



AxSTREAM™ - Концептуальное проектирования осевых турбин

Руководство Пользователя, часть 5

Профилирование лопаток и решеток профилей в системе AxSTREAM

версия 2.3.x

Данная информация может быть изменена SoftInWay, Inc. без предварительного уведомления. SoftInWay, Inc. не несет ответственности за возможные ошибки в документе.

Все права защищены. Использование или копирование программного обеспечения осуществляется в соответствии с лицензией.



Содержание

1	ПРОФИЛИРОВАНИЕ ПЛОСКИХ РЕШЁТОК.....	3
1.1	Виды профилирования используемые в AxSTREAM.	3
2	НОМЕНКЛАТУРА ДЛЯ РЕШЁТОК ПРОФИЛЕЙ В AXSTREAM.....	6
2.1	СОПЛОВЫЕ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ	6
2.2	РАБОЧИЕ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ	7
2.3	РАБОЧИЕ ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА	8
2.4	НАПРАВЛЯЮЩИЕ ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА	9
3	ОКНО ПРОФИЛИРОВАНИЯ AXSTREAM	10
3.1	ВЫЗОВ ОКНА ПРОФИЛИРОВАНИЯ	10
3.2	ПАНЕЛЬ ОКНА ПРОФИЛИРОВАНИЯ:	11
3.3	ОПЦИЯ ОТОБРАЖЕНИЯ ПРОФИЛЯ	13
3.4	ПАНЕЛЬ ГРАФИКОВ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ОБТЕКАНИЯ	15
4	РЕЖИМ ПРОФИЛИРОВАНИЕ В AXSTREAM	17
4.1	ПРОФИЛИРОВАНИЕ ПО СТОРОНЕ ДАВЛЕНИЯ/СТОРОНЕ РАЗРЯЖЕНИЯ	17
4.2	ПРОФИЛИРОВАНИЕ СРЕДНЕЙ ЛИНИИ	20
4.3	ЗАДАЧИ ПРОФИЛИРОВАНИЯ	22
4.3.1	Настройка углов.....	22
4.3.2	Аэродинамический критерий Бури.....	24
4.4	РАСЧЕТЫ ОБТЕКАНИЯ РЕШЕТОК И ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ПРОФИЛЯХ	25
4.4.1	Оптимизация решетки профилей по геометрическому критерию качества	26
4.4.2	Оптимизация по минимуму профильных потерь	27
4.5	ПРОФИЛИРОВАНИЕ С ЗАДАННЫМИ ПРОФИЛЯМИ	28
4.5.1	Использование стандартных (атласных) профилей	28
4.5.2	Импорт профиля извне	31
4.5.3	Экспортирование и импортирование файлов IBL из программы ProE в AxSTREAM	31
4.5.4	Импорт массива точек из таблиц Excel	36
4.5.5	Подгонка значений импортированных профилей	39
4.6	3D ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛОПАТОК В СИСТЕМЕ AxSTREAM	40
4.7	ЗАДАЧИ 3D ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛОПАТОК	40
4.7.1	Проверка распределения углов и других геометрических параметров	40
4.7.2	Использование сплайнов для равномерного распределения параметров.....	41
4.7.3	Меридиональная модель проектирования лопаток.....	41
4.7.4	Автоматическая подгонка меридиональных границ.....	41
4.7.5	Контроль распределения напряжения	41
4.8	РЕГУЛИРОВКА УГЛОВ ОСЕВОГО И ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО НАВАЛА	41
5	БАЗА ПРОФИЛЕЙ АТЛАС	41
5.1	ЗАПУСК АТЛАСА	41
5.2	ОКНО АТЛАСА	41
5.2.1	Панель управления в окне Атласа	41
5.2.2	Подокно дерева профиля.....	41
5.2.3	Профили, сконструированные по точкам.....	41
5.2.4	Профили, сконструированные по дугам.....	41
5.2.5	Стандартные профили для профилирования компрессора.....	41
5.3	РАБОТА С АТЛАСОМ.....	41
5.3.1	Добавление типа турбины.....	41
6	ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДЛИННЫХ ЛОПАТОК	41
6.1	Начальные данные для проектирования профиля длинной лопатки:	41
6.1.1	Формирование длинной лопатки с учетом критериев прочности	41
6.1.2	Пример проектирования длинной лопатки	41

Внимание:

Профилирование в AxSTREAM используется для построения плоских решёток турбин и компрессоров. Профилирование имеет общий интерфейс и схожие подходы к решению задачи.

1 Профилирование плоских решёток

1.1 Виды профилирования используемые в AxSTREAM.

AxSTREAM использует несколько типов профилирования для создания профиля лопатки:

Макромодель – при данном способе профилирования нет конкретной формы. Есть лишь входной и выходной металлические углы, эффективный угол выхода потока и хорда. Представление профиля в виде Макромодели широко используется для задач анализа или на ранних стадиях проектирования.

Так как 1D и 2D решатели в AxSTREAM не задействуют в расчётах форму профиля, а используют лишь потоковые углы, отсутствие реальной формы не влияет на ход расчёта. Для профилей, построенных в режиме Макромодель, система AxSTREAM использует суррогатные модели для определения геометрических свойств, которые могут быть доступны.

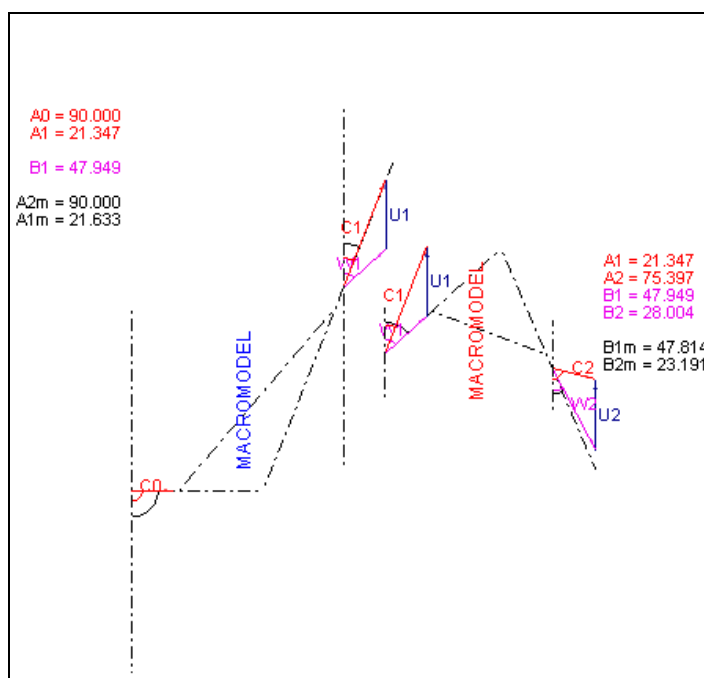


Рисунок 1. Ступень, спрофилированная по Макромодели

Венец, спрофилированный в режиме *Макромодель*, не может быть экспортирован в CAD/CAE. Для экспортирования профиля необходимо перейти в тот режим профилирования, который использует реальные формы профиля (использование пользовательских и стандартных профилей).

В режиме **Профилирования** форма профиля создаётся с помощью одного из двух алгоритмов профилирования, поддерживаемых в AxSTREAM:

- Профилирование по стороне давления / стороне разрежения
- Профилирование по срединной линии.

Профилирование по стороне давления / стороне разрежения используется для активных и активно-реактивных профилей. Для реактивных профилей периферийных сечений может быть использовано профилирование по срединной линии.

Режим **Профилирование** даёт возможность построить реальные формы профиля. Профили, спроектированные в этом режиме, могут быть экспортированы в CAD/CAE.

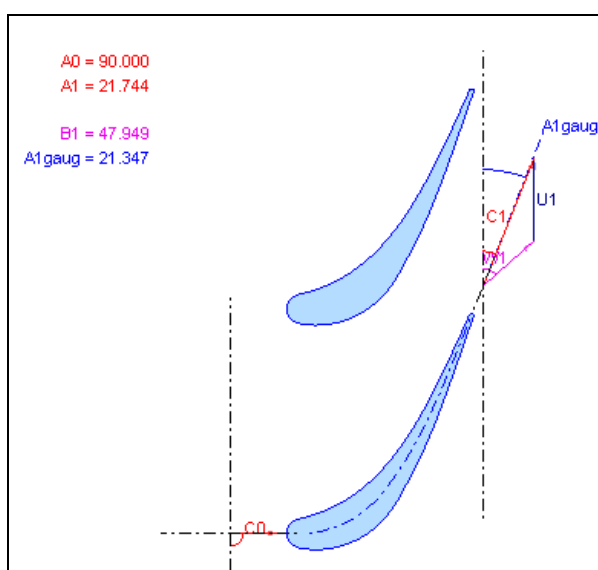


Рисунок 2. Сопловая лопатка статора в режиме Профилирования

В AxSTREAM существует два режима стандартного профилирования позволяющих использовать уже существующие формы профиля. AxSTREAM предоставляет возможность использования баз (атласов) стандартных профилей при проектировании лопаток. В атласах могут храниться стандартизованные у пользователя профили и профили, которые нельзя построить посредством профилирования в AxSTREAM (профили с вытеснителем).

В системе AxSTREAM существует два вида стандартного профилирования:

- Подгонка под эффективный угол выхода потока (AdjustedGaug);
- Подгонка под угол установки (AdjustedStg);
- Подгонка под среднюю линию (AdjustedCamb).

В режиме **Подгонки под эффективный угол** профиль, применяемый к сечению, масштабируется по хорде и устанавливается для обеспечения заданного эффективного угла выхода потока.

В режиме **Подгонки под угол установки** профиль, применяемый к сечению, масштабируется по хорде и устанавливается для обеспечения заданного угла установки.



Режим **Подгонка под среднюю линию** используется для стандартного профилирования компрессорных решёток и периферийных сечений турбины с высокой степенью реактивности. В этих сечениях профиль масштабируется по хорде и устанавливается для обеспечения заданного угла установки.

Режим **Фиксированный** означает использование полностью импортированной лопатки. AxSTREAM расценивает импортированную лопатку как единое целое. Для этого режима доступна лишь операция измерения углов.

2 Номенклатура для решёток профилей в AxSTREAM

2.1 Сопловые лопатки турбины

$A0m$ – металлический угол входа

$A0$ – угол входа потока в абсолютном движении

$A2$ – угол выхода потока из предыдущей лопатки в абсолютном движении

$B2$ – угол выхода потока из предыдущей лопатки в абсолютном движении

$U2$ – окружная скорость на выходной кромке предыдущей лопатки

$C0$ – абсолютная скорость на входе

$W2$ – скорость на входе в относительном движении на выходе из TE предыдущей лопатки



$A1m$ – металлический угол выхода

$A1$ – угол выхода потока в абсолютном движении

$A1e$ – эффективный угол выхода

$B1$ – угол входа потока для следующей лопатки в относительном движении

U – скорость вращения на выходной кромке

$C1$ – абсолютная скорость на выходе

$W1$ – относительная скорость в относительном движении (для следующей лопатки)

2.2 Рабочие лопатки турбины

B1m – металлический угол на входе

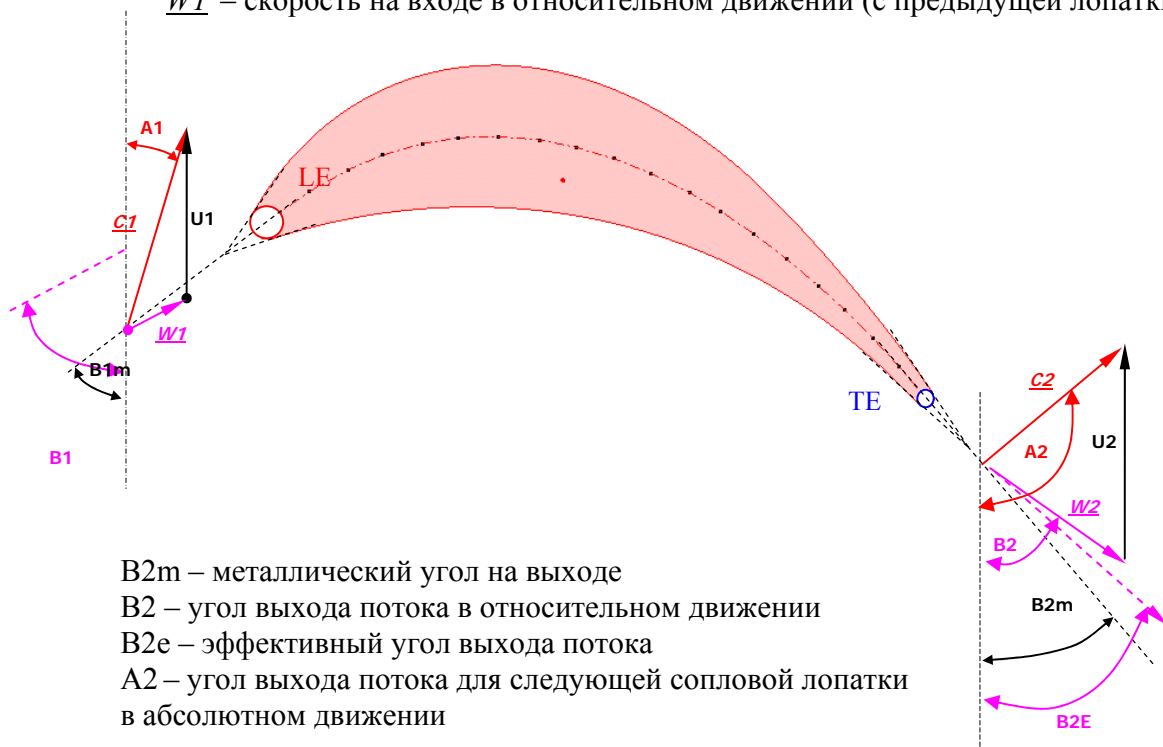
B1 – угол входа потока в относительном движении

A1 – угол выхода потока с предыдущей сопловой лопатки в абсолютном движении

$\underline{U1}$ – окружная скорость на входной кромке

$\underline{C1}$ – абсолютная скорость на входе

$\underline{W1}$ – скорость на входе в относительном движении (с предыдущей лопатки)



B2m – металлический угол на выходе

B2 – угол выхода потока в относительном движении

B2e – эффективный угол выхода потока

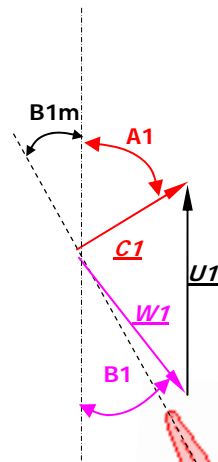
A2 – угол выхода потока для следующей сопловой лопатки в абсолютном движении

$\underline{U2}$ – окружная скорость на выходной кромке

$\underline{C2}$ – абсолютная скорость на выходе

$\underline{W2}$ – относительная скорость на выходе (для следующей лопатки)

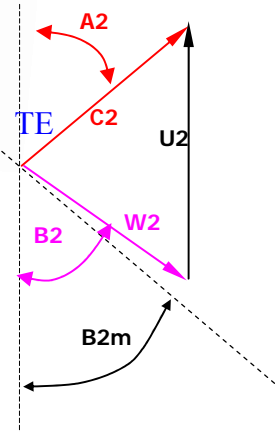
2.3 Рабочие лопатки компрессора



B1m – металлический угол на входе
 B1 – угол входа потока в относительном движении
 A1 – угол выхода потока из предыдущего направляющего аппарата в абсолютном движении

$\underline{U1}$ – окружная скорость на входной кромке
 $\underline{C1}$ – абсолютная скорость на входе
 $\underline{W1}$ – относительная скорость на входе (из предыдущего направляющего аппарата)

LE



B2m – металлический угол на выходе
 B2 – угол выхода потока в относительном движении
 A2 – угол выхода потока для следующего направляющего аппарата в абсолютном движении

$\underline{U2}$ – окружная скорость на выходной кромке
 $\underline{C2}$ – абсолютная скорость на выходе
 $\underline{W2}$ – относительная скорость на выходе (для следующей лопатки)

2.4 Направляющие лопатки компрессора

$A3m$ – металлический угол на выходе

$A3$ – угол выхода потока в абсолютном движении

$B3$ – угол выхода потока в относительном движении для следующей лопатки

$U3$ – окружная скорость на выходной кромке

$C3$ – абсолютная скорость на выходе

$W3$ – относительная скорость на выходе (для следующей лопатки)



$A2m$ – металлический угол на входе

$A2$ – угол выхода потока из предыдущей лопатки в абсолютном движении

$B2$ – угол выхода потока из предыдущей лопатки в относительном движении

$U0$ – окружная скорость на входной кромке

$C0$ – абсолютная скорость на входе

$W2$ – относительная скорость на входе (из предыдущей лопатки)

3 Окно профилирования AxSTREAM

3.1 Вызов окна профилирования

Профилирование плоских решеток профилей вызывается кнопкой **Профилирование** панели инструментов окна **Проект** или из главного меню командой **Задачи->Профиль**.

