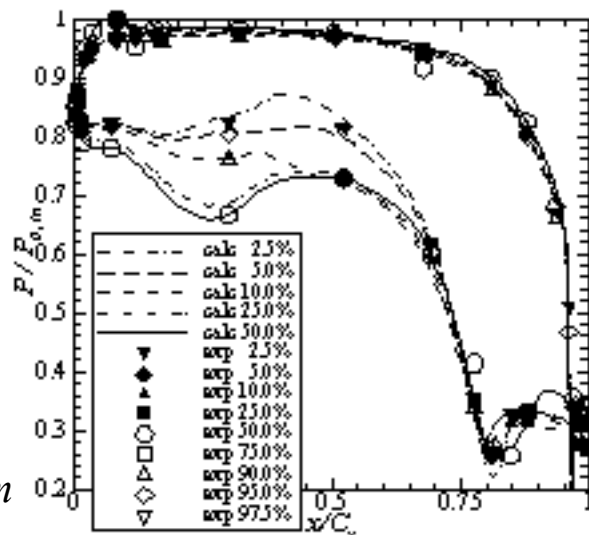
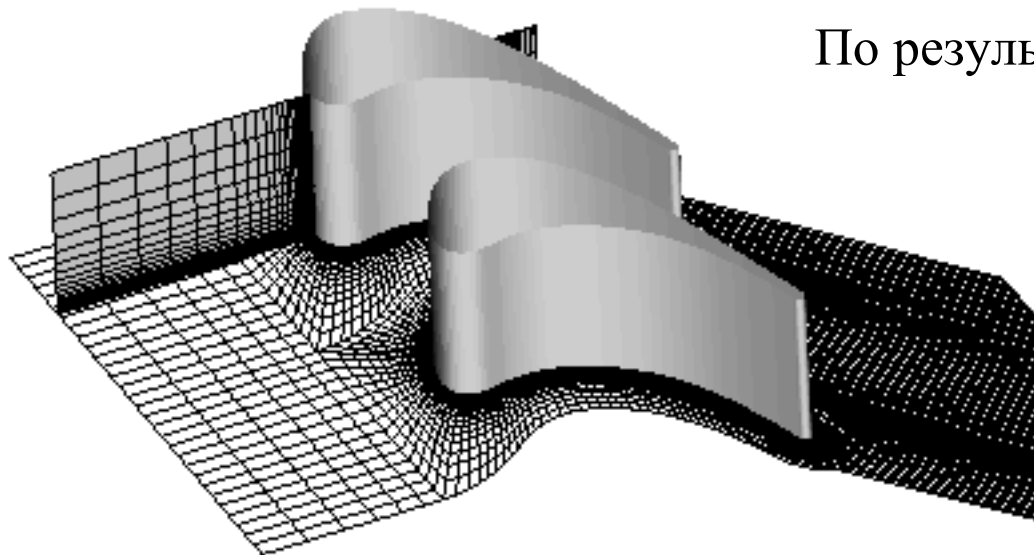
модель Спаларта-Аллмараса, SINF

Поверхность лопатки



Трансзвуковое течение и торцевой теплообмен (Giel et al, 1996-2001) в решетке турбинных профилей

По результатам расчетов 2002-2006 гг.



Символы –
эксперимент;
линии - расчет

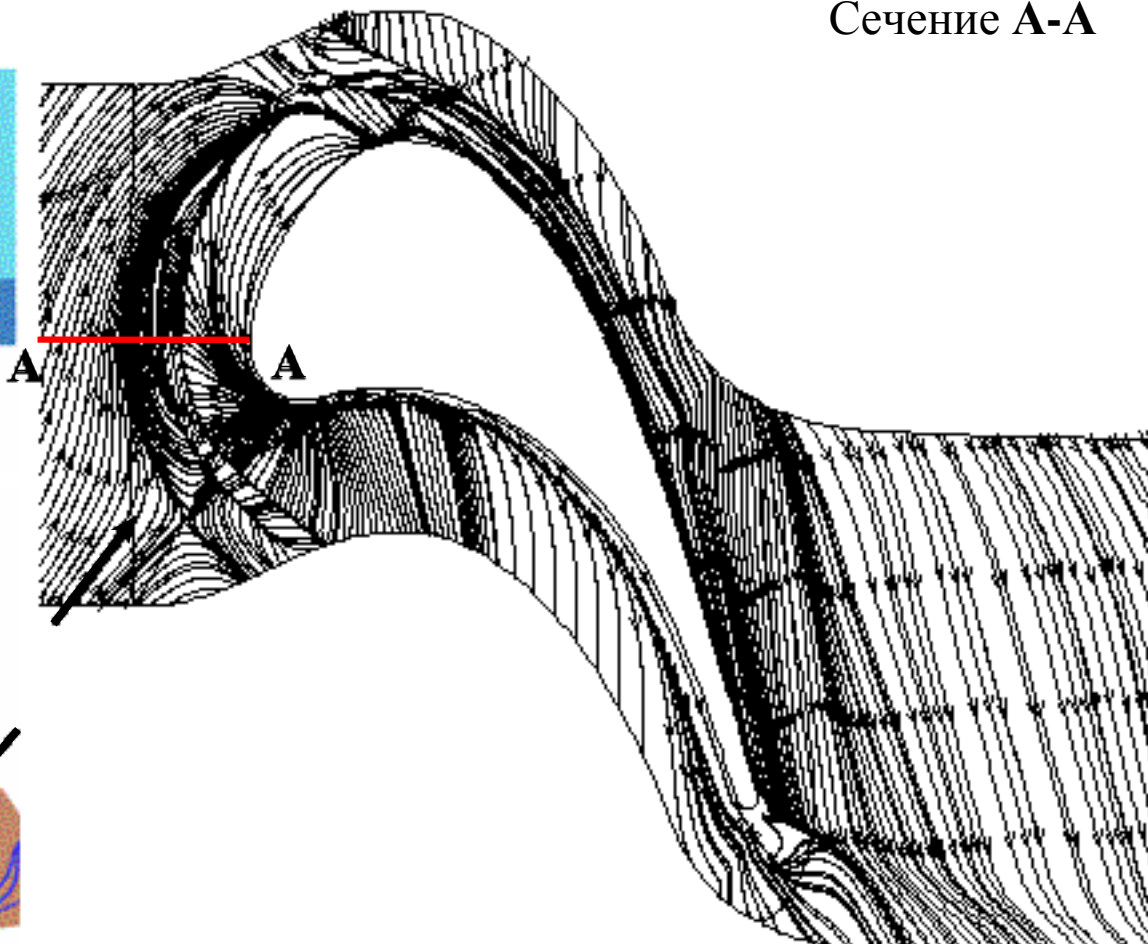
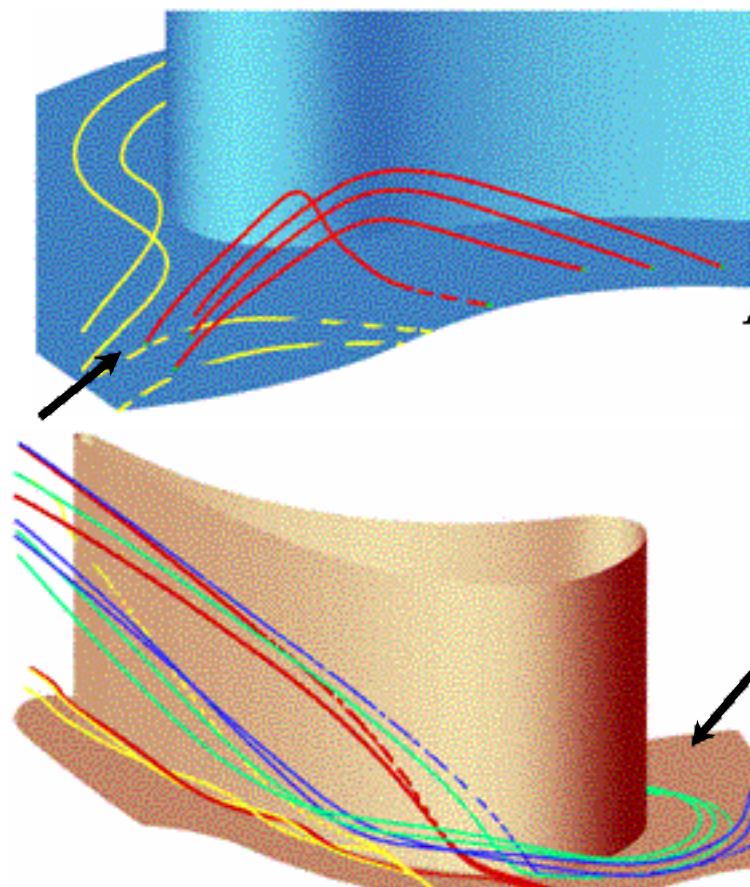
Распределение давления по поверхности лопатки

Длина осевой хорды, C_x , см	12,7
Шаг, см	13,0
Высота, см	15,24
Хорда, см	18,42
Входной угол потока	$63,6^\circ$
Расчетный угол поворота потока	136°
Число Рейнольдса на входе	$1,0 \cdot 10^6$
Число Маха на входе M_{in}	0,38
Число Маха на выходе M_{ex}	0,98, 1,32
Толщина пограничного слоя на входе	3,2 см

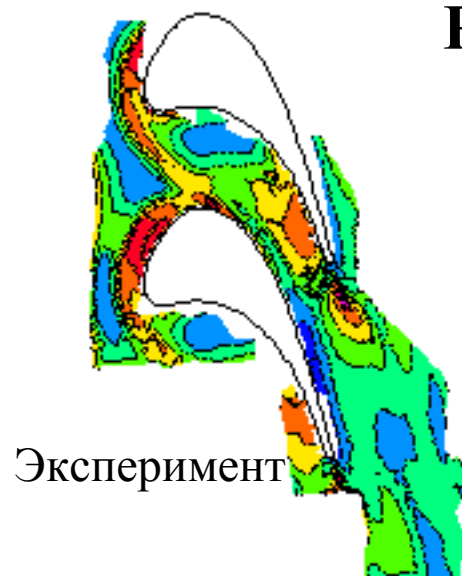
Вихревые структуры



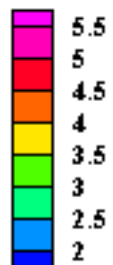
Сечение А-А



Распределения числа Стантона ($\cdot 10^3$) на торцевой стенке



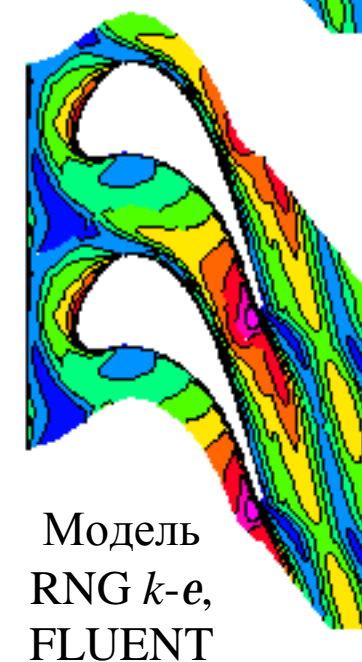
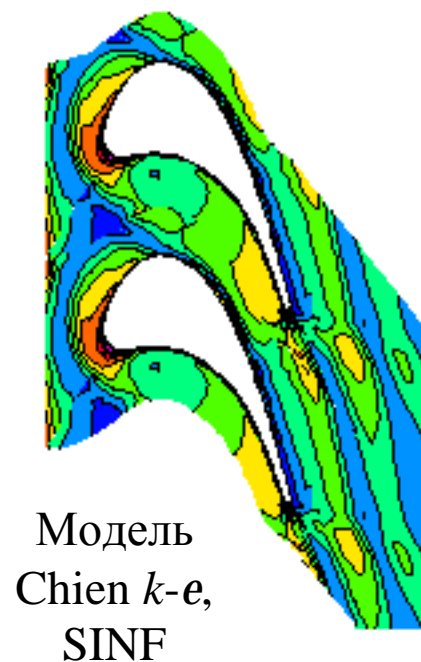
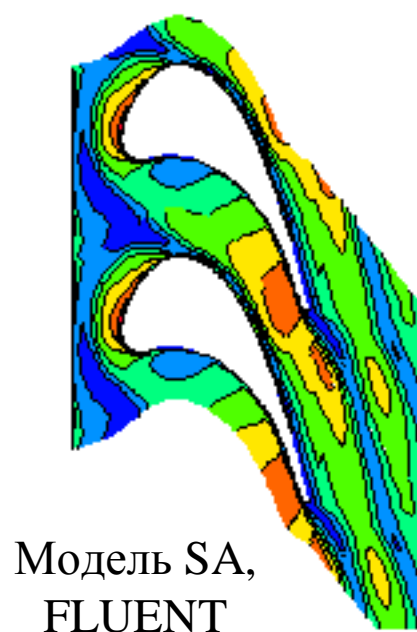
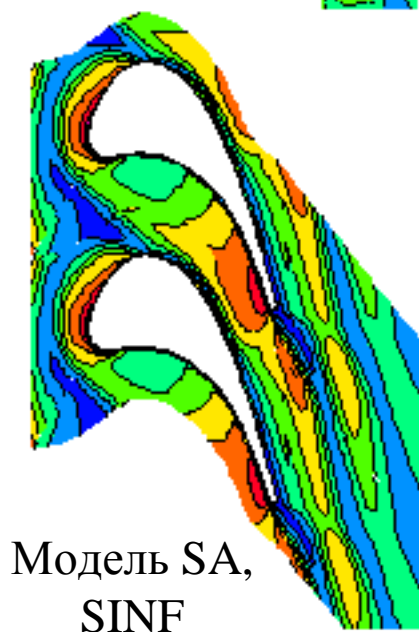
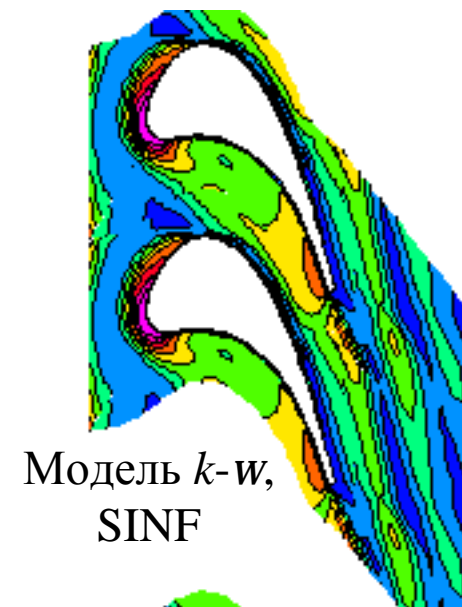
$St \times 1000$