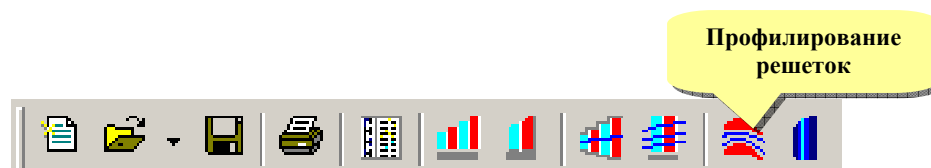


Рисунок 3. Вызов профилирования плоских решеток

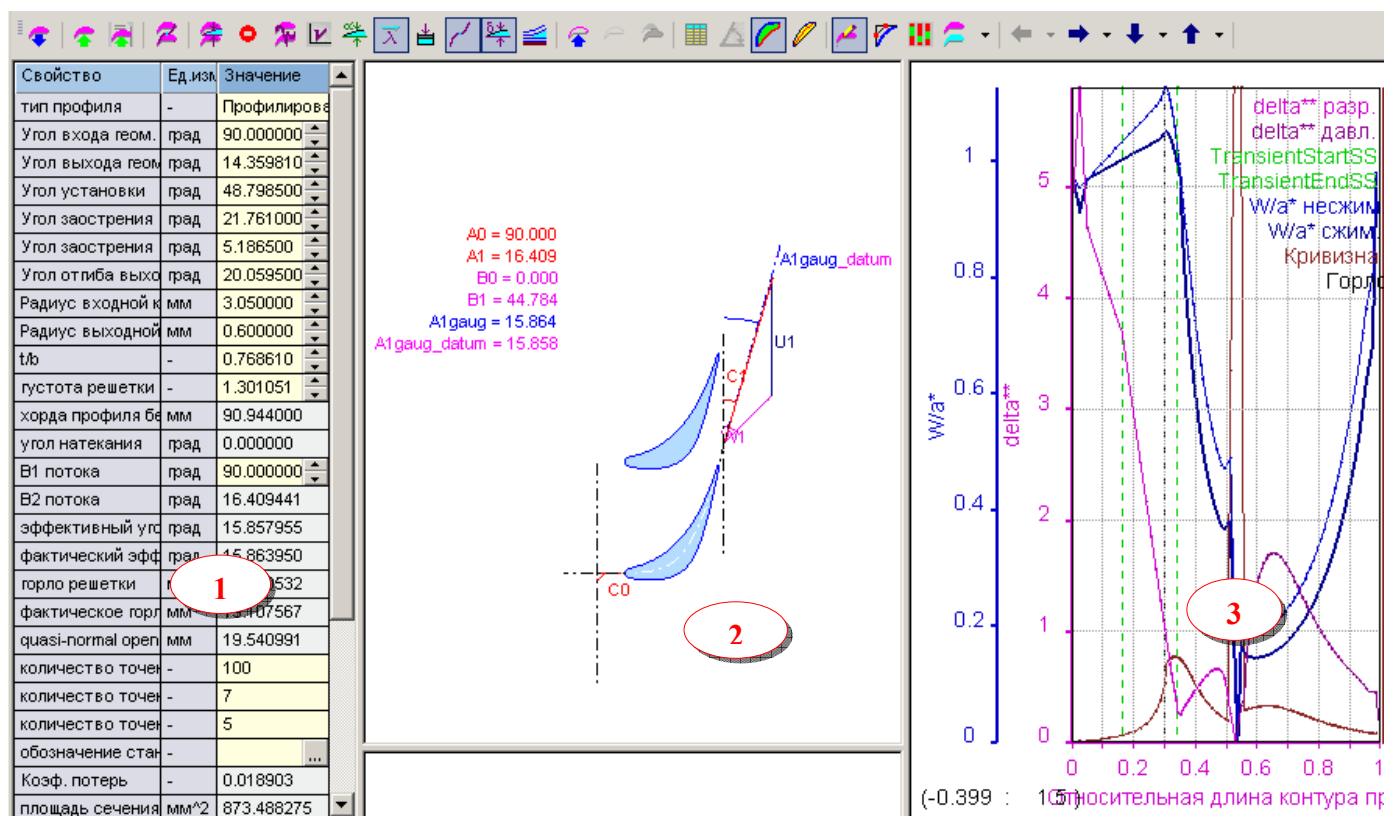


Рисунок 4. Окно профилирования AxSTREAM

Окно профилирования состоит из:

1. Таблицы свойств решётки.
2. Отображения внешнего вида профиля.
3. Панели графиков потенциального обтекания.

3.2 Панель окна профилирования:

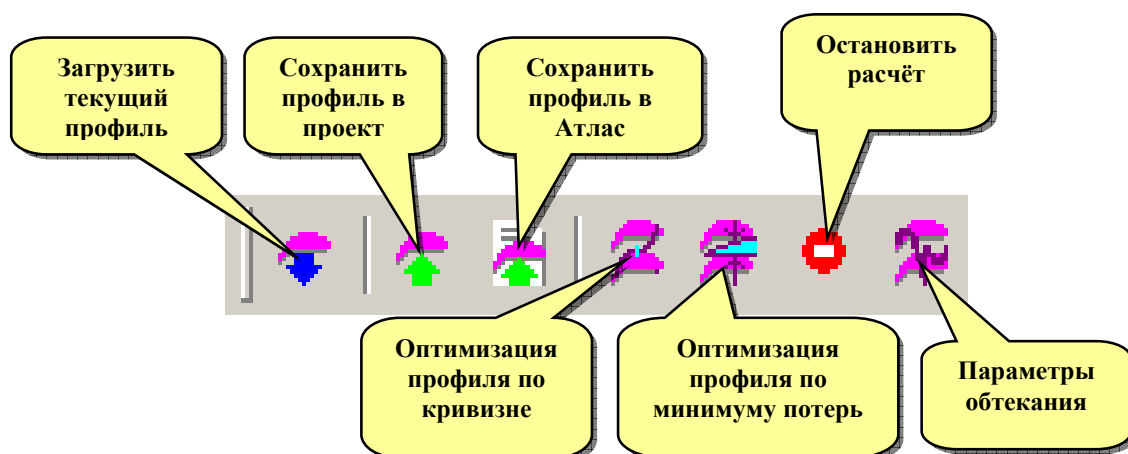


Рисунок 5. Кнопки сохранения/загрузки и оптимизации в окне профилирования

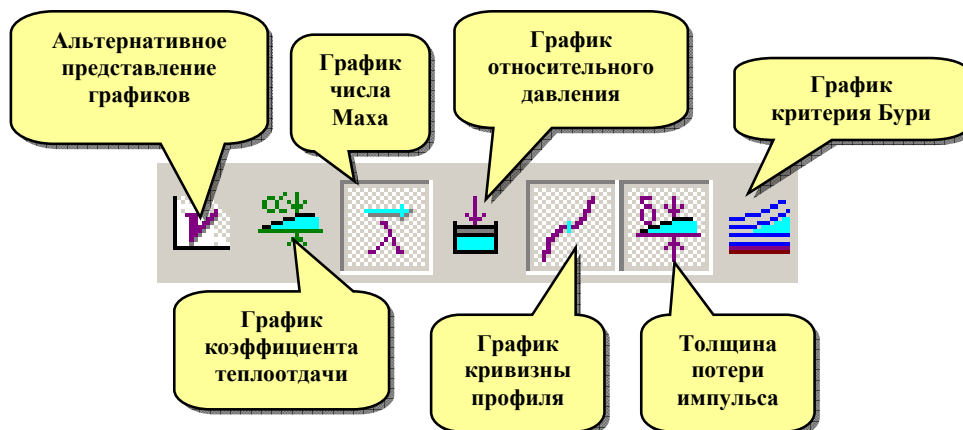


Рисунок 6. Кнопки отображения графиков в окне профилирования



Рисунок 7. Кнопки управления профилированием в окне профилирования

При открытии окно профилирования автоматически загружает профиль ступени/сечения (выбранные в дереве проекта). Если сечение не выбрано, только первая ступень будет загружена.

- **Загрузить текущий профиль** – система загружает ступень текущего сечения в локальную базу профилирования (все несохранённые изменения сбрасываются). Процедура профилирования работает с собственной копией параметров цилиндра, которая синхронизируется с основной базой проекта с помощью функций **Загрузить/Сохранить** профиль.
- **Сохранить профиль в проект** – значения свойств профиля данного сечения сохраняются из локальной базы в базу данных проекта. Таким образом, все изменения в профиле могут быть сохранены.
- **Сохранить профиль в Атлас** – профиль сохраняется во внешнюю базу данных – **АТЛАС**. Профили, сохранённые в Атлас, могут быть повторно использованы в других проектах.
- **Оптимизация профиля по кривизне** – запускается оптимизация формы профиля по критерию минимума кривизны.
- **Оптимизация профиля по минимуму потерь** – запускается оптимизация профиля по критерию минимума профильных потерь.
- **Остановить расчёт** – оптимизационный расчёт прерван.
- **Параметры обтекания** – определяются параметры потока, используемые как граничные условия для оптимизации профиля и отображения векторов скоростей.
- **Альтернативное представление графиков** – переключение отображения графиков между замкнутым видом (выходная кромка – входная кромка – выходная кромка) и поточным (входная кромка – выходная кромка).
- **Кнопки выбора графиков** – регулируется вывод графиков:
 - **График коэффициента теплоотдачи** – выводит график распределения коэффициента теплоотдачи вдоль контура профиля.
 - **График числа Маха** – выводит график распределения числа Маха по контуру профиля.
 - **График относительного давления** – выводит график распределения относительного давления по контуру профиля.
 - **График кривизны профиля** – выводит график распределения кривизны профиля по его контуру.
 - **График толщины потери импульса** – выводит график толщины потери импульса по контуру профиля.
 - **График критерия Бури** – выводит график критерия Бури, показывающий возможные места отрыва потока.
- **Сохранение профиля как фоновое** – система сохраняет профиль как базовый для дальнейшего сравнения с профилем, используемым в данный момент.
- **Отображение исходного профиля** – отображается загруженный извне профиль.
- **Отображение фонового профиля** – вкл./выкл. отображение фонового профиля
- **Импорт профиля** – система даёт возможность загрузить пользовательский профиль, заданный по точкам.
- **Режим измерения углов на импортированном профиле** – используется для проверки корректности распознавания углов импортированного профиля.



- **Профилирование по стороне давления/стороне разряжения** – переключает в режим профилирования по стороне давления/стороне разряжения.
- **Профилирование средней линии** – переключает в режим профилирования по средней линии.
- **Режим редактирования** – включается редактирование углов профиля; по умолчанию загруженный профиль доступен для редактирования. Если в выбранном сечении включён режим **Макромодели**, активация **режима редактирования** переключает профиль в режим **Профилирование**.
- **Редактирование сплайнов** – переключает в режим редактирования сплайнов по контрольным точкам.
- **Редактирование углов лопатки** – включается окно редактирования углов лопатки.
- **Изменить тип решётки** – позволяет переключаться между статором и ротором выбранной ступени.
- **Переключение между ступенями** – позволяет переходить на другие ступени.
- **Переключение между сечениями** – позволяет переходить на другие сечения выбранного венца.

3.3 Опция отображения профиля

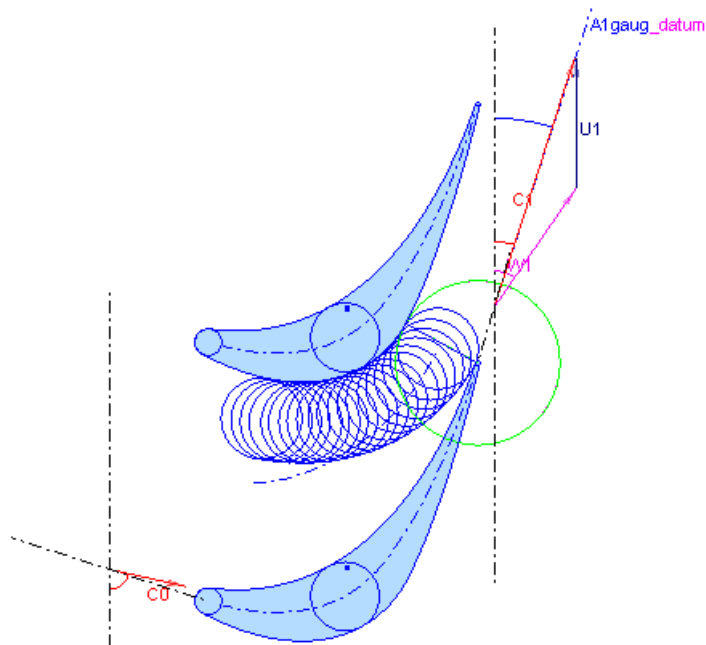
Опция отображения профиля выводит на экран форму профиля, потоковые и металлические углы, и множество вспомогательных построений для оценки формы профиля.

Отображение вспомогательных построений контролируется с помощью контекстного меню отображения профиля.

Контекстное меню отображения профиля.

Контекстное меню отображения профиля вызывается правой кнопкой мыши в окне отображения профиля.

A0 = 77.406
 A1 = 17.877
 B0 = 0.000
 B1 = 34.511
 A1gaug = 18.049
 A1gaug_datum = 18.042



	Контур профиля
	Заливка профиля
	Центр масс профиля
	Средняя линия профиля
	Окружности внутри профиля
	Поперечные линии профиля
	Горло канала
	Входная кромка
	Выходная кромка
	Максимальная толщина профиля
	Средняя линия канала
	Окружности в канале
	Поперечные линии канала
	Габаритный прямоугольник
	LE TE границы
	Скорости
	Линии построения

Рисунок 8. Окно отображения профиля с контекстным меню

3.4 Панель графиков потенциального обтекания

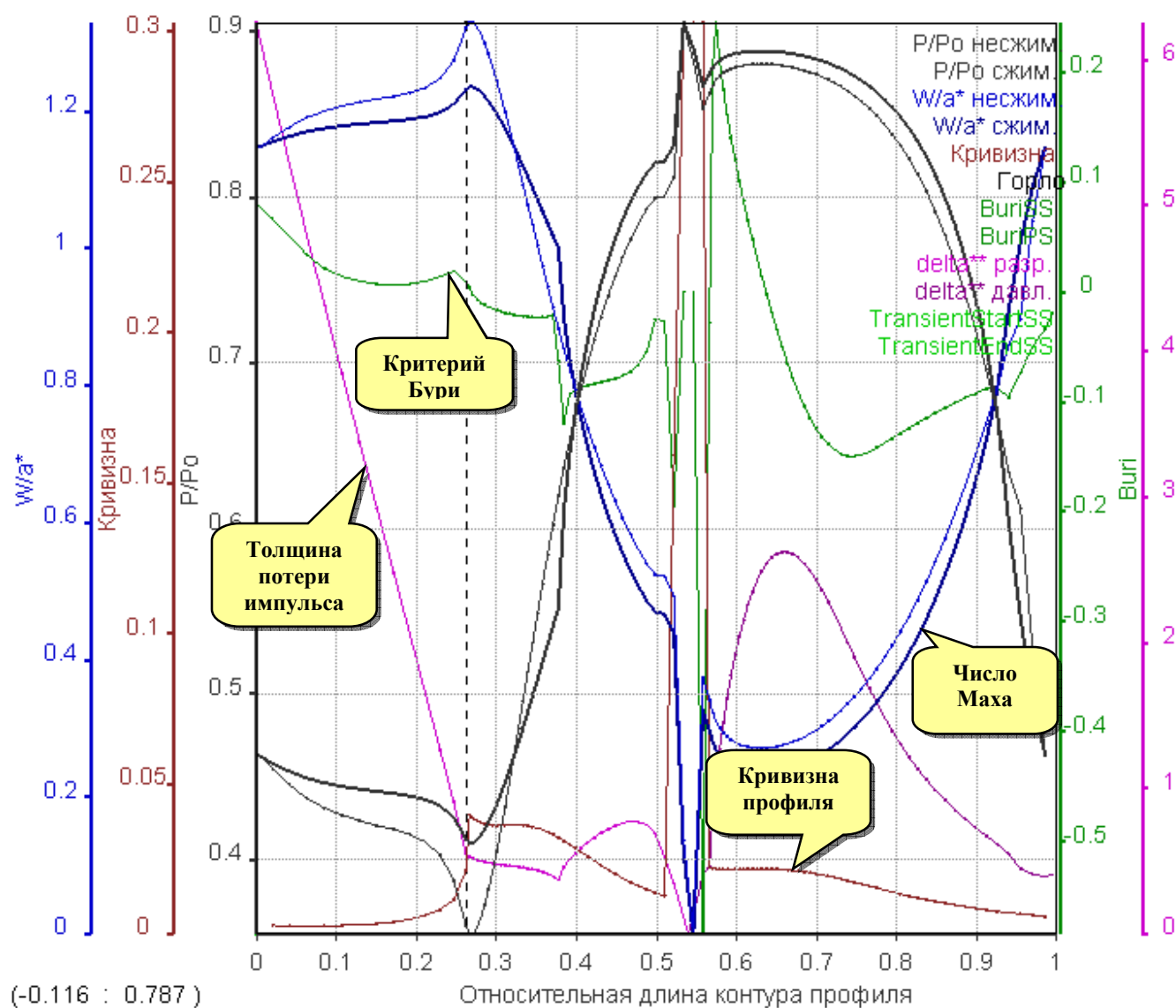


Рисунок 9. Отображение графиков в замкнутом виде (входная кромка – выходная кромка – входная кромка)

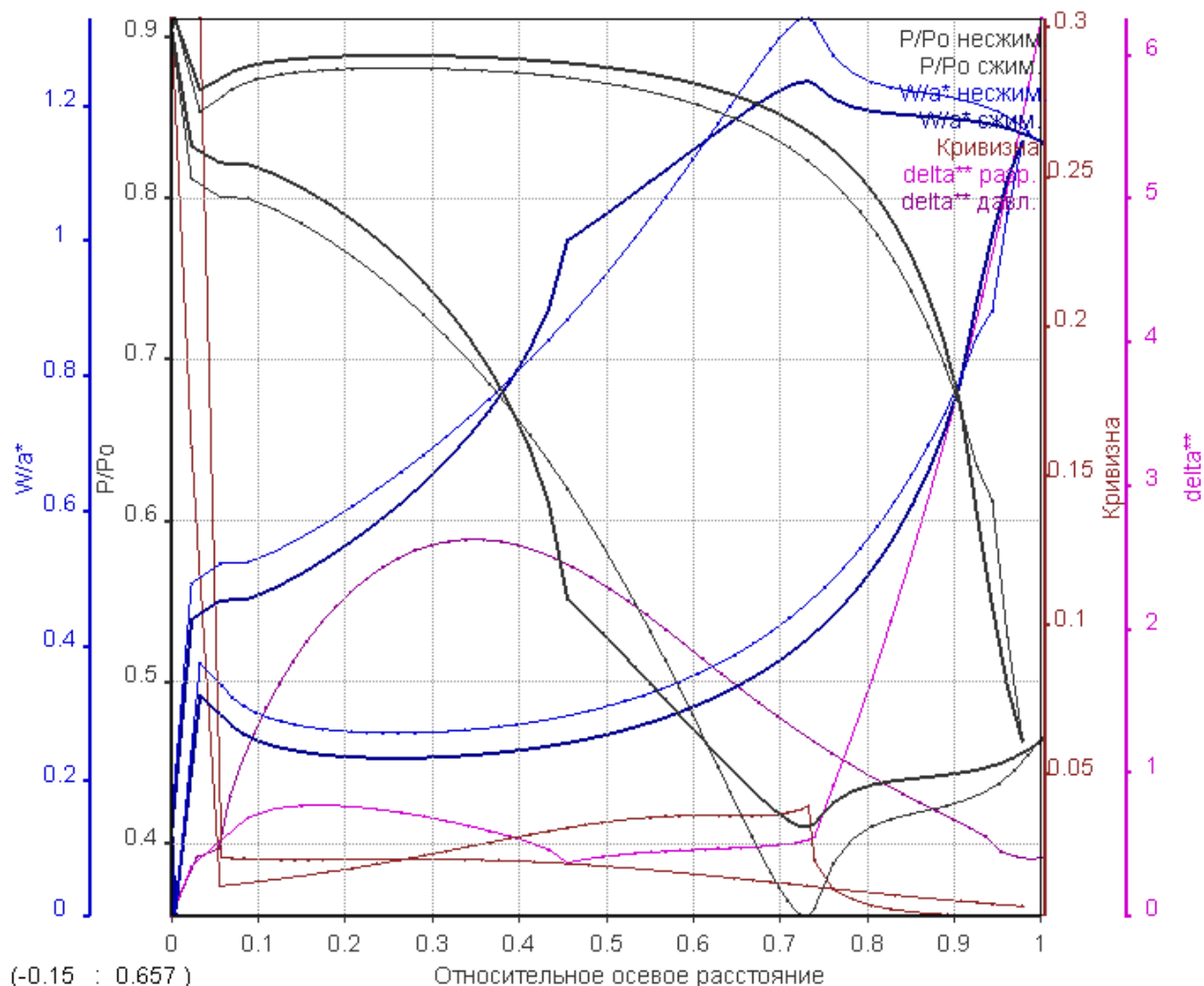


Рисунок 10. Отображение графиков в поточном виде (входная кромка – выходная кромка)

Кроме свойств, подробно отображённых в графиках, отображаются также вспомогательные величины. Местонахождение горла отображается вместе с графиком кривизны профиля, а также начало и окончание перехода ламинарного потока в турбулентный отображаются вместе с графиком толщины потери импульса.