$$M_{ex} = 1,32$$

$$Re = 1,0 \cdot 10^6$$

Влияние модели турбулентности



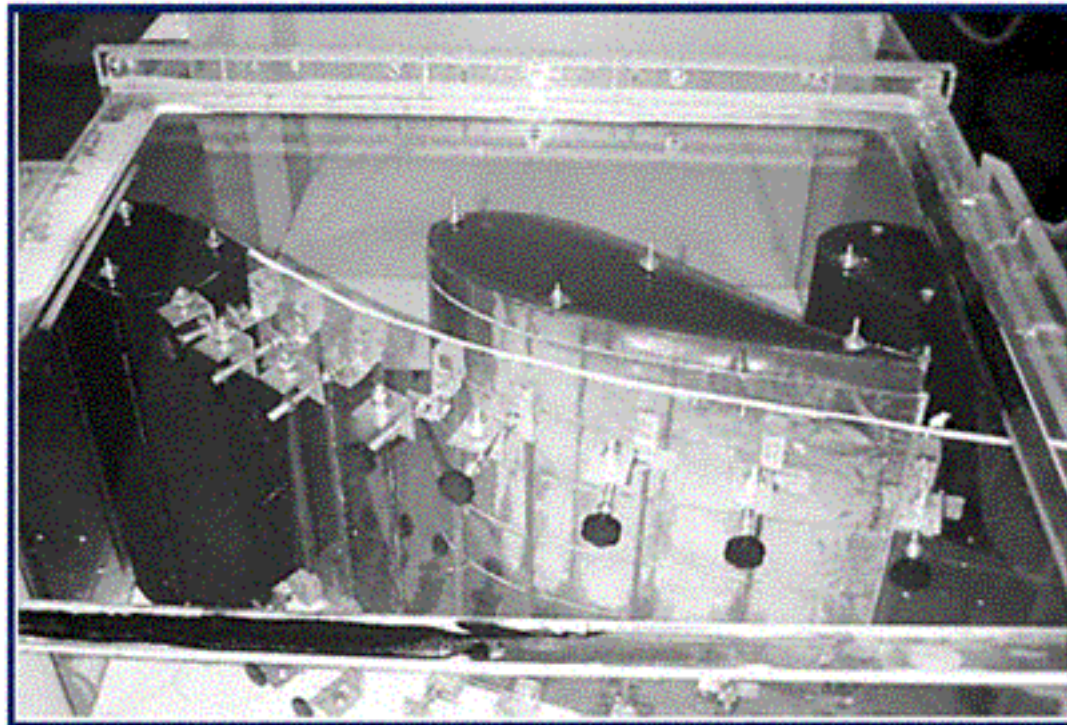
Некоторые выводы общего характера

- ❑ Торцевой теплообмен в решетках турбомашин характеризуется сильной неравномерностью в распределении локального коэффициента теплоотдачи.
- ❑ Формирование зон с повышенной и пониженной теплоотдачей определяется сложной структурой вторичных течений, с многочисленными отчетливо выделяемыми вихревыми образованиями.
- ❑ Сложность приторцевых, существенно трехмерных явлений и нынешние потребности практики предопределяют необходимость проведения систематических исследований по оценке возможностей моделей турбулентности правильно воспроизводить особенности торцевого теплообмена (имеются в виду расчеты на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса).
- ❑ К сожалению, база данных для проведения тестовых расчетов методами современной вычислительной гидродинамики весьма ограничена.

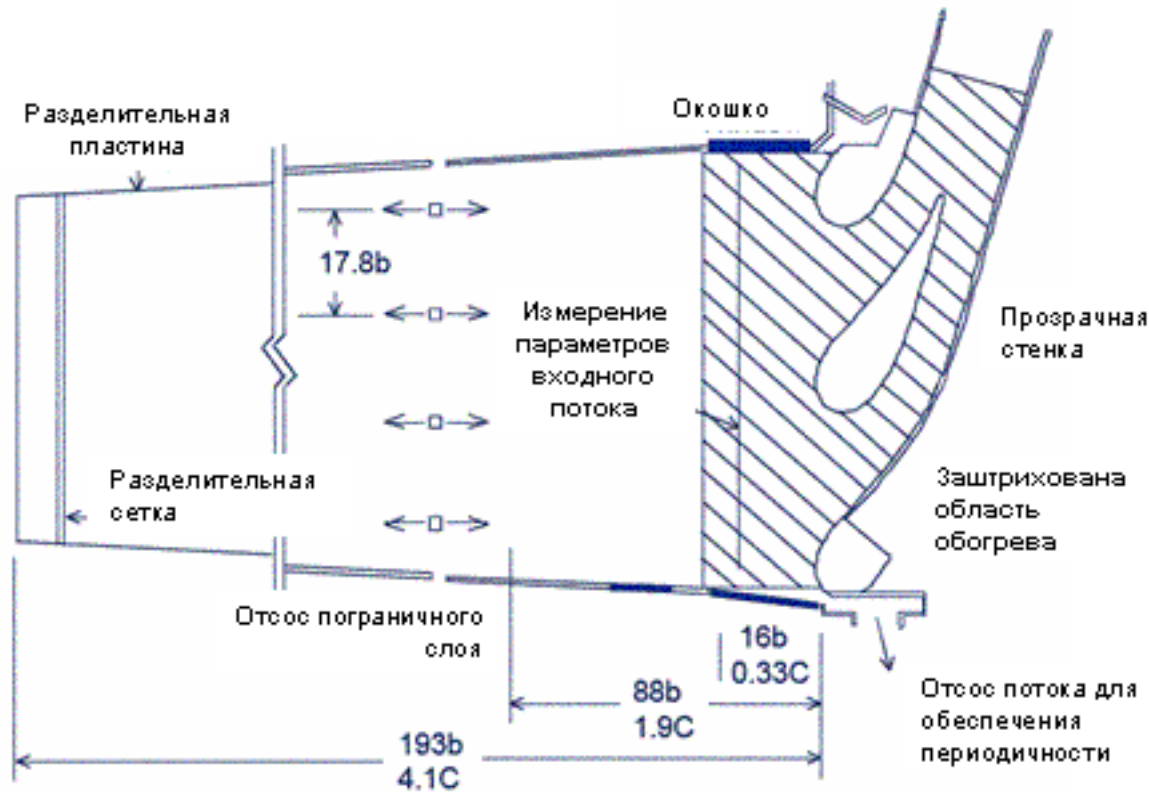
Некоторые выводы общего характера (продолжение)

- ❑ Специальное внимание следует уделять качеству расчетных сеток. Накопленный опыт показывает, что при использовании численных схем второго порядка сеточно-независимые решения задачи конвективного теплообмена можно получать лишь при использовании сеток около 2 млн. ячеек на один (полный) межлопаточный канал.
- ❑ Общая степень неравномерности локальной теплоотдачи ухватывается большинством современных двухпараметрических моделей турбулентности, однако в деталях картины могут существенно различаться. Интегрально (не без оговорок) предпочтительным является использование SST-модели турбулентности Ментера.

**Расчет течения и торцевого теплообмена в решетках
утолщенных сопловых лопаток и сопоставление с
тестовыми данными VPI (Virginia Polytechnic Institute)**



Экспериментальная модель и условия эксперимента

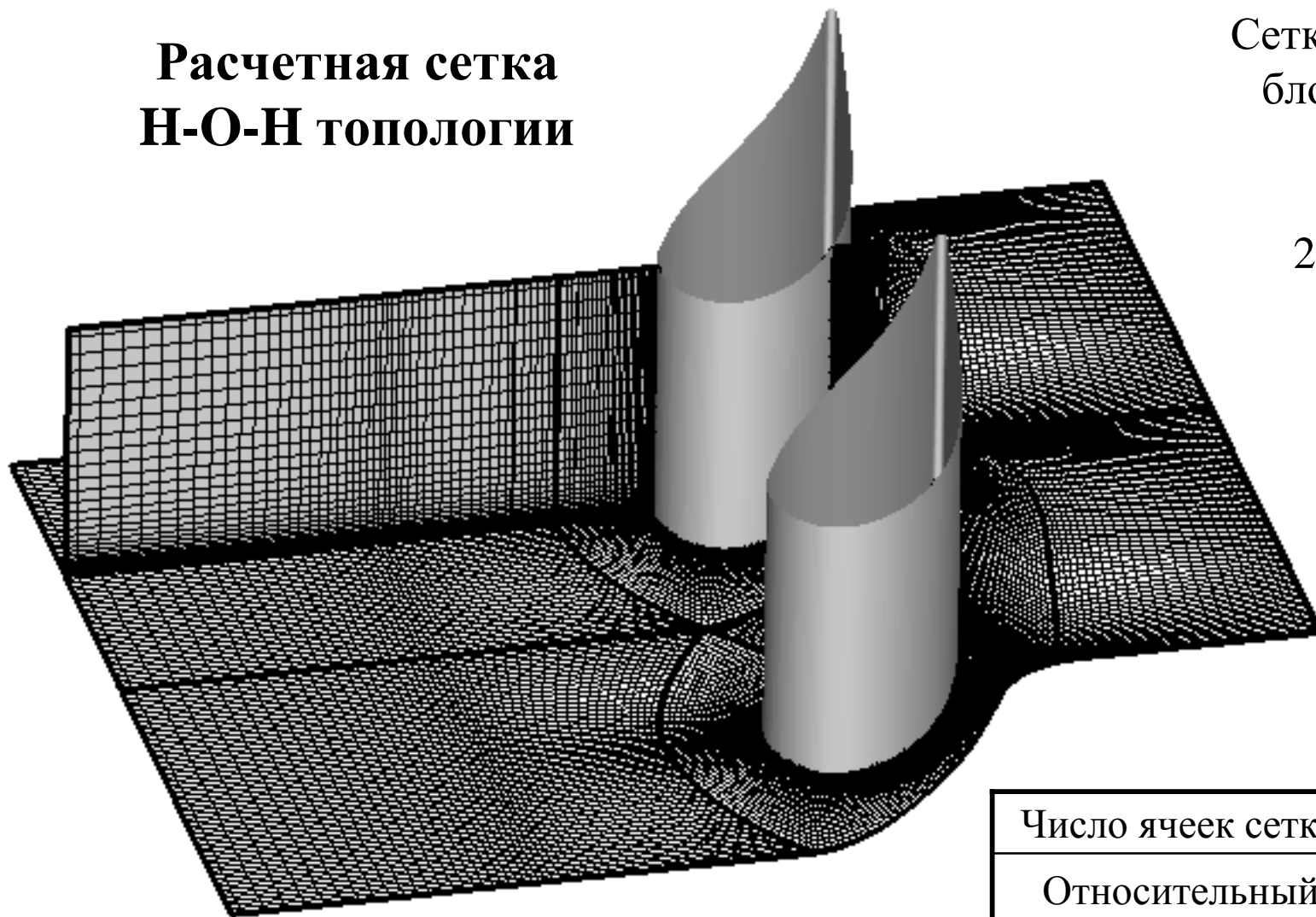


Длина осевой хорды, C_x , м	0,291
Шаг, м	0,457
Высота, м	0,552
Хорда, C , м	0,594
Угол потока на выходе	78°

Число Рейнольдса по выходной скорости, $Re_{\text{ВЫХ}}$	$6 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^6$
Скорость потока на входе, U_{in} , м/с	3,7	7,45
Толщина вытеснения входного пограничного слоя, δ^* , м	0,0121	0,0092
Тепловой поток на торцевой стенке, q_w , Вт/м ²	400	800

Расчетная сетка Н-О-Н топологии

Сетка состоит из 3
блоков размером
48´60´44,
280´44´44 и
24´68´44 ячеек

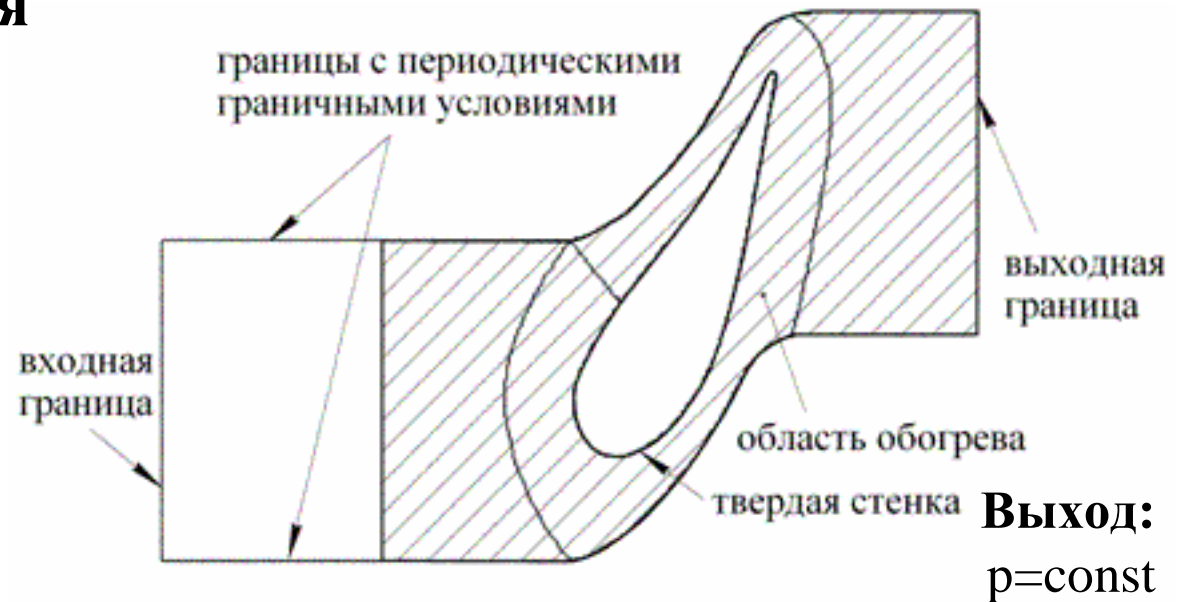


Число ячеек сетки	~ 740 000
Относительный размер ячейки	от $5 \cdot 10^{-5}$ до $0,08 C_x$
Величина y^+ на твердых стенках	~1

Граничные условия

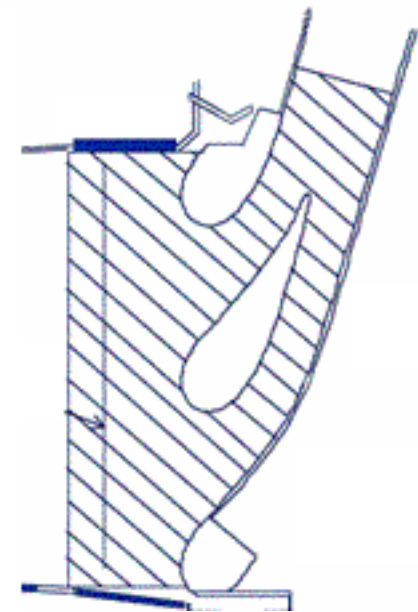
Внешний поток на входе
(расчет пограничного слоя)

$Re_{\text{вх}}$	$6 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^6$
Отношение турбулентной вязкости к молекулярной	30	60
Интенсивность турбулентности	0,6%	



- § Зеркальная симметрия течения относительно срединной плоскости
- § Условия прилипания на твердых стенках
- § Поверхность лопатки адиабатическая

Величина обогрева задается в соответствии с экспериментом, но форма области обогрева в расчете (сверху) отличается от эксперимента (справа)



Математическая модель и численный метод

Математическая модель

- турбулентное течение несжимаемой жидкости
- осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса и уравнение энергии
- модели турбулентности:
 - § Спаларта-Алмараса (S-A)
 - § $k-w$ Wilcox ($k-w$)
 - § Menter SST (MSST)

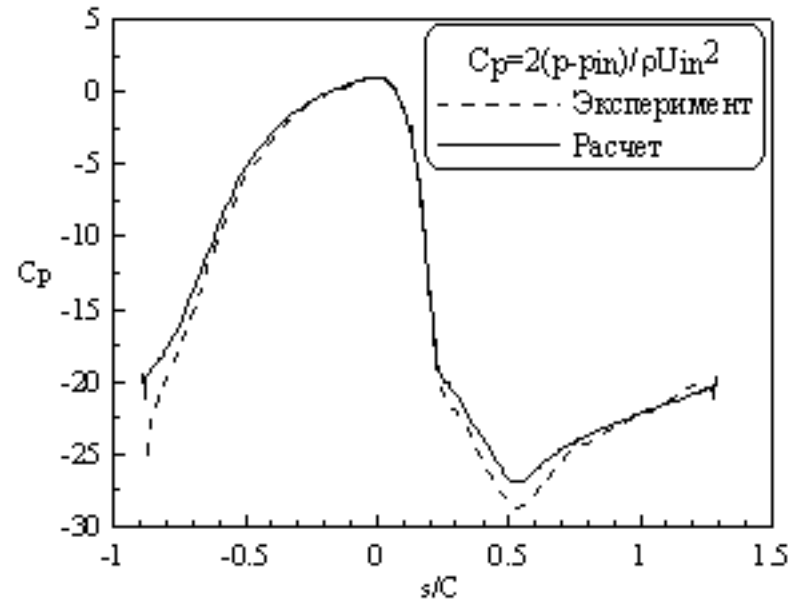
Численный метод (программный комплекс SINF)