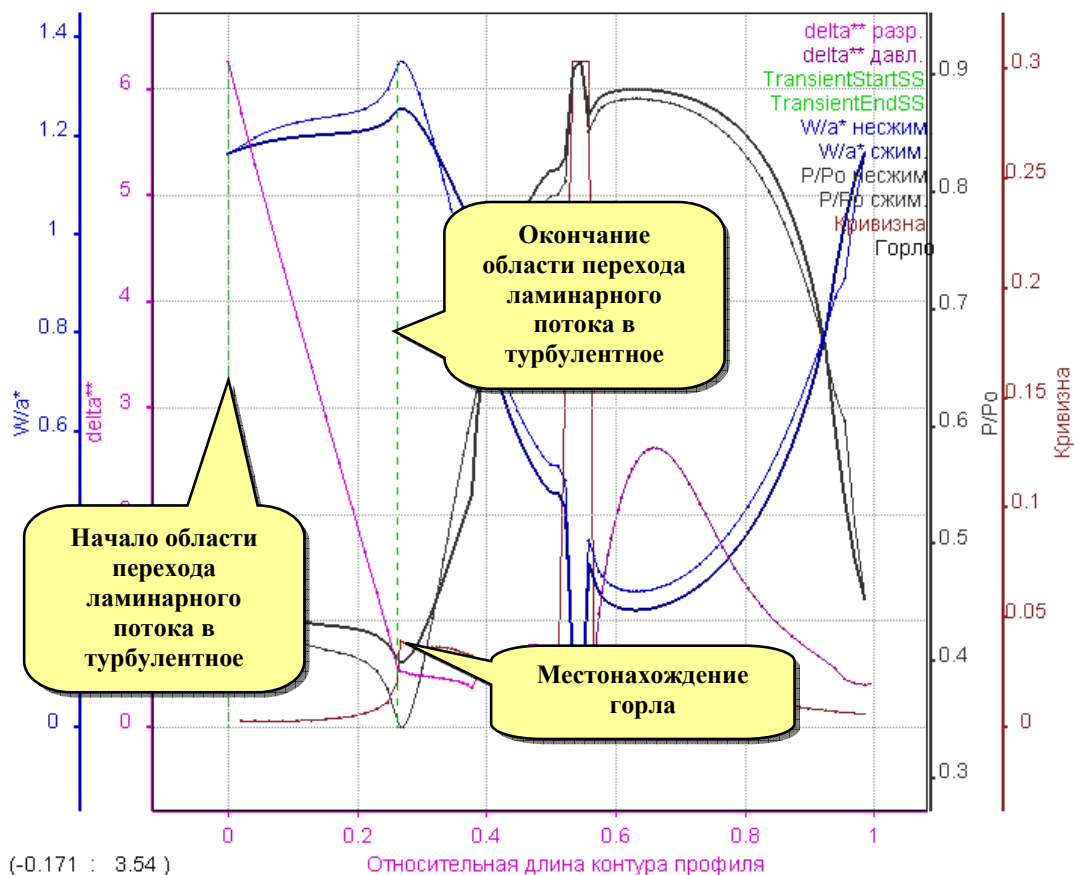


Рисунок 11. Вспомогательные величины, отображённые на панели графиков потенциального обтекания

4 Режим Профилирование в AxSTREAM

Существует два вида режима **Профилирования** в AxSTREAM:

- Профилирование по стороне давления/стороне разряжения;
- Профилирование средней линии.

4.1 Профилирование по стороне давления/стороне разряжения

Профилирование по стороне давления/стороне разряжения используется для активных и реактивных профилей. Этот вид профилирования сохраняет заданное раскрытие горла (эффективный угол выхода потока) и позволяет менять геометрию профиля при поиске минимума потерь, оставляя неизменным значение расхода.

Обратной стороной данной опции является то, что диапазон параметров профиля ограничен. Другими словами, не любая комбинация параметров сможет дать гладкое очертание профиля для заданных горла и густоты решётки. В этом случае AxSTREAM выводит искажённые профили.

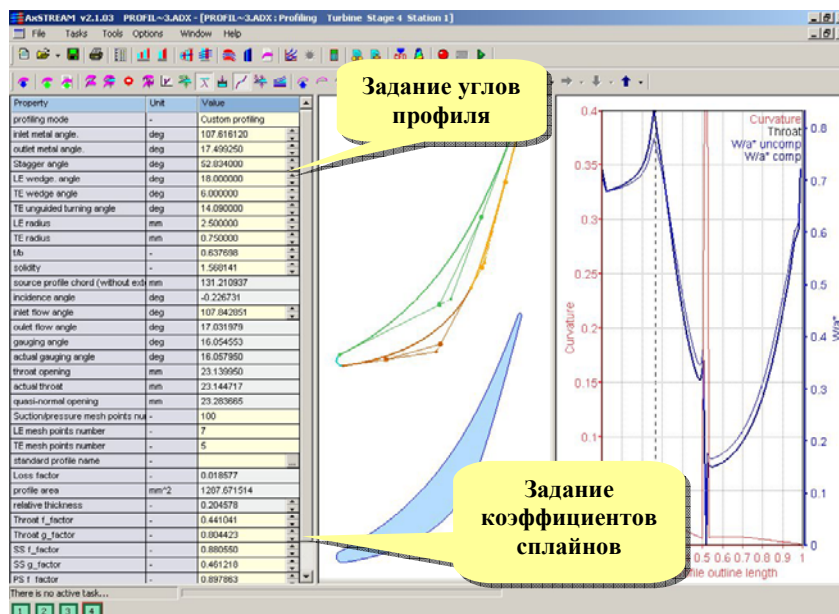


Рисунок 12. Окно профилирования в режиме профилирования по стороне давления/стороне разряжения

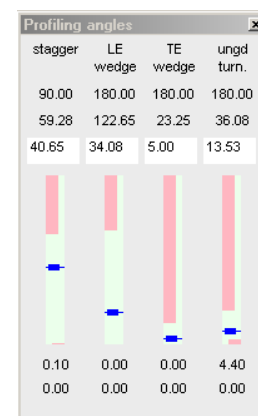


Рисунок 12.1 Панель редактирования углов лопатки

Форма профиля определяется набором углов

- Угол входа
- Угол выхода
- Угол заострения входной кромки
- Угол заострения выходной кромки
- Угол отгиба выходной кромки
- Угол установки

Значения углов могут устанавливаться непосредственно в таблице или с помощью движков на специальном окне.

В окне движков зеленые области обозначают допустимые значения углов. Красные – области не рекомендованных значений.

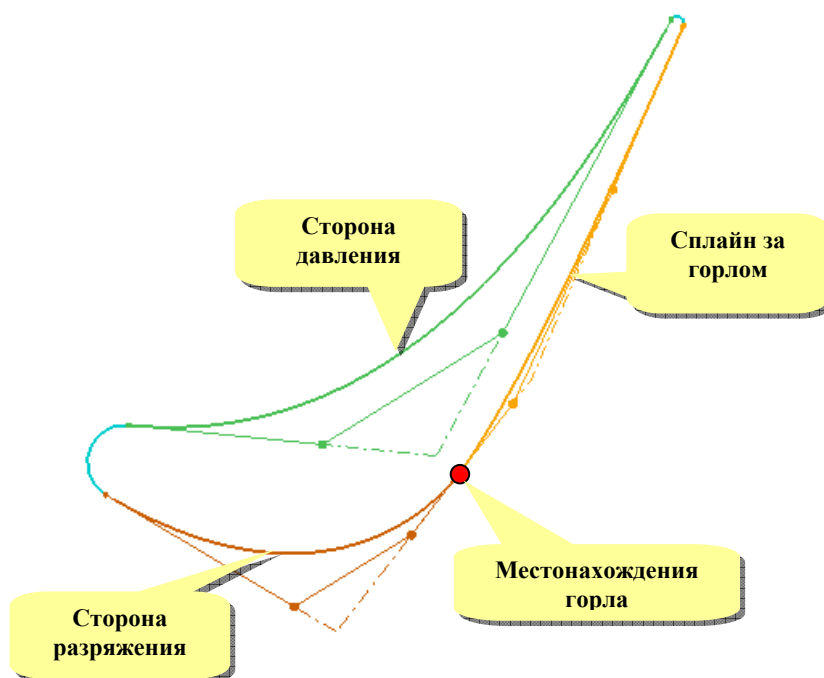


Рисунок 13. Построение профиля с помощью трёх сплайнов

В режиме профилирование по стороне давления / стороне разрежения форма профиля образуется тремя В-сплайнами

- Спллайн стороны давления (корытца)
- Спллайн стороны разрежения (спинки)
- Спллайн горла

AxSTREAM предоставляет возможность более тонкой регулировки формы – за счет изменения кривизны сплайнов при неизменных углах профиля.

Изменение кривизны сплайнов производится либо заданием значений коэффициентов сплайнов в таблице, либо перемещением контрольных точек сплайна в графическом окне.

4.2 Профилирование средней линии

Профилирование по срединной линии может быть использовано для реактивных (слабоизогнутых) профилей периферийных сечений.

Внимание:

В режиме профилирования *горло решетки (эффективный угол выхода)* изменяется.

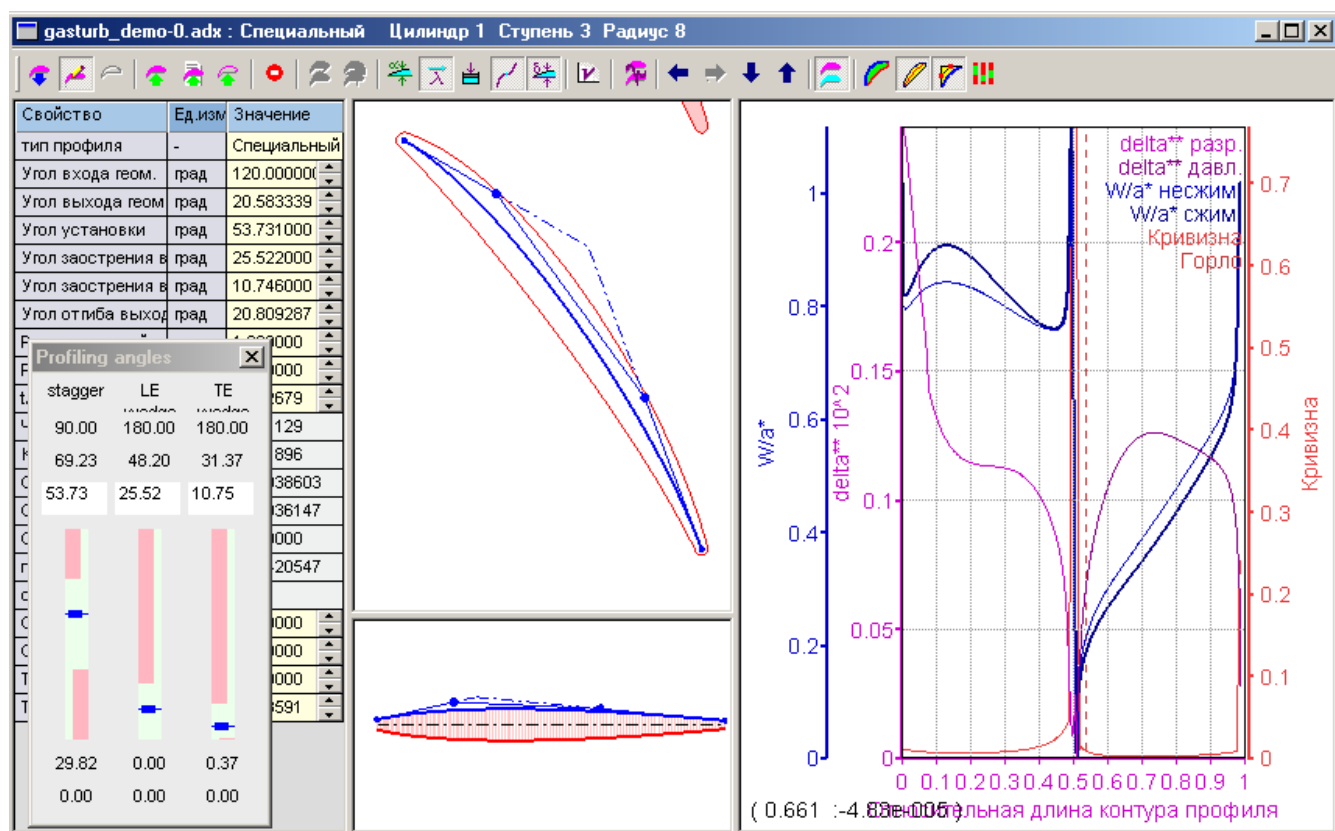


Рисунок 14. Окно профилирования в режиме профилирования средней линии

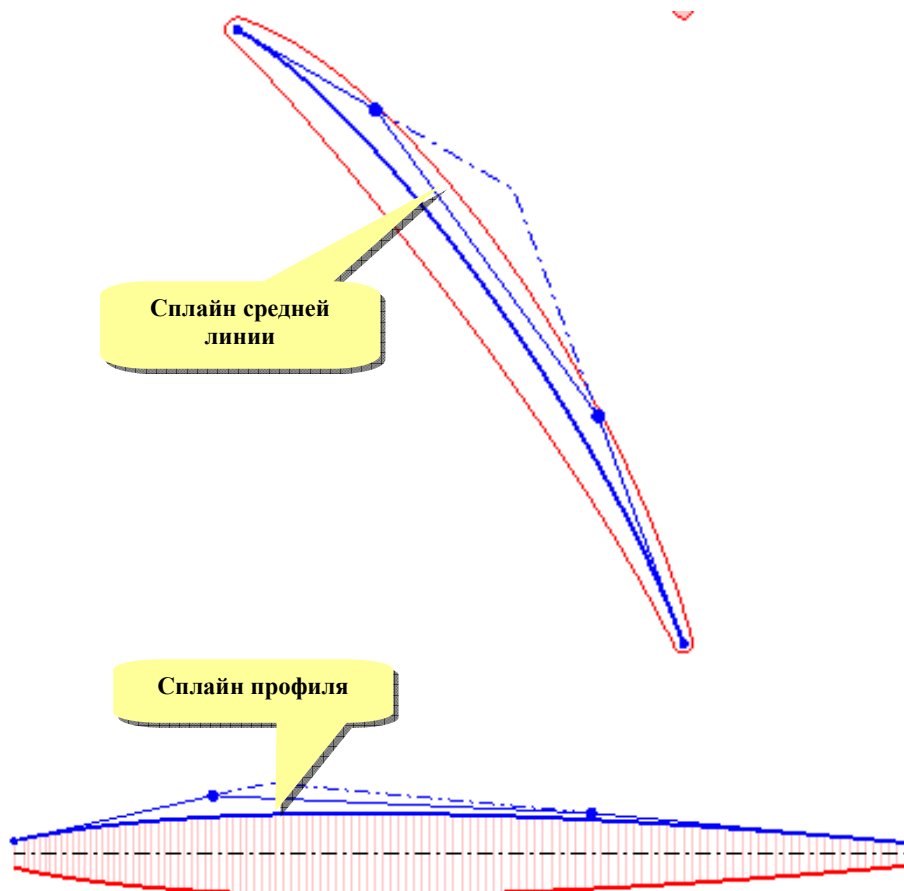


Рисунок 15. Формирование профиля двумя сплайнами

В режиме профилирование по срединной линии форма профиля образуется двумя В-сплайнами

- Сплайн срединной линии.
- Сплайн толщины

Сплайн толщины образует симметричный профиль, срединная линия, которого изгибается как сплайн (сплайн срединной линии).

AxSTREAM предоставляет возможность более тонкой регулировки формы за счет изменения кривизны сплайнов при неизменных углах профиля.

Изменение кривизны сплайнов производится либо заданием значений коэффициентов сплайнов в таблице, либо перемещением контрольных точек сплайна в графическом окне.