- блочно-структурированные сетки, согласованные с границами области течения
- пространственная дискретизация по методу контрольного объема со вторым порядком точности
- значения переменных определены в центрах ячеек
- схема QUICK для расчета конвективных слагаемых

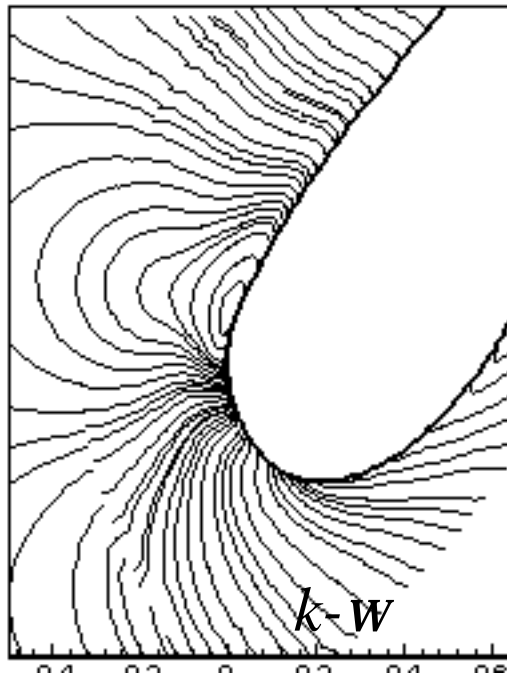
Поле давления

$Re = 1,2 \cdot 10^6$

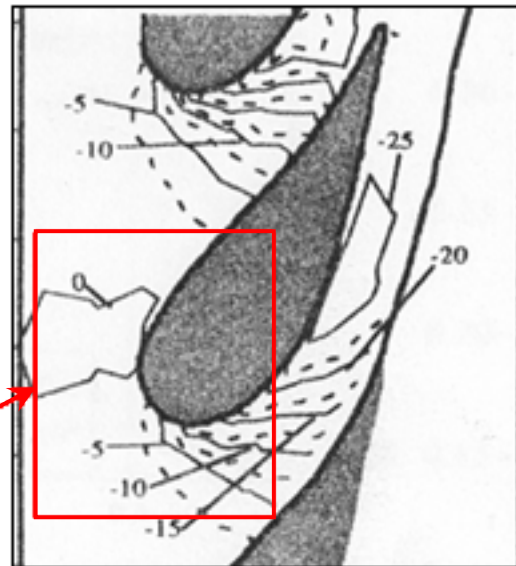
Статическое
давление
в среднем
сечении
лопатки



Статическое давление на торцевой стенке

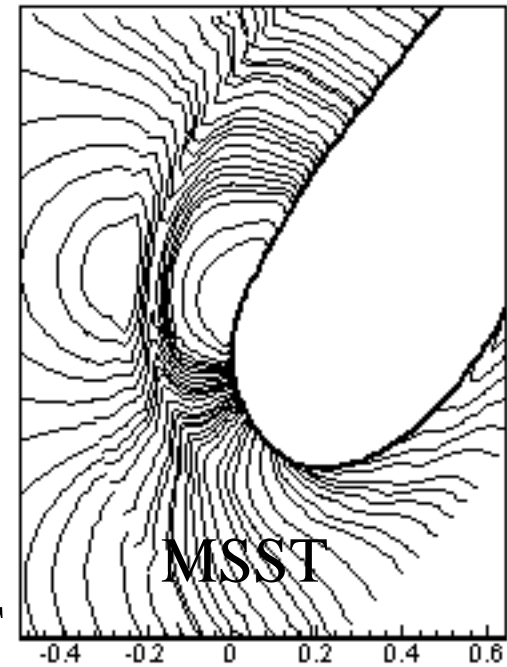


k-w



эксперимент

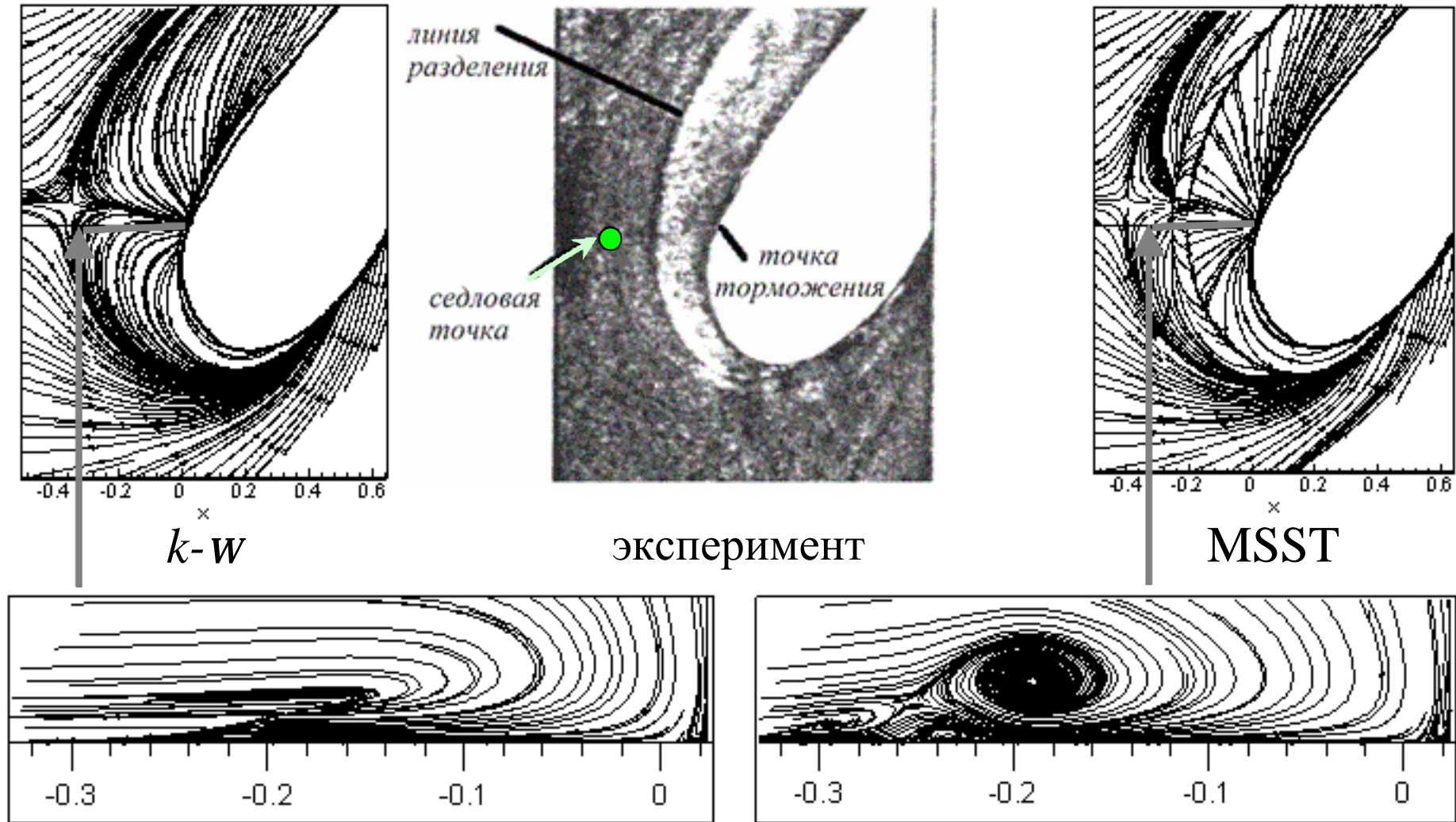
MSST



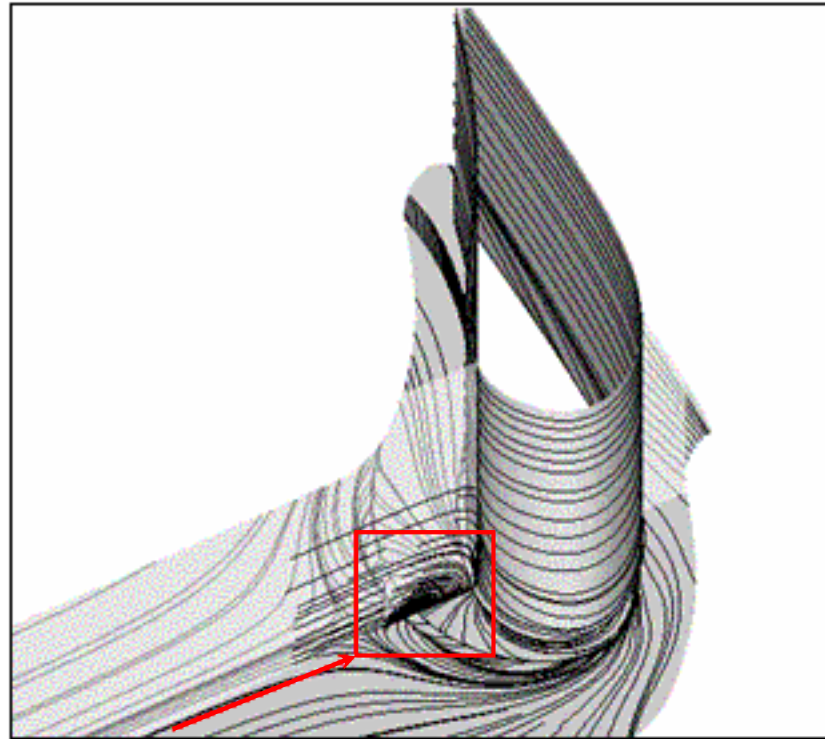
MSST

Вихревая структура течения

Сопоставление эксперимента и расчетов по разным моделям, $Re = 1,2 \cdot 10^6$

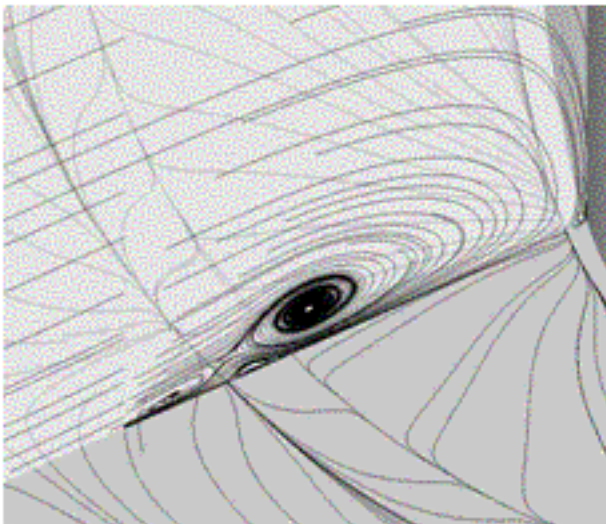


Структура течения

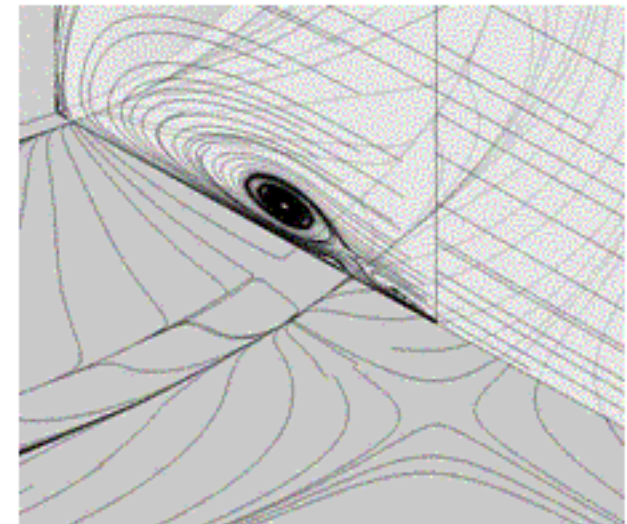


$$Re = 1,2 \cdot 10^6$$

Модель MSST
предсказывает
наиболее развитую
вихревую структуру

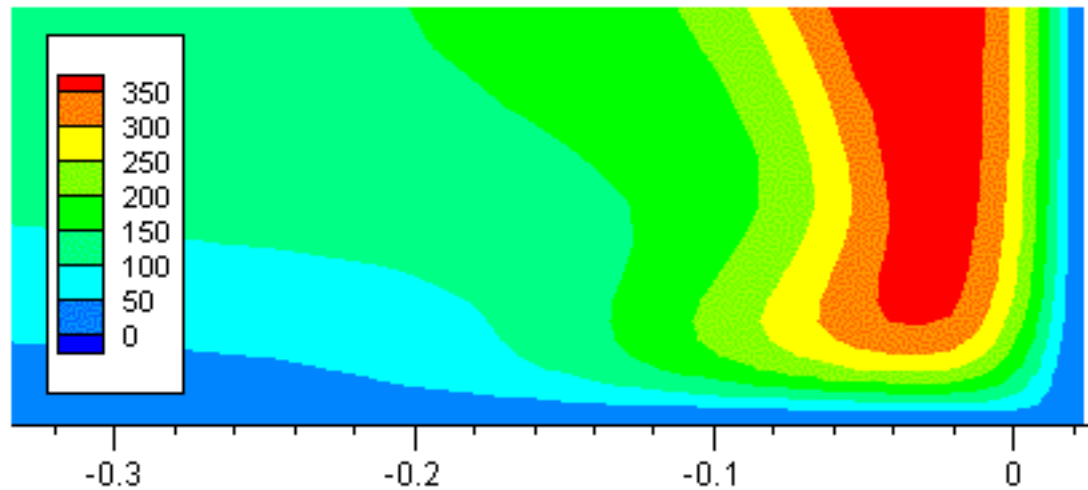


Картины, полученные по модели S-A, качественно схожи с результатами MSST, но вихри имеют меньшую интенсивность



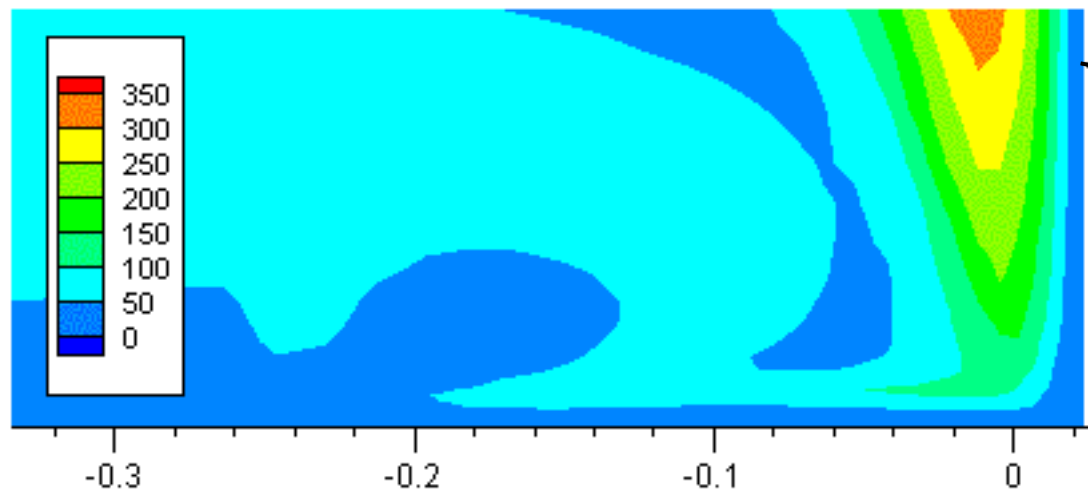
Анализ причин различий в вихревой структуре течения