4.3 Задачи профилирования

4.3.1 Настройка углов

Несмотря на то, что профилирование в AxSTREAM (по стороне давления/стороне разряжения) сохраняет горло (эффективный угол выхода потока) реальный плоский профиль может вызывать отклонение углов от значений, определённых для теплового расчёта (эффективных углов выхода потока).

Модуль профилирования в AxSTREAM обеспечивает расчёт потенциального обтекания и определяет действительные углы выхода потока

Эта возможность AxSTREAM даёт пользователю уникальную возможность изменить форму профиля так, чтобы совпали действительный и эффективный углы выхода потока.

A0 = 72.731
A1 = 25.307
B1 = 52.748
A1gaug = 23.679

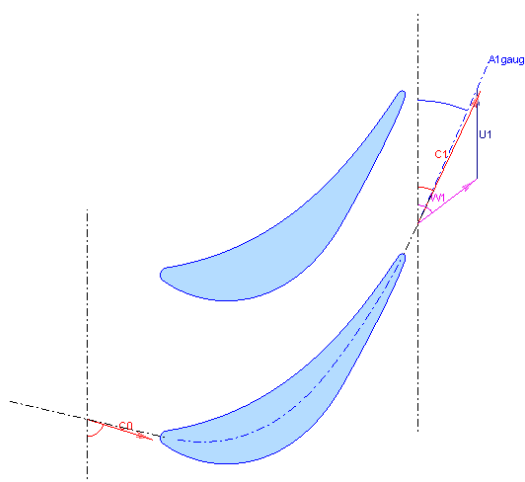


Рисунок 16. Угол выхода потока A1 отличается от эффективного на 7,2%

A0 = 72.731
A1 = 23.588
B1 = 52.748
A1gaug = 23.679

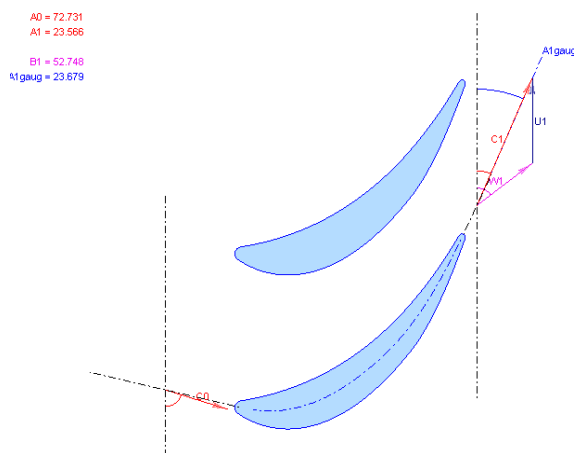


Рисунок 16.1 Изменённый профиль. Угол выхода потока A1 отличается от эффективного на 0,4%

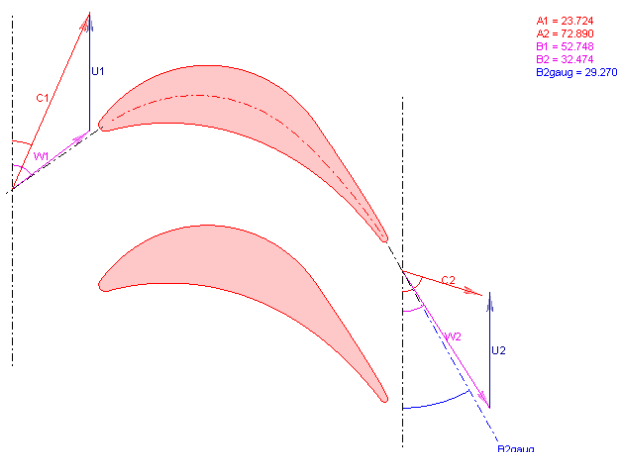


Рисунок 17. Угол выхода потока B1 отличается от эффективного на 10%

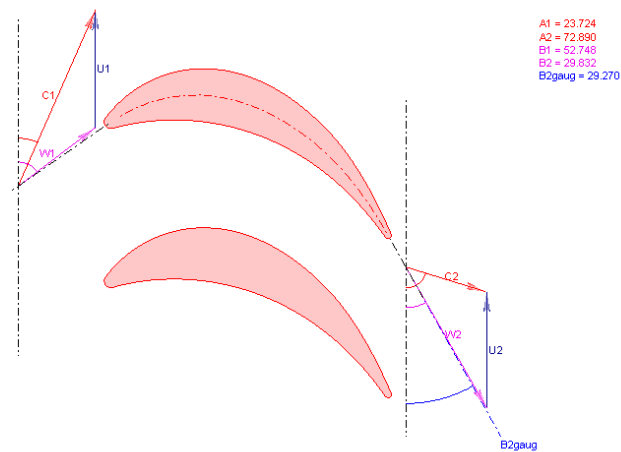


Рисунок 17.1 Изменённый профиль. Угол выхода потока A1 отличается от эффективного на 1,5%

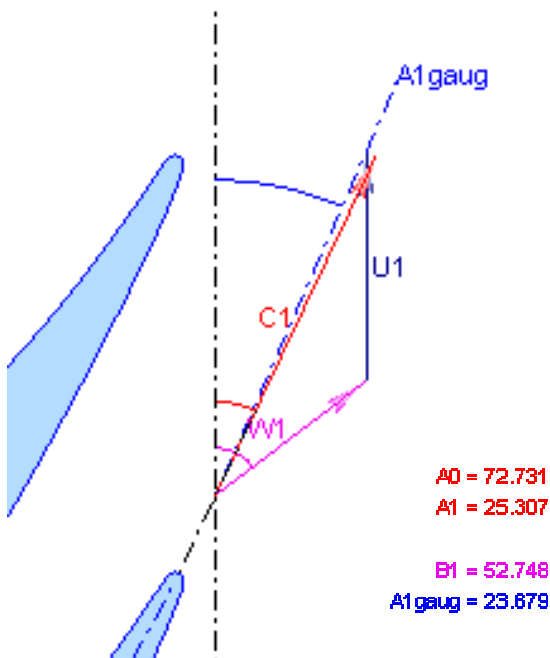


Рисунок 18. Треугольники скоростей на выходной кромке статора

Для статора AxSTREAM отображает действительное направление вектора абсолютной скорости $C1$ из расчета потока, но $W1$ и $U1$ выводятся в предположении, что $A1$ будет равен эффективному углу. Поэтому треугольник скоростей оказывается незамкнутым в случае заметного отличия угла выхода потока $A1$ от эффективного угла.

Задачей профилирования лопатки статора является изменение углов заострения и отгиба выходной кромки для совмещения $A1$ с $A1$ эффективным.

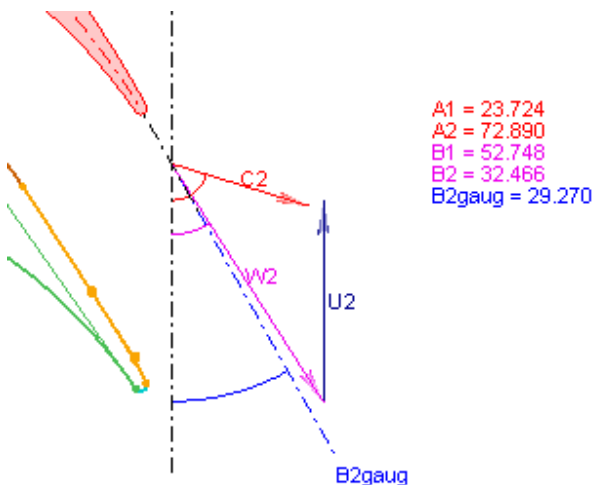


Рисунок 19. Треугольники скоростей на выходной кромке ротора.

Для ротора AxSTREAM отображает действительное значение вектора относительной скорости $W2$ из расчёта потока, но $C2$ и $U2$ отображаются в предположении, что $B2$ будет равен эффективному углу. Поэтому треугольник скоростей отображается незамкнутым в случае заметного отличия угла выхода потока $B1$ от эффективного угла.

Задачей профилирования лопатки ротора является изменение углов заострения и отгиба выходной кромки для совмещения $B2$ с $B2$ эффективным углом.

4.3.2 Аэродинамический критерий Бури

Расчёт течения в AxSTREAM предоставляет отображение графиков в реальном времени. Эта опция AxSTREAM делает возможным редактирование профилей в интерактивном режиме с мгновенным автоматическим пересчётом графиков.

Наряду с графиками распределения давлений и скоростей, AxSTREAM отображает расчет критерия безотрывного течения Бури. Вместе с давлениями и скоростями критерий Бури позволяет предсказать аэродинамические характеристики профиля.

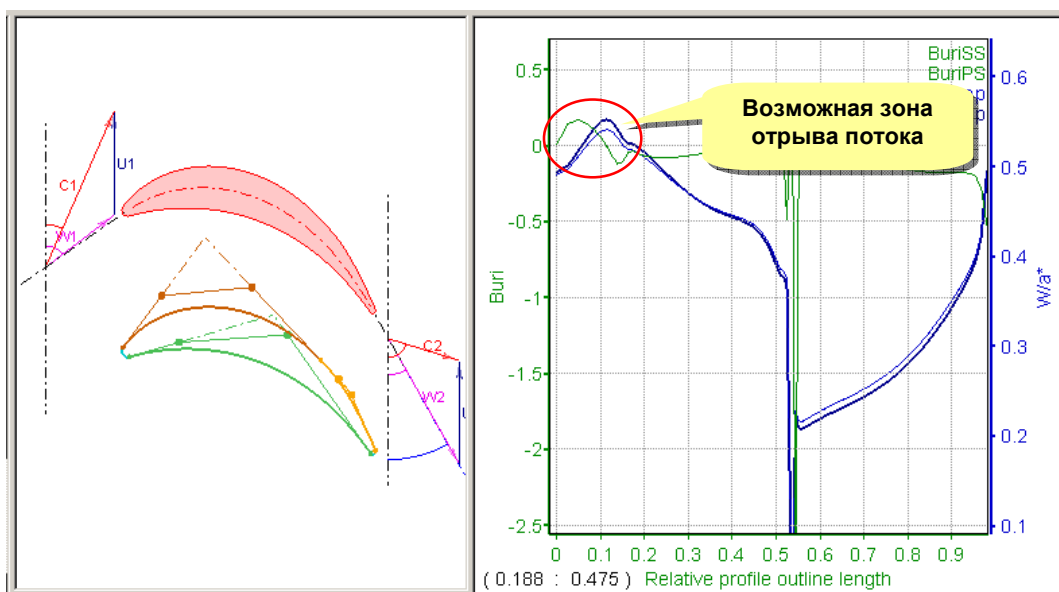


Рисунок 20. Возможный отрыв потока на стороне разряжения возле выходной кромки

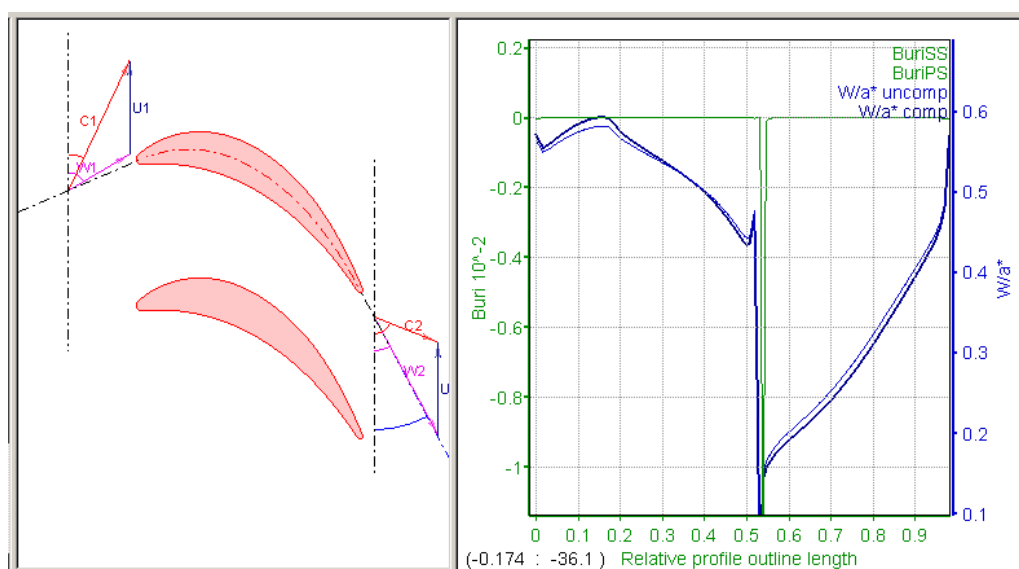


Рисунок 21. Срыв потока на профиле отсутствует

4.4 Расчеты обтекания решеток и пограничного слоя на профилях.

AxSTREAM обеспечивает расчет обтекания и оценку профильных потерь решетки в реальном масштабе времени.

При расчетах дозвуковых течений идеальной жидкости в плоских решетках широкое распространение получил подход, основанный на сведении системы уравнений в частных производных к интегральному уравнению Фредгольма 1-го или 2-го рода.

Имеющиеся численные реализации решения этих уравнений сталкиваются с рядом проблем, не позволяющих с достаточной степенью надежности или точности рассчитывать решетки произвольной конфигурации. Например, долгое время использовавшийся метод расчета сводился к решению интегрального уравнения второго рода относительно потенциала скорости. Он позволил решить ряд важных практических задач оптимизации решеток, однако имел важные недостатки: сложность нормирования ядра интегрального уравнения вызывала трудности при расчетах тонких и сильно изогнутых профилей, а необходимость численной дифференциации вычисленных потенциалов привносила дополнительную погрешность в эпюру скоростей обтекания. Позднее был разработан метод численного расчета потенциального обтекания плоских решеток профилей идеальным газом с приближенным учетом сжимаемости, основанный на решении уравнения Фредгольма 2-го рода относительно скорости на обтекаемой поверхности.

Определение потерь трения на профиле осуществляется путем расчета сжимаемых ламинарного, переходного и турбулентного пограничных слоев на основании однопараметрического метода Лойцянского.

Для повышения точности получаемых результатов на основании рекомендаций, приведенных в литературе, производится расчет точек потери устойчивости и конца перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный, в зависимости от продольного градиента давления, степени турбулентности набегающего потока и степени шероховатости поверхности профиля.

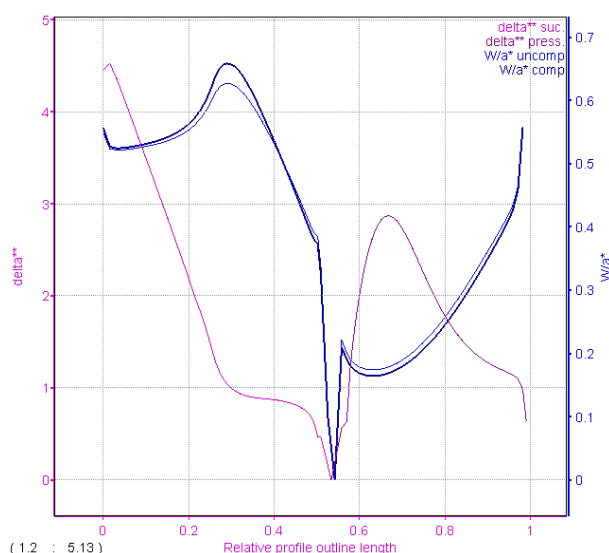


Рисунок 22. Эпюра распределения скорости и толщины потери импульса по обводу профиля

Разработанные алгоритмы расчета течения идеальной жидкости в решетке и пограничного слоя на поверхности профиля дают хорошее качественное и количественное совпадение расчетных и экспериментальных данных для различных типов решеток, при различных углах натекания, относительных шагах, числах Маха и Рейнольдса, переходе ламинарного пограничного слоя в турбулентный, в зависимости от продольного градиента давления, степени турбулентности набегающего потока и степени шероховатости поверхности профиля.

4.4.1 Оптимизация решетки профилей по геометрическому критерию качества

AxSTREAM обеспечивает оптимизацию профилей сечений по критерию минимума максимальной кривизны спинки и корытца.

Оптимизация профилей сечений по критерию минимума максимальной кривизны предполагает построения профиля с $\max |k| \rightarrow \min$,

$$k = \frac{y''}{[1 + (y')^2]^{3/2}} \quad \text{— кривизна контура профиля.}$$

Кривизна в каждой точке профиля может быть найдена аналитически для каждого из составляющих его сегментов, являющимися либо окружностями, либо кривыми Безье. Максимум кривизны на спинке и корытце профиля находится перебором ее значений в точках профиля, количество которых по участкам можно варьировать.

Очевидно, что соотношение кривизны спинки и корытца влияет на форму межлопаточного канала, качество которого в конечном итоге и определяет аэродинамическое совершенство решетки.

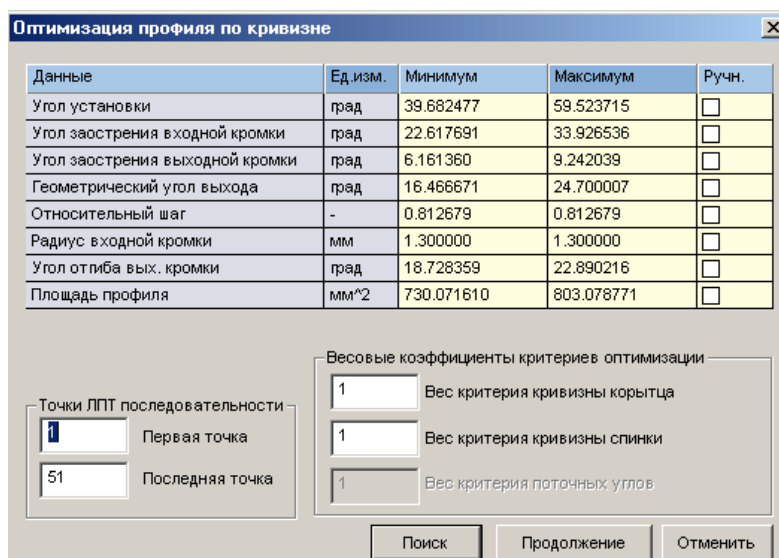
Поэтому целесообразно вместо критерия (6.4) использовать его обобщение

$$(a \max |k_c| + b \max |k_k|) \rightarrow \min,$$

где a, b – весовые коэффициенты.

Согласно нашему опыту проектирования, удовлетворительная конфигурация канала для реактивных решеток получалась при $a=b=1$. Рекомендации по выбору весовых коэффициентов для решеток других типов могут быть выработаны на основании опыта эксплуатации программы.

Определение оптимального сочетания варьируемых параметров производится ЛП-поиском. Ввиду большей размерности вектора X (6) требуется, соответственно, и большее количество точек поиска.



Данные	Ед. изм.	Минимум	Максимум	Ручн.
Угол установки	град	39.682477	59.523715	<input type="checkbox"/>
Угол заострения входной кромки	град	22.617691	33.926536	<input type="checkbox"/>
Угол заострения выходной кромки	град	6.161360	9.242039	<input type="checkbox"/>
Геометрический угол выхода	град	16.466671	24.700007	<input type="checkbox"/>
Относительный шаг	-	0.812679	0.812679	<input type="checkbox"/>
Радиус входной кромки	мм	1.300000	1.300000	<input type="checkbox"/>
Угол отгиба вых. кромки	град	18.728359	22.890216	<input type="checkbox"/>
Площадь профиля	мм²	730.071610	803.078771	<input type="checkbox"/>

Точки ЛПТ последовательности

1 Первая точка

51 Последняя точка

Весовые коэффициенты критериев оптимизации

1 Вес критерия кривизны корытца

1 Вес критерия кривизны спинки

1 Вес критерия поточных углов

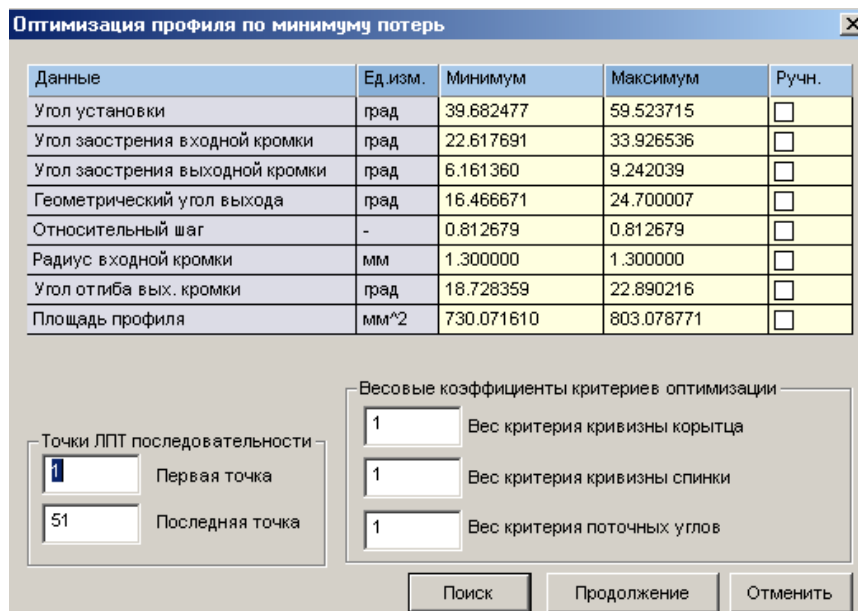
Поиск Продолжение Отменить

Рисунок 23. Диалог оптимизации по геометрическому критерию

4.4.2 Оптимизация по минимуму профильных потерь

При оптимизации по минимуму профильных потерь в качестве функции цели берется минимум профильных потерь в плоской решетке. Потери определяются на основании обтекания и расчета смешанного пограничного слоя на профиле.

Последовательность поиска оптимального сочетания варьируемых параметров та же, что и для оптимизации по критерию минимума максимальной кривизны.



Данные	Ед. изм.	Минимум	Максимум	Ручн.
Угол установки	град	39.682477	59.523715	<input type="checkbox"/>
Угол заострения входной кромки	град	22.617691	33.926536	<input type="checkbox"/>
Угол заострения выходной кромки	град	6.161360	9.242039	<input type="checkbox"/>
Геометрический угол выхода	град	16.466671	24.700007	<input type="checkbox"/>
Относительный шаг	-	0.812679	0.812679	<input type="checkbox"/>
Радиус входной кромки	мм	1.300000	1.300000	<input type="checkbox"/>
Угол отгиба вых. кромки	град	18.728359	22.890216	<input type="checkbox"/>
Площадь профиля	мм²	730.071610	803.078771	<input type="checkbox"/>

Точки ЛПТ последовательности

1 Первая точка

51 Последняя точка

Весовые коэффициенты критериев оптимизации

1 Вес критерия кривизны корытца

1 Вес критерия кривизны спинки

1 Вес критерия поточных углов

Поиск Продолжение Отменить

Рисунок 24. Диалог оптимизации по минимуму профильных потерь

4.5 Профилирование с заданными профилями

AxSTREAM позволяет использовать ранее созданные профили. Один из способов – это использование профилей, хранящихся в базе данных **АТЛАС**. Второй – импортирование внешнего профиля непосредственно в плоское сечение.

4.5.1 Использование стандартных (атласных) профилей

AxSTREAM предоставляет возможность использования баз (атласов) стандартных профилей при проектировании лопаток. В атласах могут храниться стандартизованные у пользователя профили, а также профили, которые нельзя построить средствами профилирования в AxSTREAM (профили с вытеснителем).

Стандартный профиль может быть задан для любого сечения. Для вставки стандартного профиля необходимо в окне *Проект* выбрать вариант *Стандартный* в поле *тип профиля* таблиц *Сопловая решетка* или *Рабочая решетка*, затем выбрать тип стандартного профиля из доступных баз профилей.

При вставке профиля из АТЛАСА (заданного точками или радиусами) происходит следующее :

- Если профиль задан радиусами, то дуги переводятся в точки.
- Производится определение углов по точечному представлению профиля.
- Вычисляется новый угол установки, обеспечивающий требуемый эффективный угол выхода.
- Вычисляются геометрические характеристики в новом установленном положении.
- Для расчета обтекания и создания 3Д модели используются точки из АТЛАСА, повернутые до нового угла установки.

После того как профиль вызван из атласа и перед тем как он будет применён к сечению, он масштабируется для совпадения с исходной хордой и подстраивается, в зависимости от типа решётки. Для профилирования по стороне давления/стороне разряжения подходит как **подгонка под эффективный угол**, так и **подгонка под угол установки**. Для ступеней турбины с профилированием по средней линии и компрессоров используется **режим подгонки по средней линии**.

Для того чтобы вставить профиль, необходимо указать его название в окне выбора стандартного профиля.

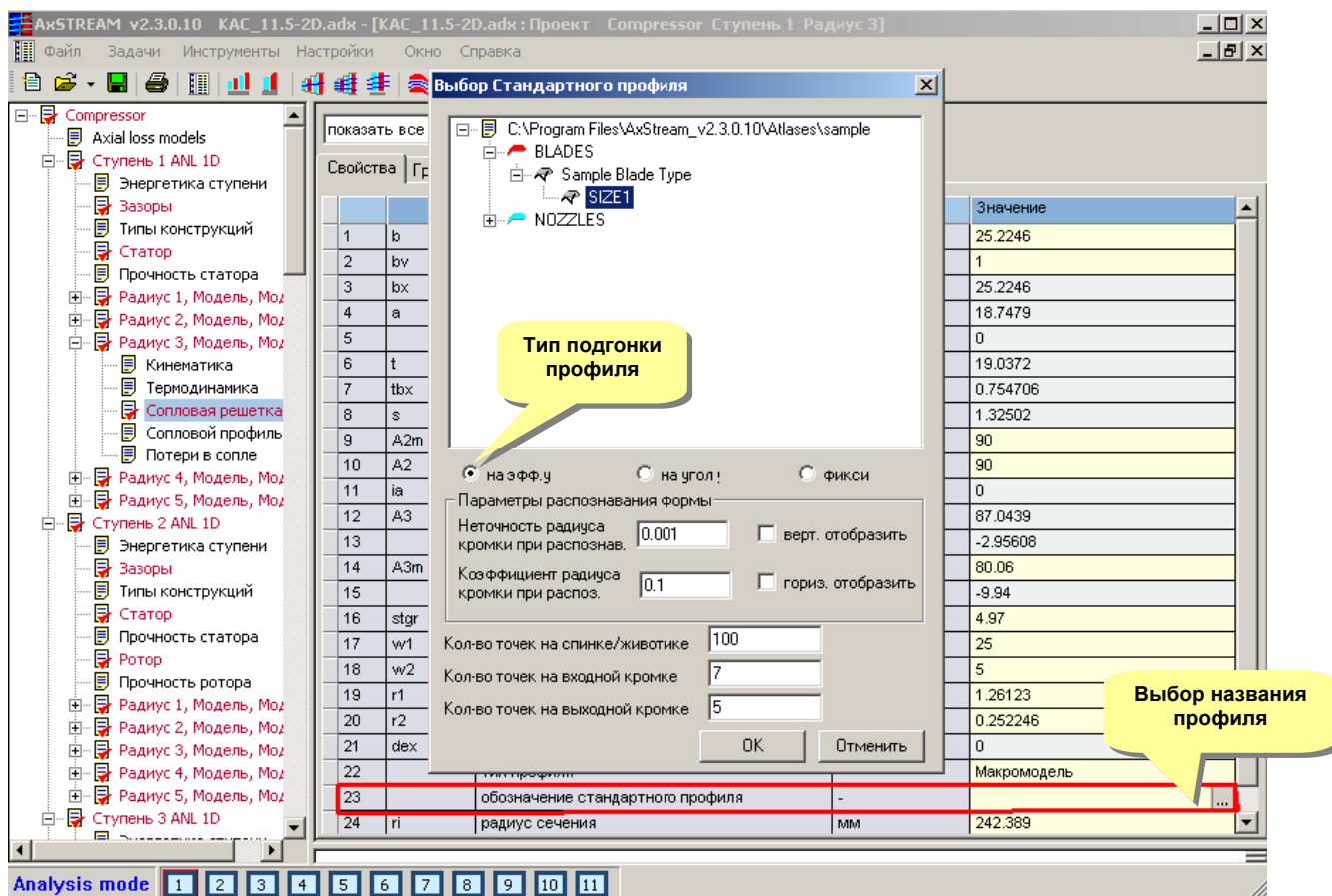


Рисунок 25. Выбор стандартного профиля в окне проекта

Кроме того, профиль можно выбрать в *окне профилирования*.

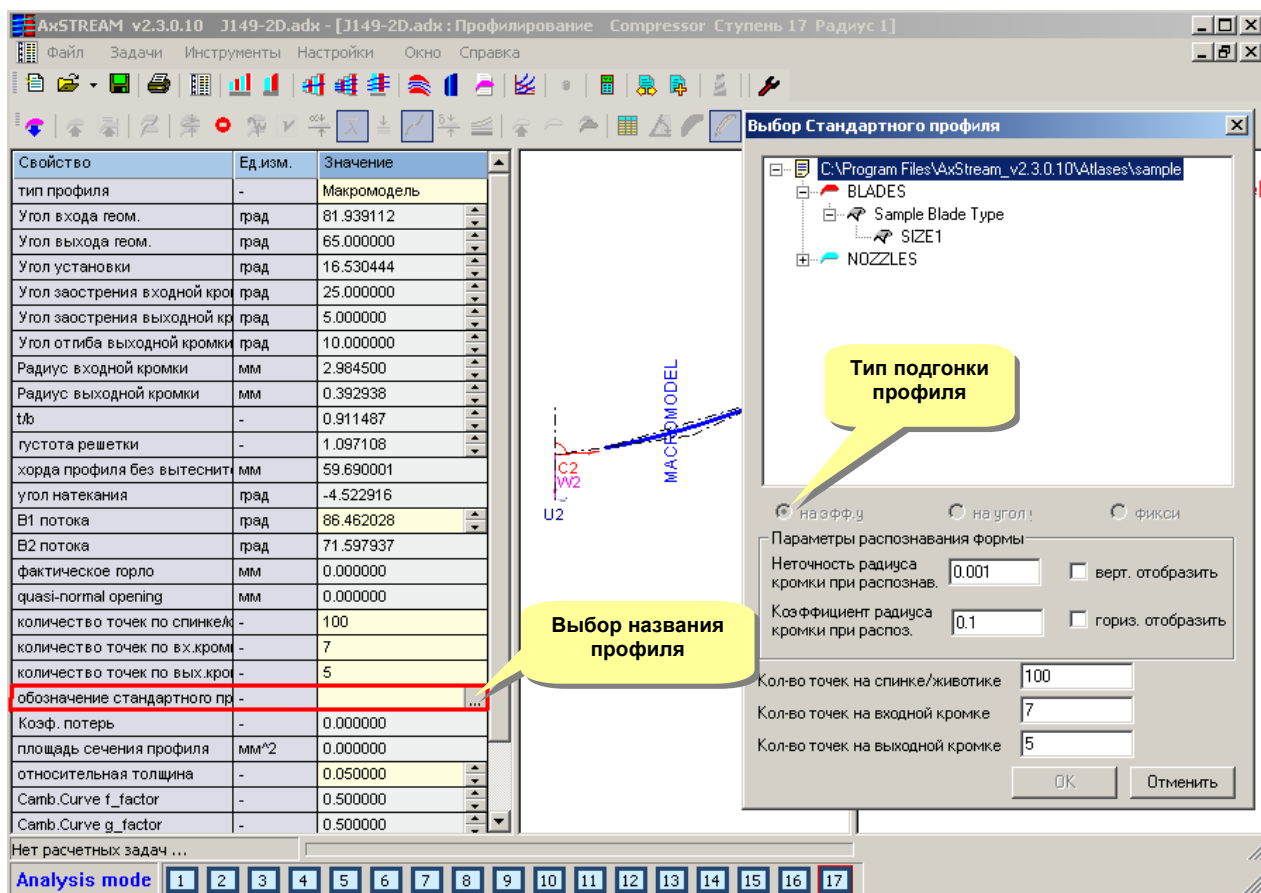


Рисунок 26. Выбор стандартного профиля для направляющего аппарата компрессора в окне профилирования

4.5.2 Импорт профиля извне

Дополнительная опция импорта внешнего профиля помогает использовать ранее зарекомендовавшие себя профили, а также сокращает время на подготовку данных для анализа.

AxSTREAM предлагает следующие возможности импорта профилей:

- импорт 3D геометрии лопатки с определением лопаточных углов и интерактивной регулировкой;
- импорт массива точек из таблиц Excel;
- сравнение двух видов одного и того же профиля и соответствующих им кривых линий тока;
- присвоение типа профиля **Фиксированный** для профилей, импортированных заодно с лопаткой.

4.5.3 Экспортирование и импортирование файлов IBL из программы ProE в AxSTREAM

Экспорт из AxSTREAM

Для экспорта файла из AxSTREAM в формат .ibl нужно выбрать **Файл > Экспортировать в > ProE IBL** (Рис. 27):

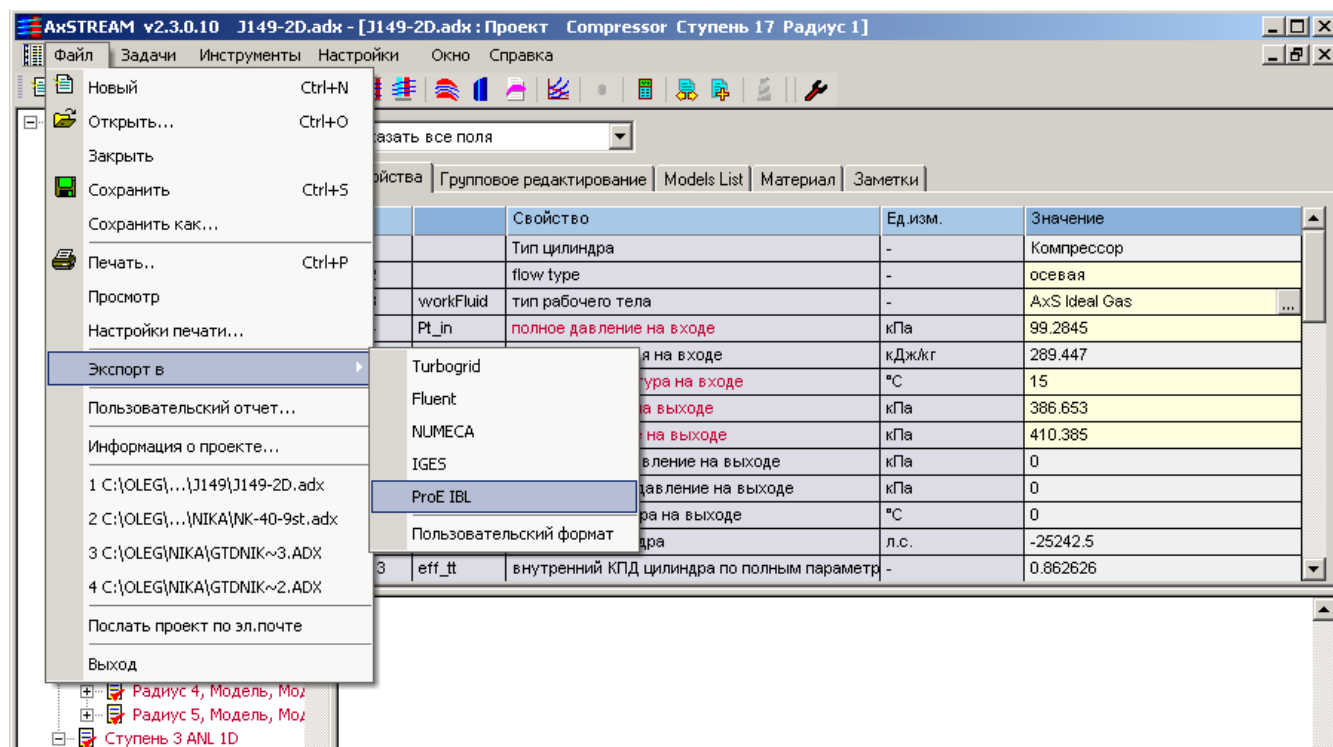


Рисунок 27. Экспорт геометрии в формат .ibl

После этого появляется окно, где пользователь может задать:

- Путь к папке, в которую он хочет сохранить экспортируемый файл;
- Вид экспорта: одна ступень (текущая в дереве проекта) или весь цилиндр.