Отношение турбулентной вязкости к молекулярной в потоке перед лопаткой

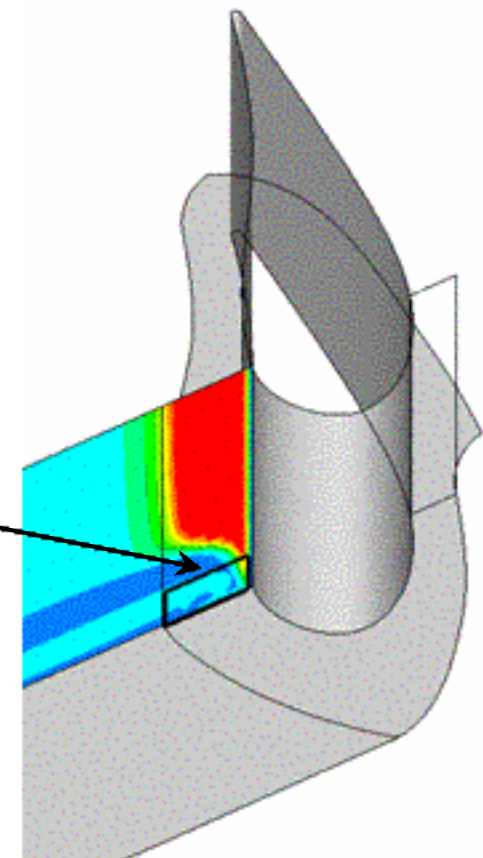


$k-w$

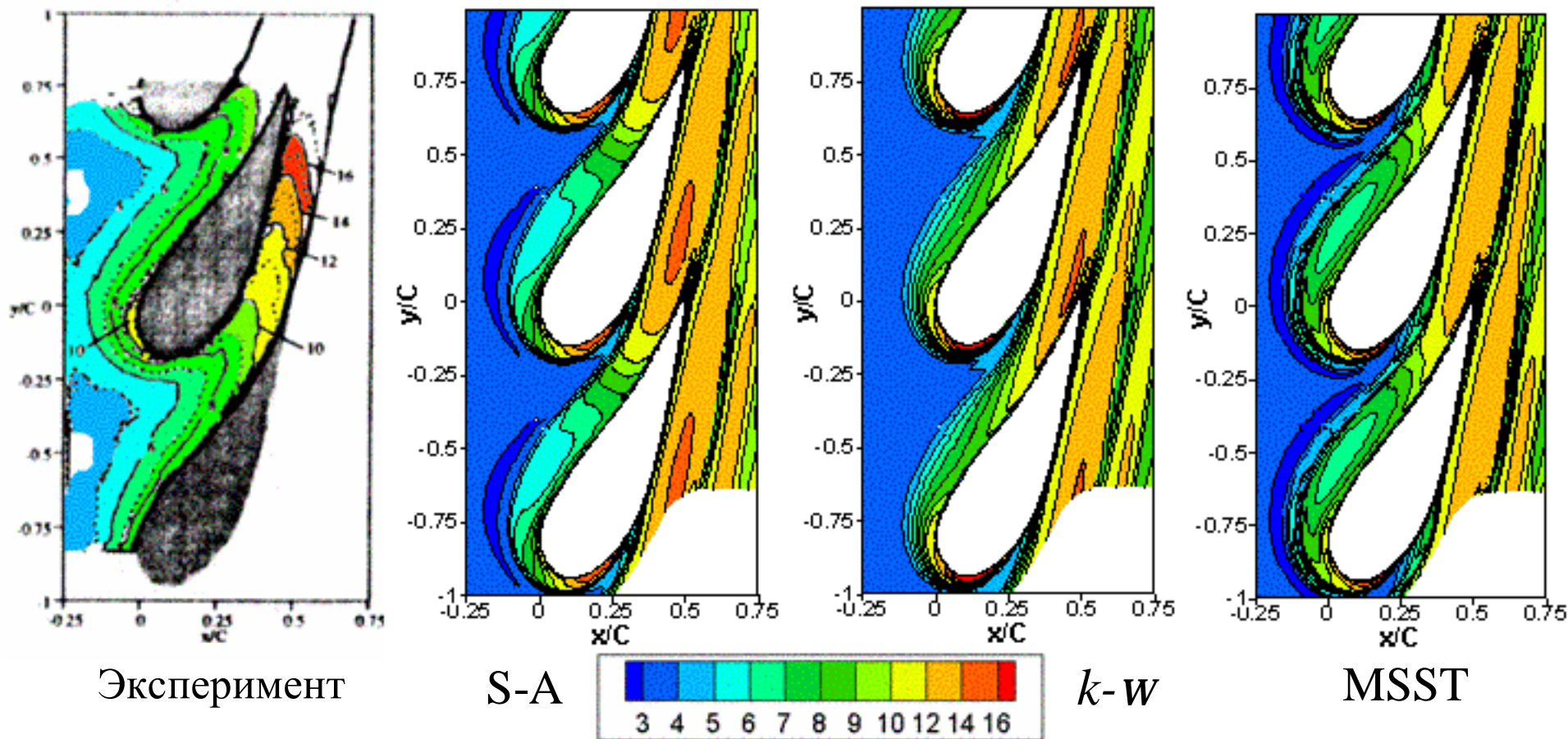
$Re = 1,2 \cdot 10^6$



MSST



Распределения числа Стантона ($\cdot 10^3$) $St = q_w / rU_{in} C_p (T_w - T_{in})$ $Re = 6 \cdot 10^5$



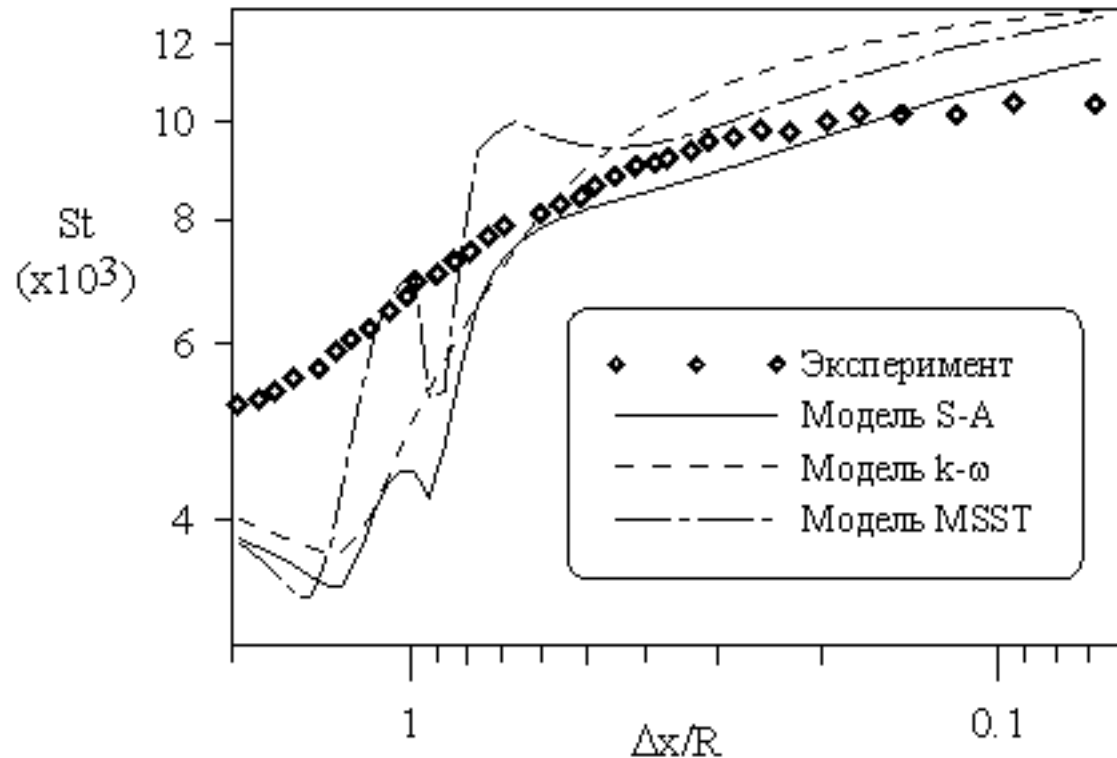
Все модели:

- St ниже перед межлопаточным каналом
- смещение максимума у передней кромки
- другая форма изолиний у задней кромки

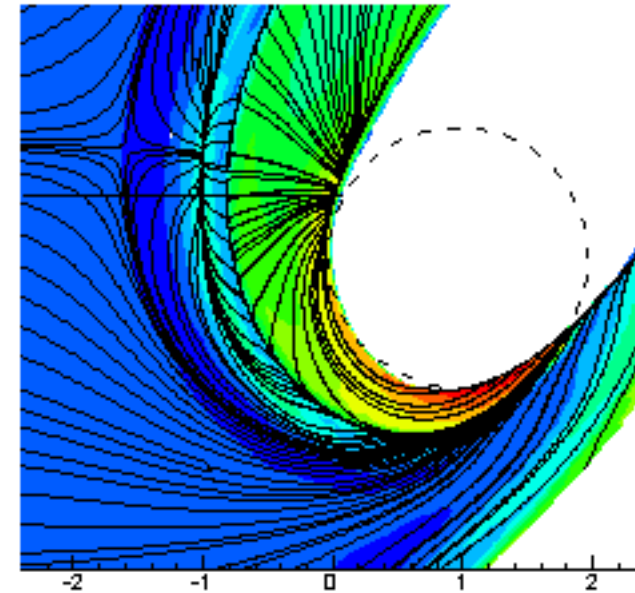
Страна давления:

- S-A и $k-w$ - градиентный характер изменений
- MSST – область $St \cong 0,008$

Изменение числа Стантона ($\cdot 10^3$) на торцевой стенке в области вверх по потоку от передней кромки лопатки, $Re = 6 \cdot 10^5$



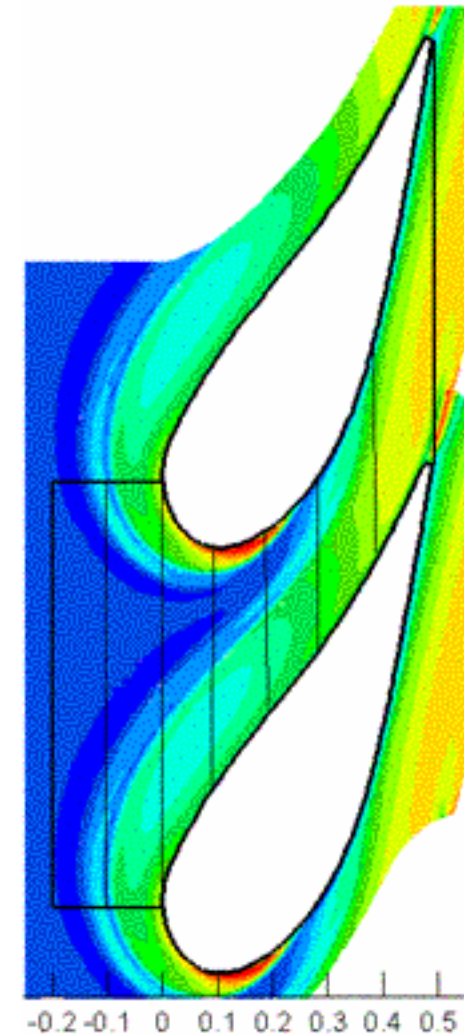
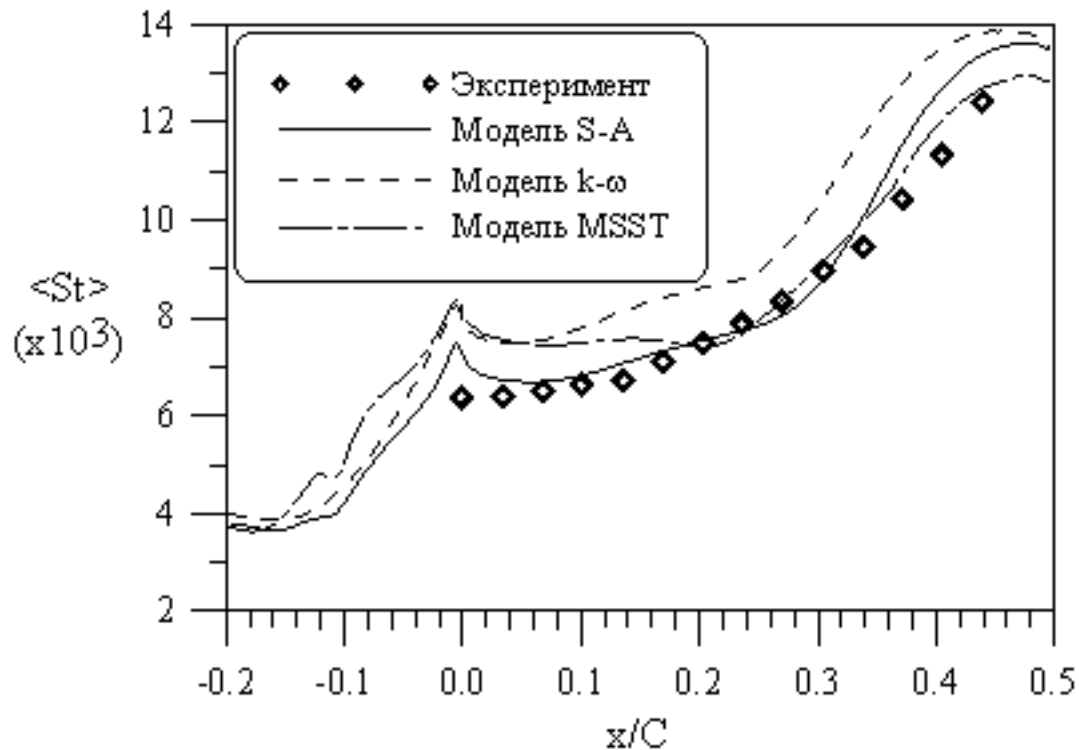
*Расстояние до лопатки отнесено
к условному радиусу передней кромки*



Распределение числа
Стантона, наложенное на
предельные линии тока.
Расчет по модели MSST,
 $Re = 1,2 \cdot 10^6$

- При меньших значениях Δx есть некоторое превосходство модели S-A
- В области выше по потоку – осцилляции числа St по моделям S-A и MSST и монотонное изменение по модели $k-\omega$, согласующиеся с наличием или отсутствием в полученном решении вихревых структур, предшествующих подковообразному вихрю

Распределения осредненного по шагу числа Стантона ($\cdot 10^3$) на торцевой стенке, $Re = 6 \cdot 10^5$



- S-A: максимальная близость к эксперименту
- $k-\omega$: завышение теплоотдачи на 5-20%
- MSST: вблизи задней кромки согласование лучше, у передней кромки – завышение уровня теплоотдачи

Заключение

- ❑ Проведено тестирование трех моделей турбулентности при расчетах трехмерного турбулентного течения и теплоотдачи на торцевой стенке межлопаточного канала прямой сопловой решетки, составленной из утолщенных лопаток. Используются модели Спаларта-Аллмараса (S-A), Уилкокса ($k-w$) и Ментера (MSST). Расчеты выполнены с помощью программного комплекса SINF.
- ❑ По моделям S-A и MSST получены качественно схожие между собой и с экспериментом картины приторцевого течения вблизи передней кромки лопатки: воспроизводятся не только подковообразный вихрь, но и несколько соседствующих с ним вихрей. В случае модели $k-w$ картина иная: образования, предшествующие подковообразному вихрю, отсутствуют, а последний существенно уширяется.
- ❑ Осредненные по шагу решетки характеристики теплоотдачи лучше всего предсказываются моделью S-A. Близкие результаты, с некоторым завышением интенсивности теплоотдачи, дает и модель MSST, а сильнее всех значения числа Стантона по сравнению с экспериментальными завышает модель $k-w$.