При выборе функции **Экспортировать ступень** вверху окна будет отображён номер ступени, которая будет экспортирована.

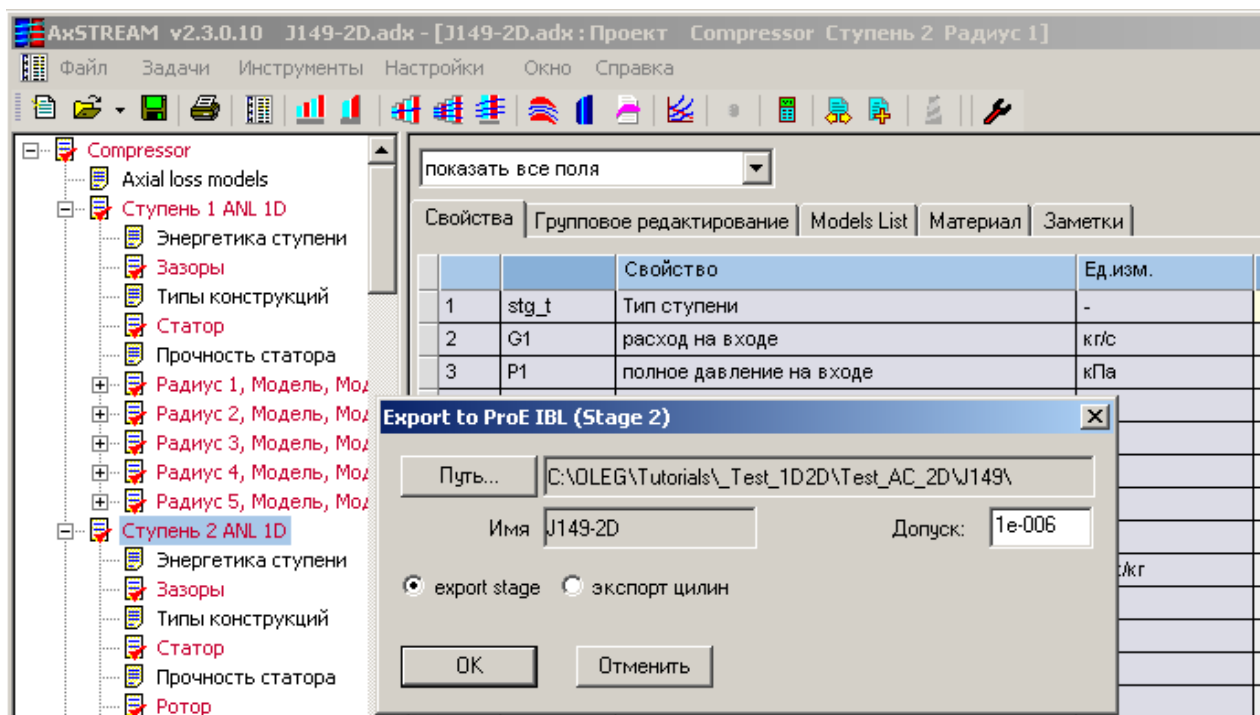


Рисунок 28. Окно экспорта ступени

Импорт в AxSTREAM

Ограничения для импорта

Существуют некоторые неизбежные ограничения для пакетного импорта из IBL формата:

1. Проект должен быть в режиме *Анализа*.
2. Зафиксированный порядок кривых в IBL файле: выходная кромка, сторона разряжения, входная кромка, сторона давления.
3. Кромки считаются цилиндрическими.
4. Количество сечений должно быть нечётным (иначе пакетный импорт прервётся).
5. Считается, что сечения равномерно распределены по высоте лопатки.
6. Сечения плоские, т.е. координата по оси Z одинаковая для всех точек.

Пакетный импорт

Для автоматического импорта отдельно статора или ротора конкретной ступени необходимо выбрать нужный элемент правой кнопкой мыши и нажать *Импорт из > IBL файл*.

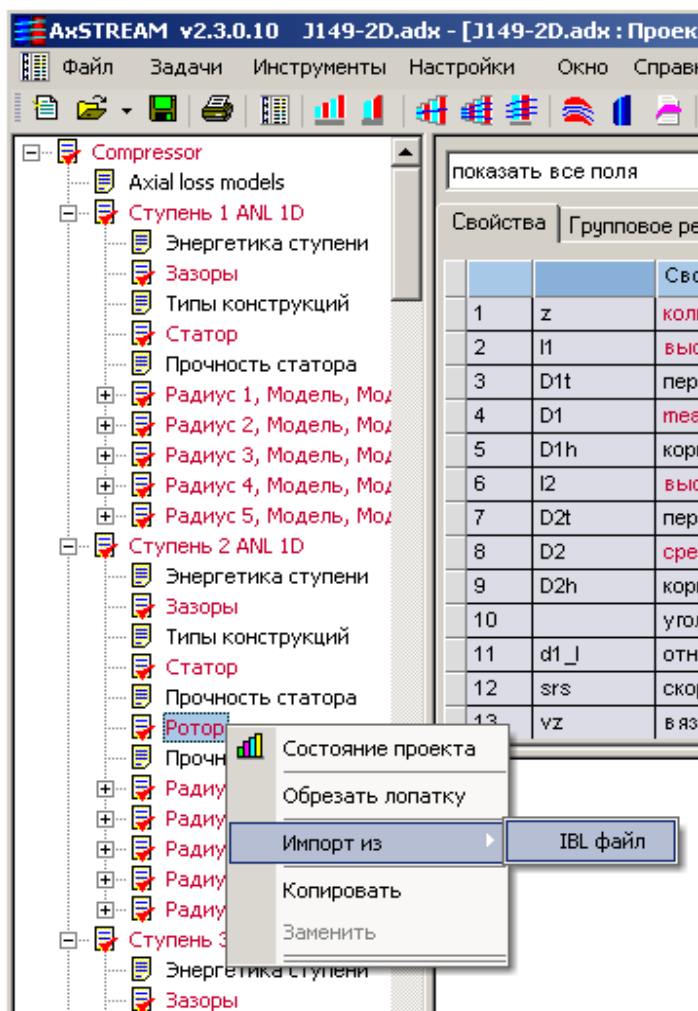


Рисунок 29. Импорт отдельного венца из .ibl файла

После этого необходимо выполнить следующее:

1. Нажмите *Искать* и выберите соответствующий данной проточной части элемент в формате .ibl. После этого в поле *Информ* отображается информация о загрузке файлов. Если загрузка завершена без ошибок, пользователь может продолжить импорт.
2. Выберите единицы измерения загружаемого файла.
3. Нажмите кнопку *Импортировать*.

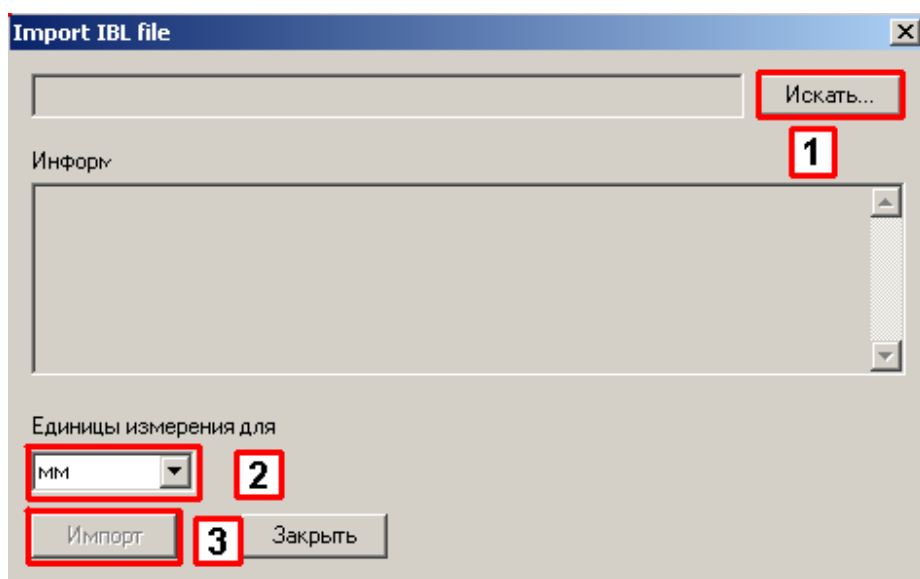


Рисунок 30. Окно импорта отдельного венца из .ibl файла

После окончания импорта пользователю следует перейти в режим *Профилирования* и проверить значения параметров.

Ручная загрузка сечений

Пользователь также может импортировать отдельные сечения из файла .ibl используя опцию импорта в режиме *Профилирование*. Перейдите в *Профилирование > Импорт профиля*.



Рисунок 31. Импорт отдельного сечения

В окне *Импорт профиля* сначала необходимо выбрать единицы измерения для импортируемого файла, вид подгонки профиля после вставки (под эффективный угол, под угол установки или фиксированный угол), а затем выбрать *Загрузить профиль из > Название файла* – и задать файл, из которого в данную ступень будут загружаться сечения.

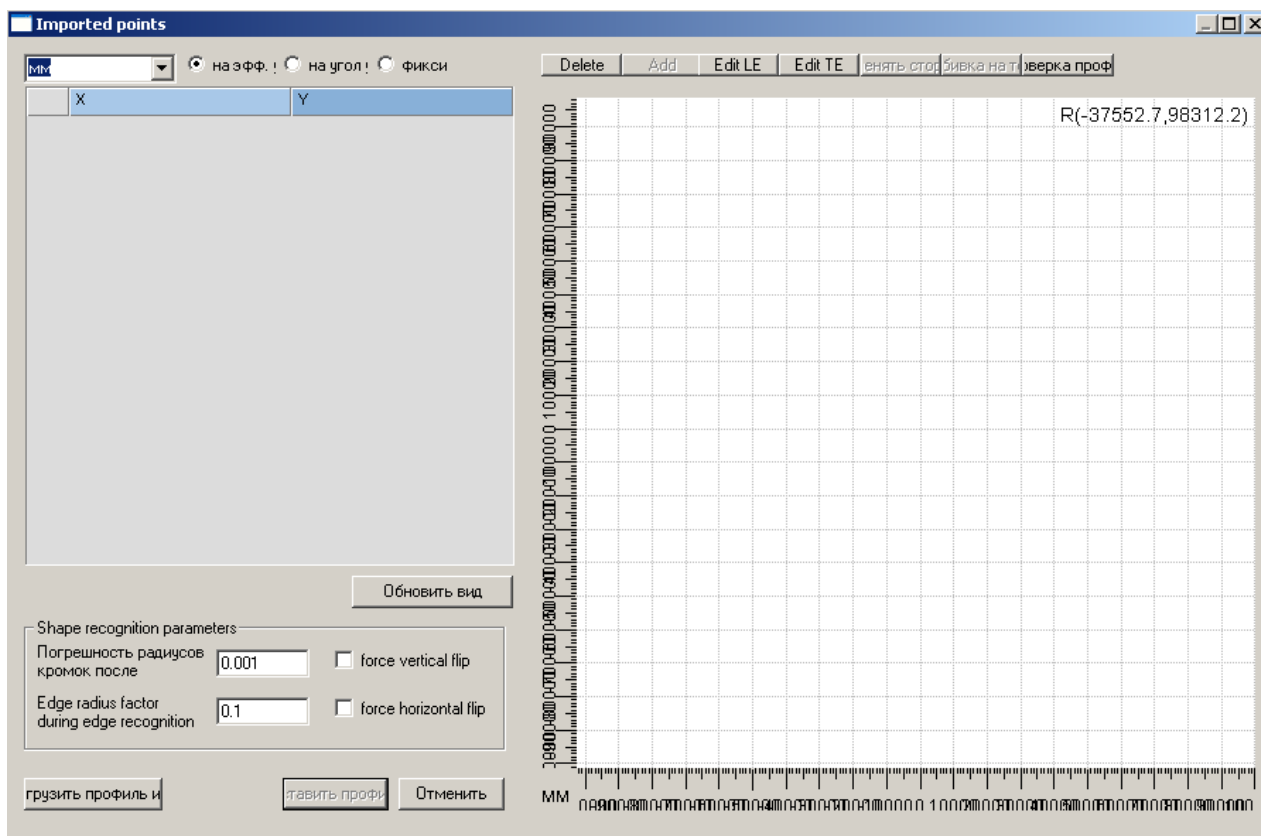


Рисунок 32. Окно импорта профиля по сечениям

4.5.4 Импорт массива точек из таблиц Excel.

Ещё один способ использования внешней геометрии профиля является импорт массива точек из таблиц Excel.

В окне импорта профиля находится специальное поле поддерживающее функцию Копировать/Вставить позволяющую производить обмен данными с таблицами Excel.

К профилям, вставленным таким образом, также могут быть применены опции подгонки под эффективный угол, угол установки или опция *фиксированный*.

Для вставки профиля нажмите кнопку «Импорт профиля» в меню окна *Профилирование*. Нажмите правой кнопкой мыши на заголовке таблицы и выберите «Вставить».

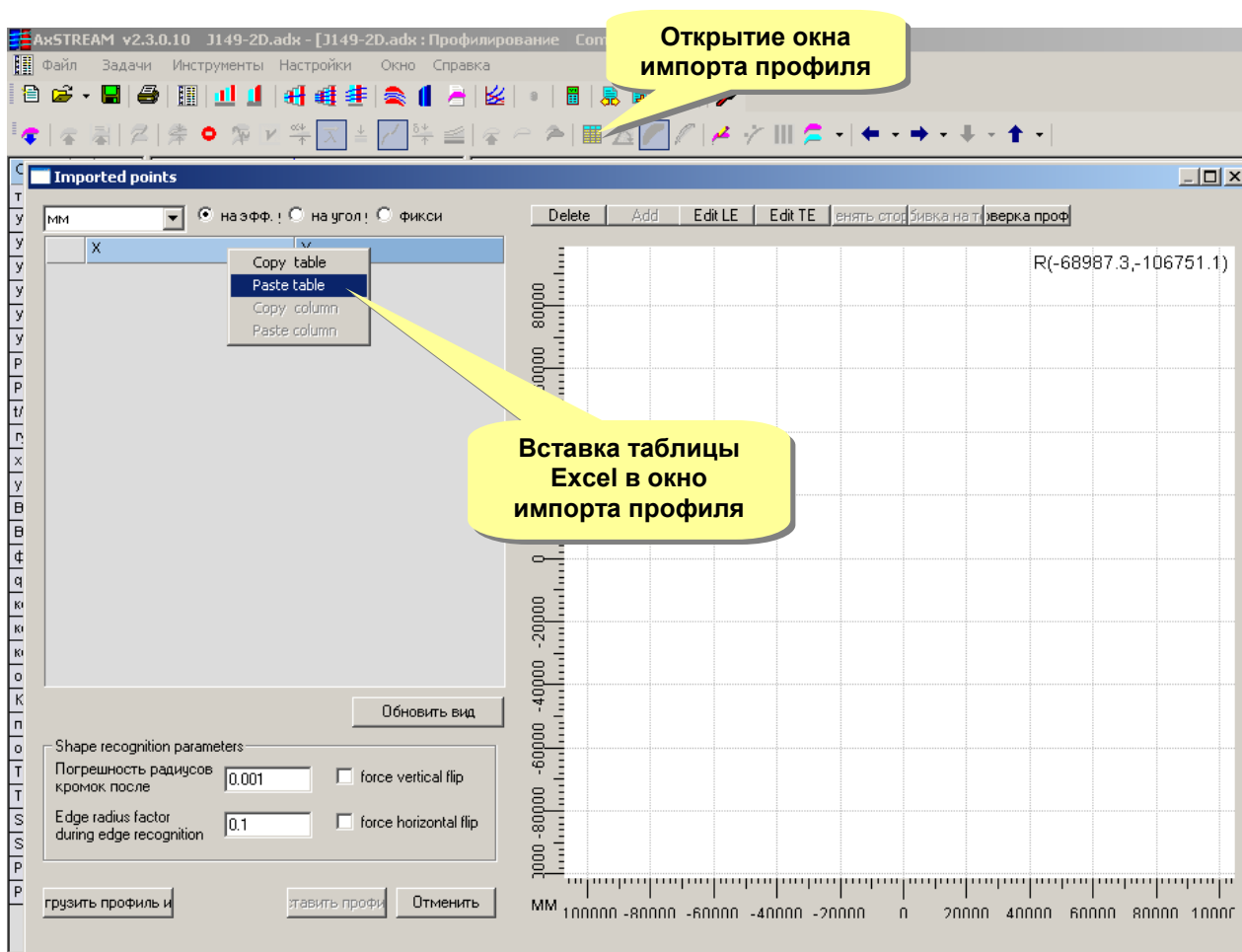


Рисунок 33. Импорт профиля с помощью таблицы Excel

Когда значения вставлены, нажмите кнопку «Обновить вид».

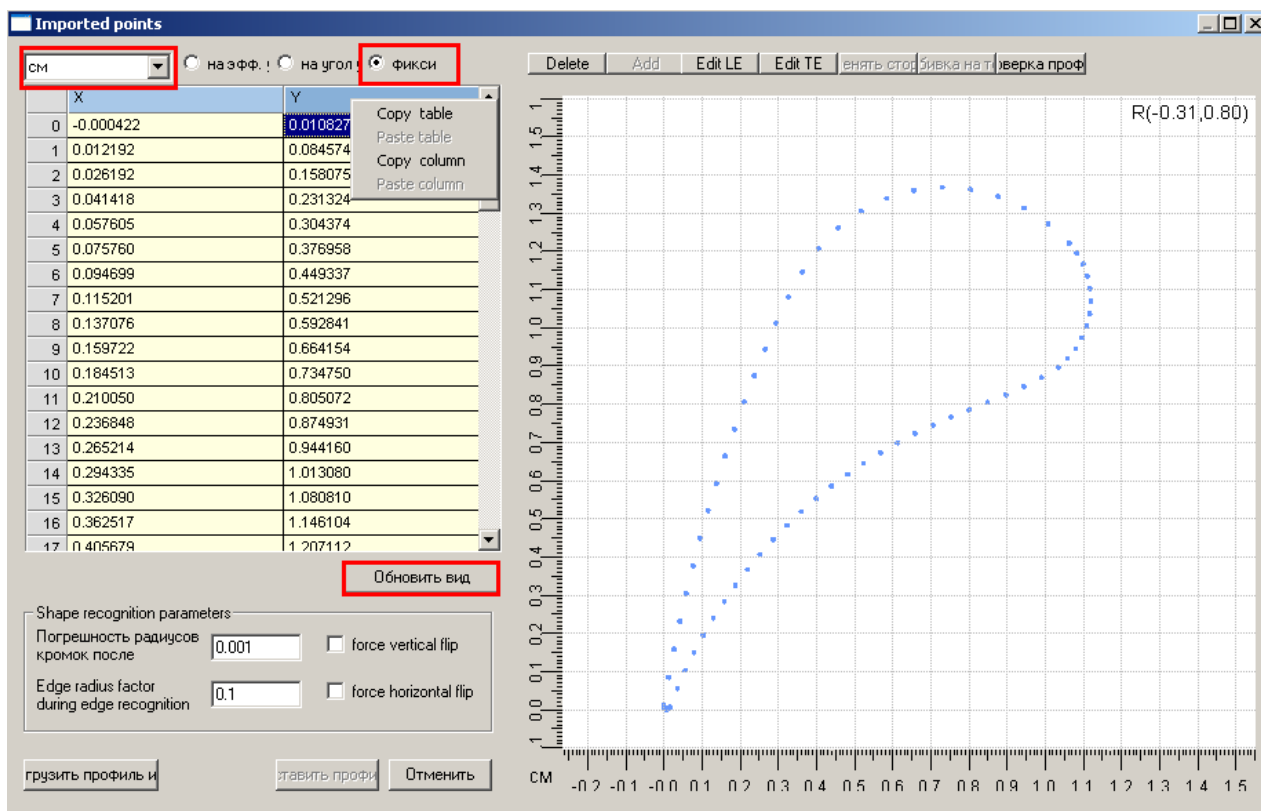


Рисунок 34. Импортированный профиль в окне импортирования профиля

Для более точного импорта в проект необходимо вручную задать Входную и Выходную кромки профиля. Нажмите кнопку «Редактировать входную кромку» в окне импорта профиля и нажмите на две точки определяющие диаметр входной кромки.

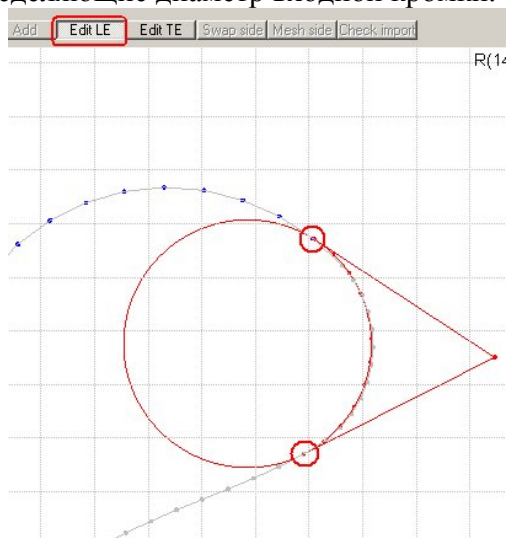


Рисунок 35. Задание входной кромки

Нажмите кнопку «Редактировать выходную кромку» и задайте выходную кромку

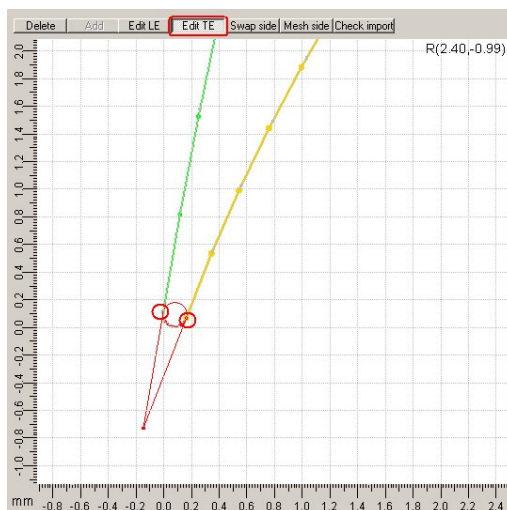


Рисунок 36. Задание выходной кромки

Кнопка **Поменять сторону** используется для ручного изменения стороны давления и стороны разрежения на профиле. Сторона давления на импортируемом профиле окрашена в жёлтый цвет, а сторона разрежения окрашена в зелёный цвет.

Кнопка **Разбивка на точки** применяется для изменения количества точек для более оптимальной работы с профилем.

Для вставки профиля нажмите кнопку «Проверка профиля», а затем кнопку «Вставить профиль».

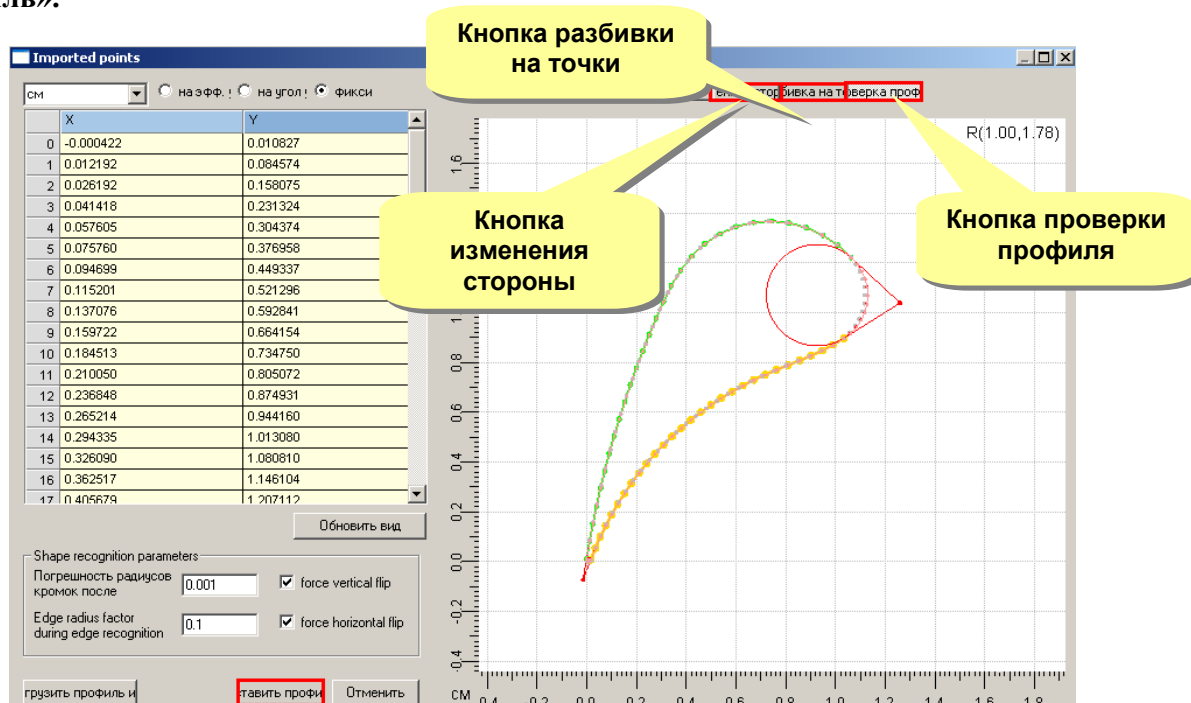


Рисунок 37. Окно импорта профиля

4.5.5 Подгонка значений импортированных профилей

Поскольку импортированный графический файл не содержит информации об углах лопаток, радиусе кромок и т. п., выполняется процедура распознавания формы. Являясь не аналитической, но довольно спорной процедурой, процесс распознавания формы требует тщательной проверки и подгонки всех полученных данных.

Подгонка металлических углов осуществляется в режиме *Измерения*.

В данном режиме система AxSTREAM сохраняет импортированный профиль и временно отображает спрофилированную форму для углов, к которым была применена функция распознавания формы. Импортированный профиль может отображаться как фоновый (кнопки «Сохранить как фоновый» и «Отобразить фоновый профиль»).

Для получения точных значений углов необходимо с помощью элементов редактирования совместить редактируемую форму с фоновым профилем.

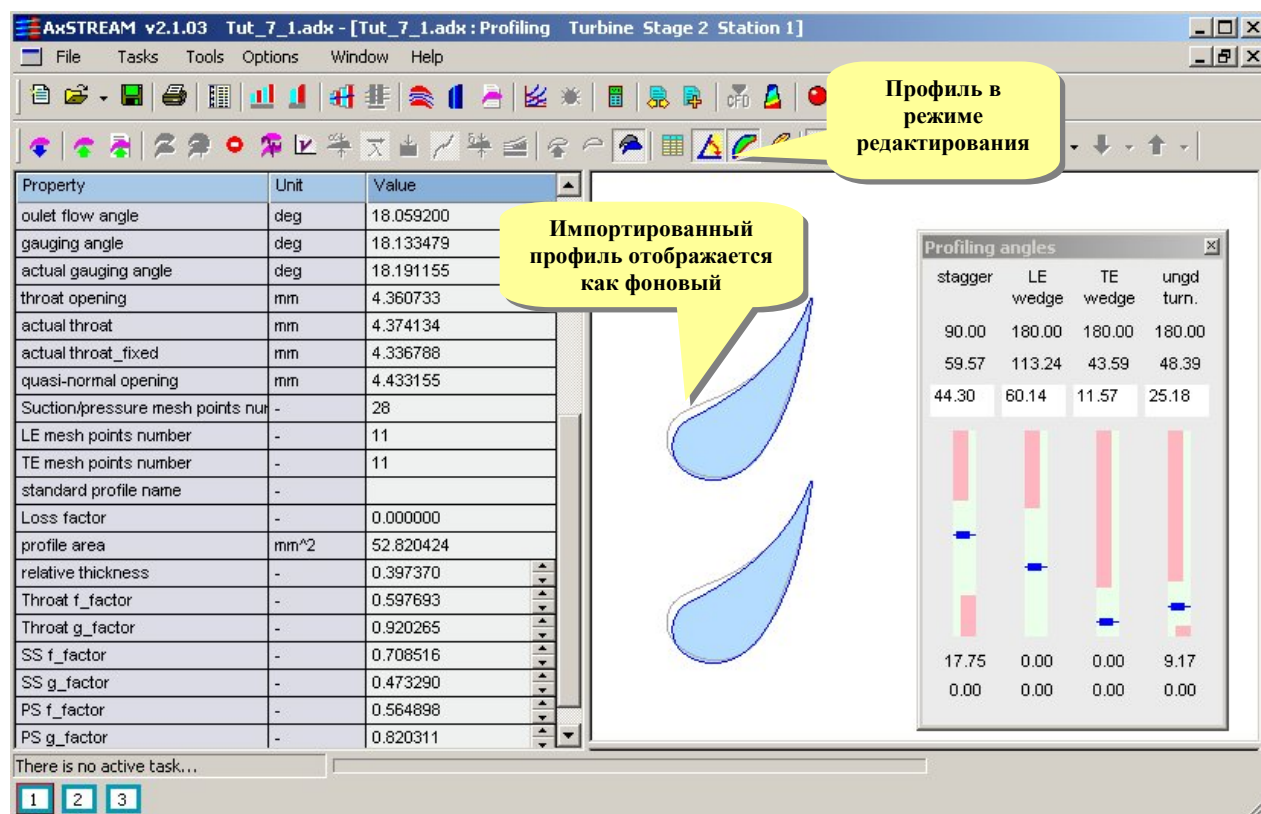


Рисунок 38. Измерение углов импортированного профиля

4.6 3D Проектирование лопаток в системе AxSTREAM

3D проектирование лопаток осуществляется в окне *Проектирования лопаток*. В режиме 3D проектирования становится доступной функция выравнивания геометрических параметров по высоте и перераспределение напряжения. В диалоге *Проектирования лопаток* можно редактировать табличные данные и графики.

4.7 Задачи 3D проектирования лопаток

Основными задачами 3D проектирования лопаток являются:

- Равномерное распределение углов и других геометрических параметров
- Создание нужной меридиональной модели лопатки
- Перераспределение напряжения по высоте лопатки в рамках допустимого

4.7.1 Проверка распределения углов и других геометрических параметров

Контроль и проверка распределения углов и других геометрических параметров производится с помощью первой группы кнопок панели управления 3D проектированием лопаток.

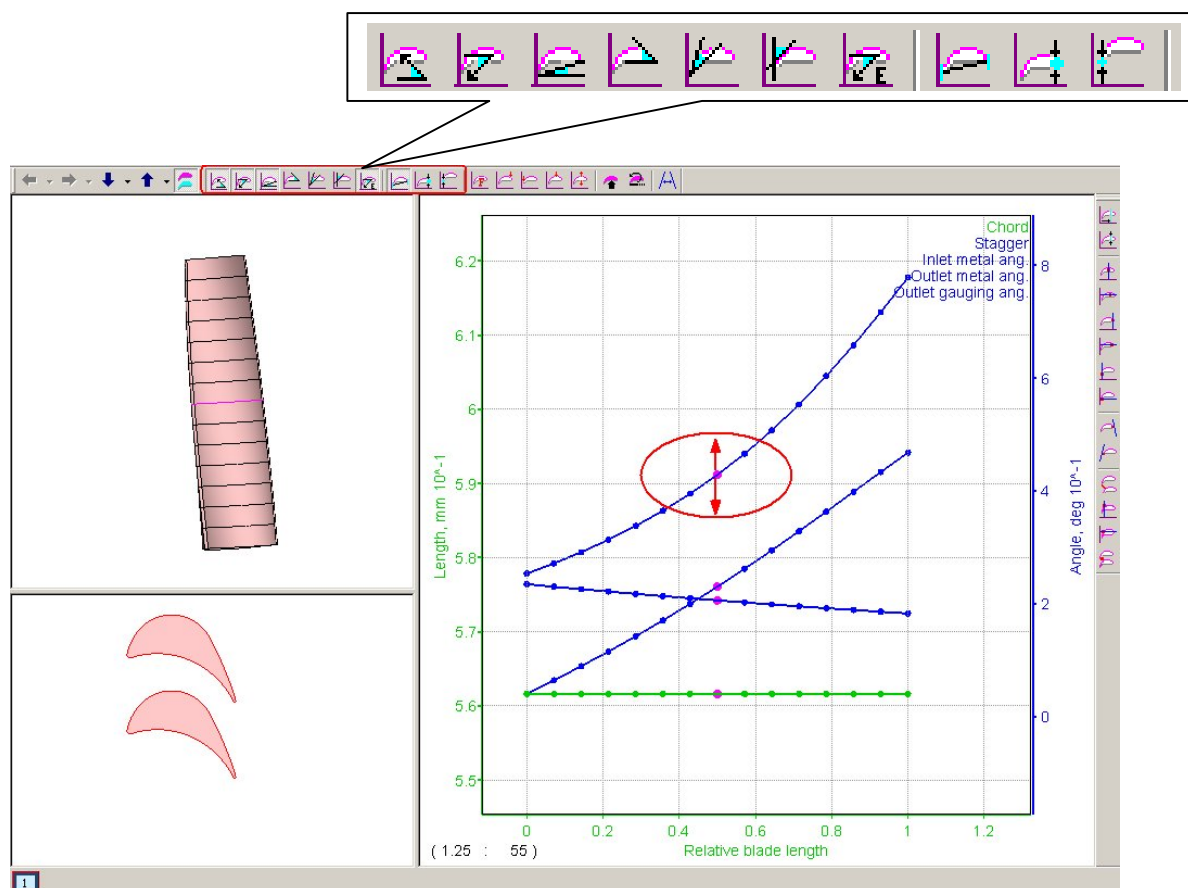


Рисунок 39. Кнопки панели управления 3D проектированием лопаток

Графики с точками редактируются простым перемещением объектов с помощью мыши. После того, как точки перенесены в нужном направлении, для сохранения изменений нужно нажать кнопку «Применить». При нажатии кнопки «Перезагрузить» все несохраненные данные стираются.



Рисунок 40. Кнопки «Применить» и «Перезагрузить» на панели управления 3D проектированием лопаток

4.7.2 Использование сплайнов для равномерного распределения параметров

Для равномерного распределения геометрических параметров проектирования система AxSTREAM предоставляет возможность для просмотра сплайнов в графике 3D проектирования лопаток.

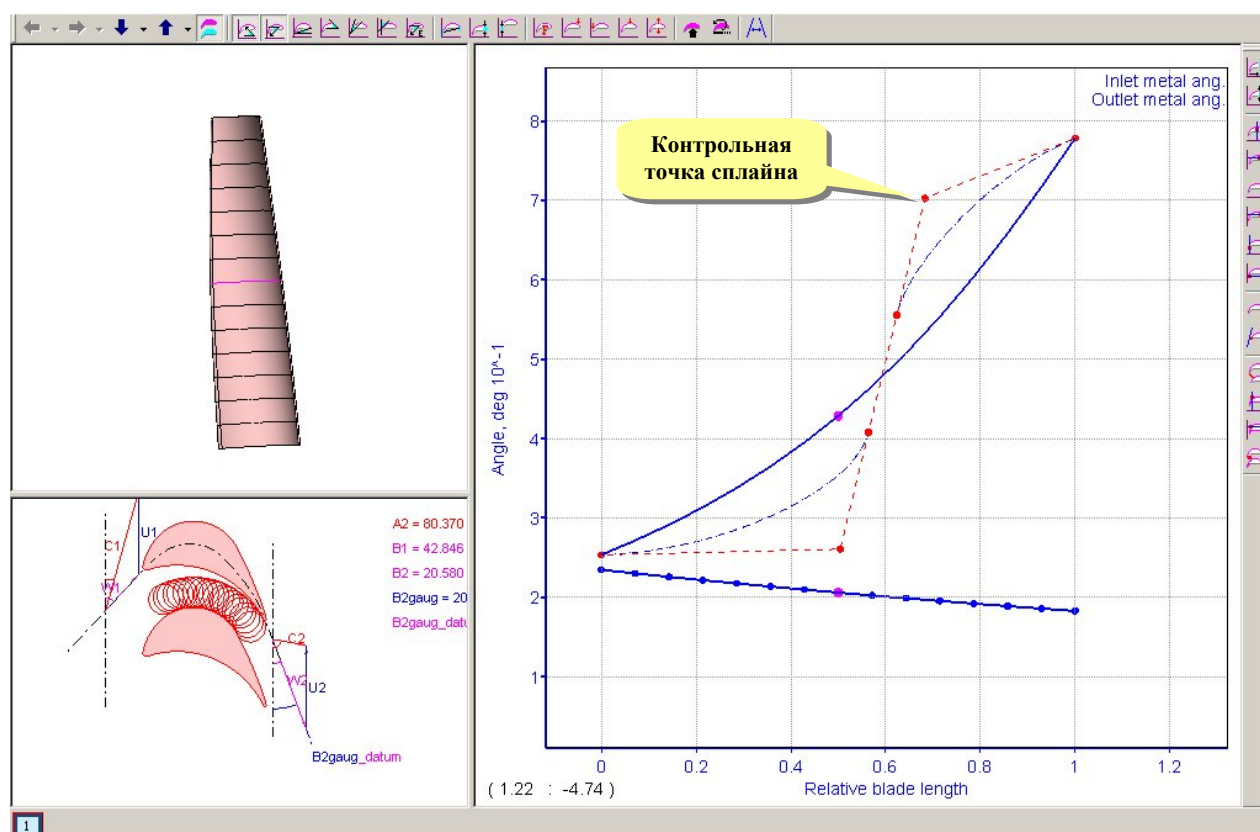


Рисунок 41. Использование сплайнов в равномерном распределении параметров

Сплайн вызывается из контекстного меню, которое появляется при нажатии правой клавиши мыши. Контрольные точки сплайна (выделены красным) могут быть перемещены с помощью мыши. После того, как точки перенесены в нужном направлении, для сохранения изменений нужно нажать кнопку «Применить». При нажатии кнопки «Перезагрузить» все несохраненные данные стираются (если не была прежде нажата кнопка «Применить»).

4.7.3 Меридиональная модель проектирования лопаток

Отображение меридиональной модели вызывается с помощью кнопок на панели управления. При первичном проектировании меридиональной границы входной/выходной кромок (после загрузки проекта), их параметры равны абсциссам входной/выходной кромок.

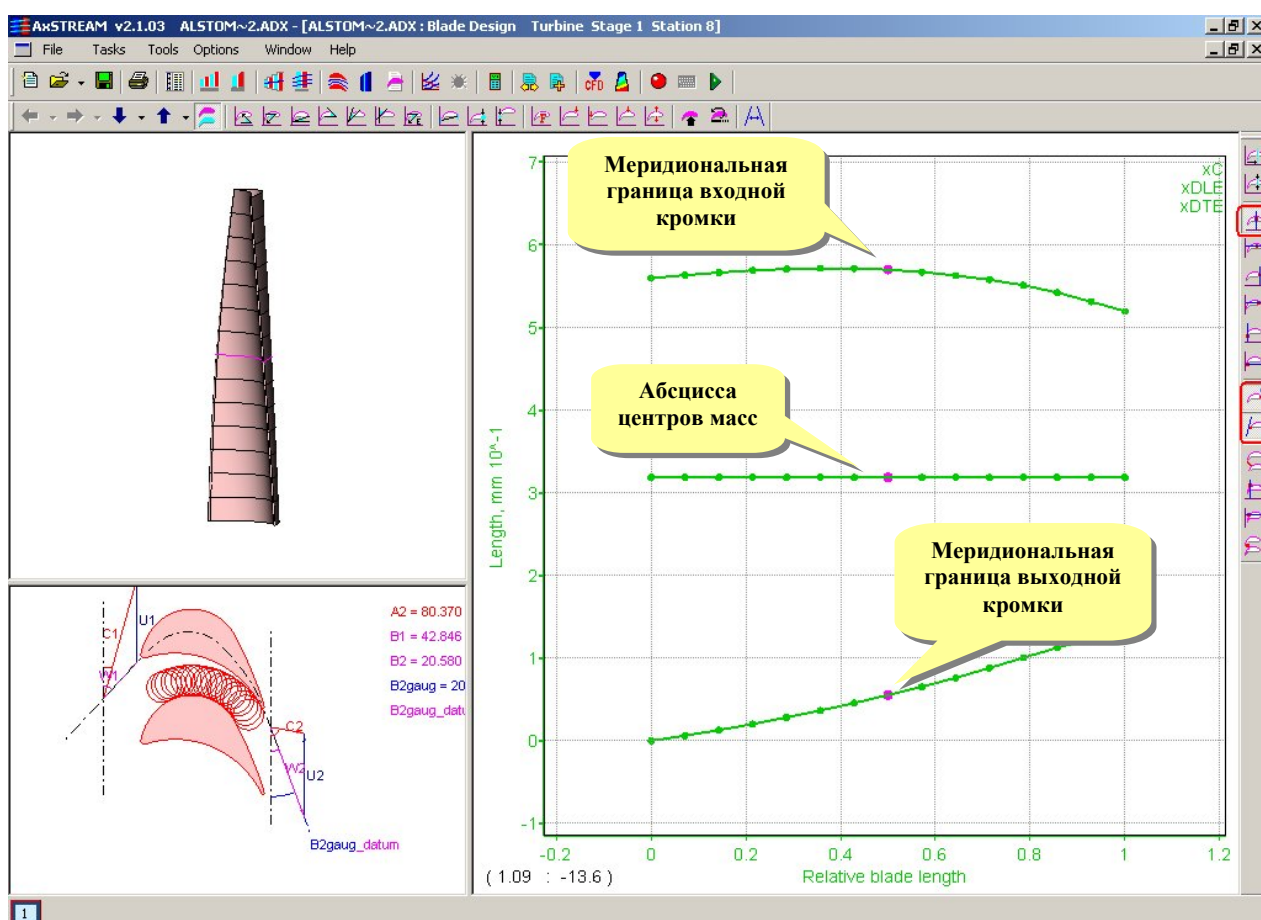


Figure 42. Проецирование меридиональных границ входной/выходной кромок

Проецирование меридиональных границ может редактироваться, но изменения не сразу отразятся в графике меридионального проектирования лопатки. Местоположение границ входной/выходной кромок может отображаться в графике решеток (в окнах Профилирования, Ступени и 3D проектирования лопатки).

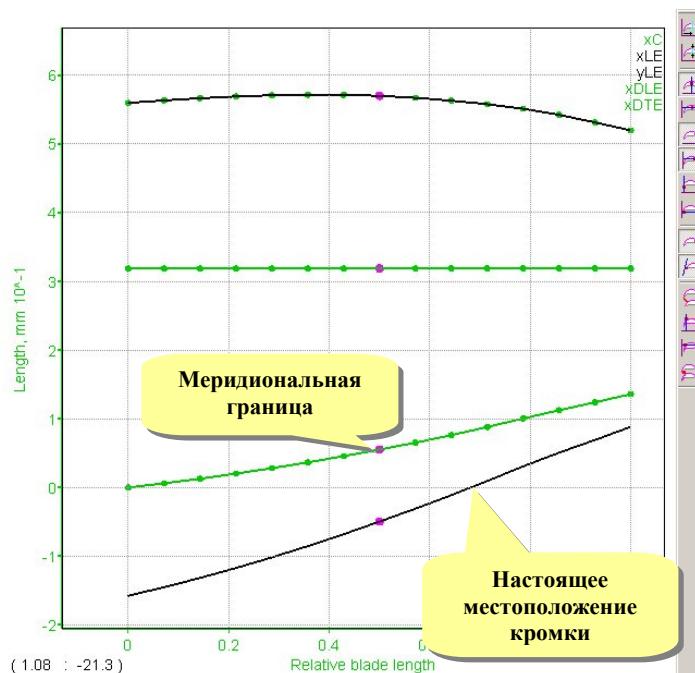


Рисунок 43. Отредактированные границы входной/выходной кромки и настоящее местоположение кромки

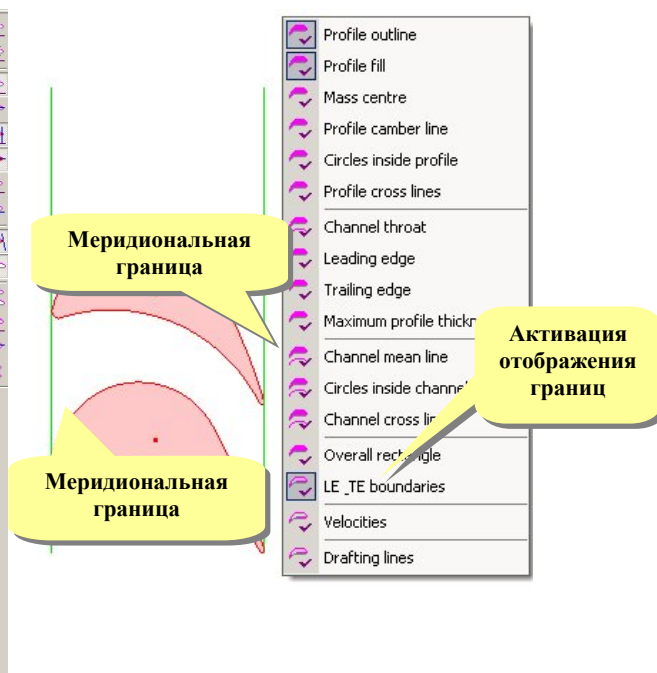


Рисунок 43.1. Границы входной/выходной решеток в графике решеток

Пользователь может редактировать профиль поперечного сечения и проверить местоположение входной/выходной кромки относительно нужных меридиональных границ.

4.7.4 Автоматическая подгонка меридиональных границ

AxSTREAM предоставляет возможность автоматической подгонки меридиональных границ. Данная функция вызывается из панели управления 3D проектирования лопаток и служит для подгонки поперечного сечения по его осевой хорде к межграницному расстоянию и смещенному отсеку внутри границ.

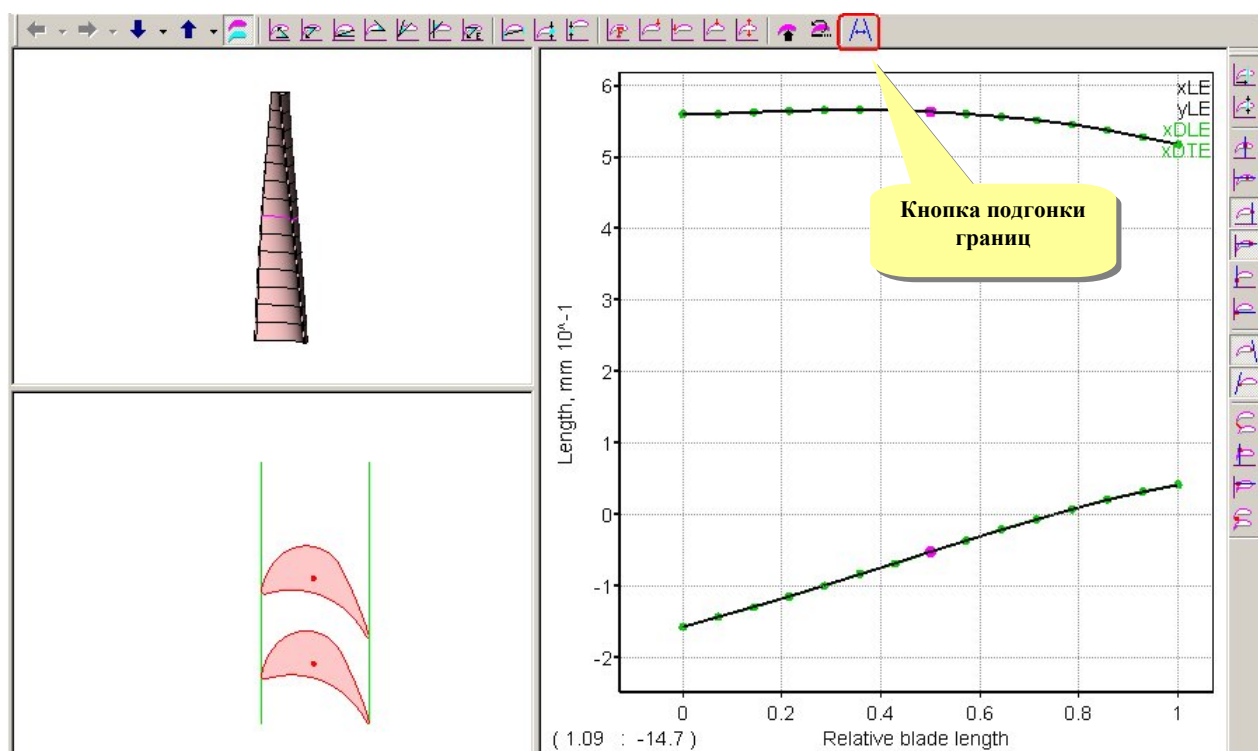


Рисунок 44. Сечение после автоматической подгонки меридиональных границ

Внимание 1:

Автоматическая подгонка применима только к пользовательским профилям.

Внимание 2:

Выполняя автоматическую подгонку, нужно следить за вращающимися лопатками, так как центр массы поперечного сечения может быть сдвинут, и напряжение при изгибе может увеличиться выше допустимого.

4.7.5 Контроль распределения напряжения

AxSTREAM позволяет контролировать процесс распределения напряжения по длине лопатки. График напряжения вызывается из панели управления 3D проектированием лопаток.

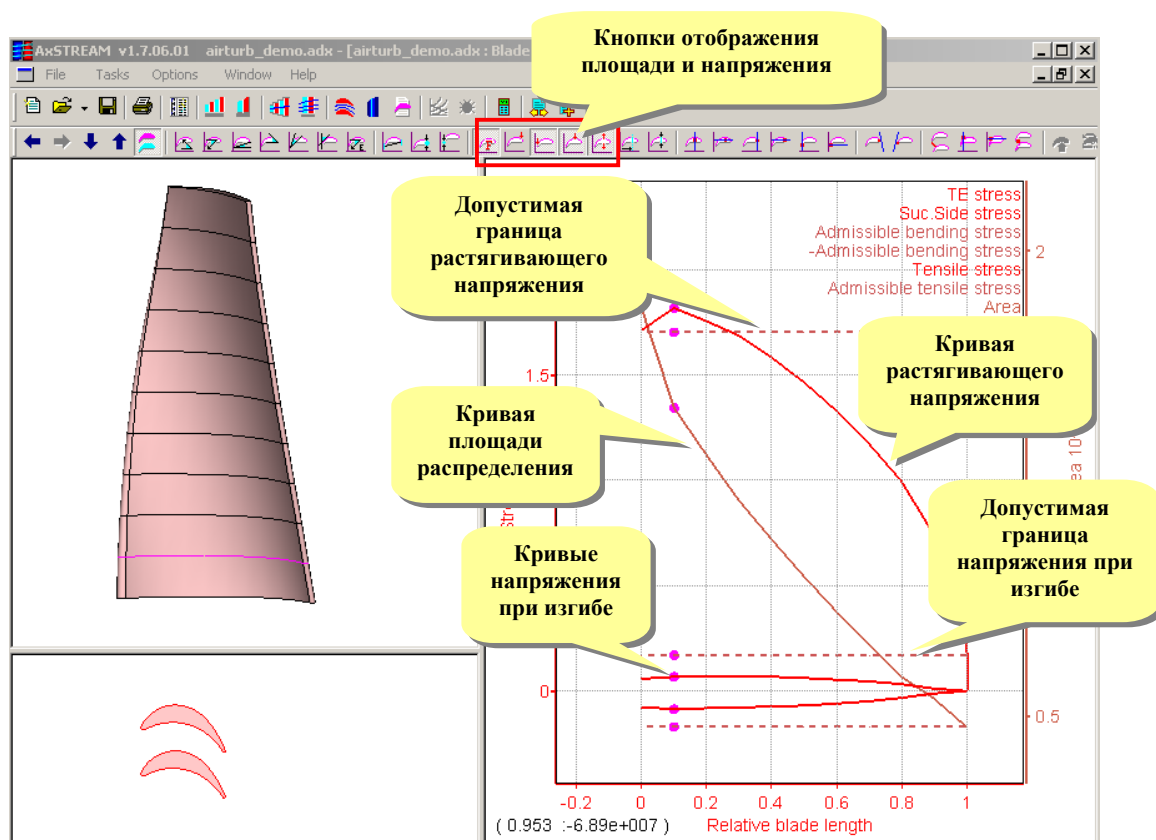


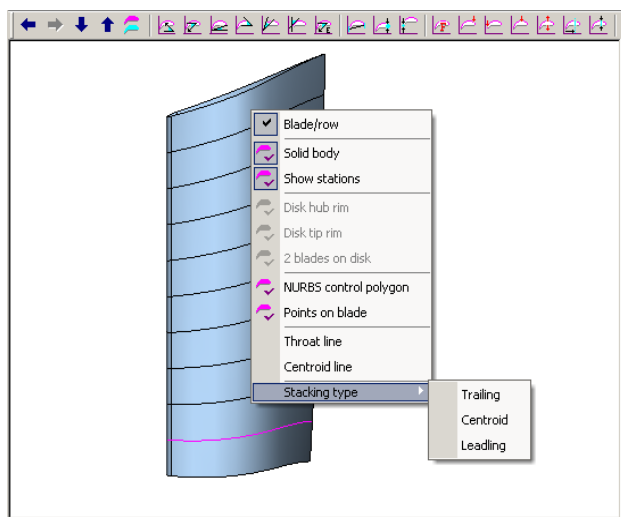
Рисунок 45. Распределение напряжения в окне 3D проектирования лопаток

На графике могут быть представлены область поперечных сечений, растягивающее напряжение и напряжение при изгибе для входной/выходной кромок и сторона разрезания. Рядом с напряжением показаны также допустимые границы напряжения, которые зависят от свойств материала лопатки.

4.8 Регулировка углов осевого и тангенциального навала

Конструирование трехмерной поверхности лопатки предполагает выравнивание всех сечений лопатки по одной линии. Наиболее простым способом является выравнивание радиусов по крайним точкам кромок корневого сечения или по его центру тяжести.

При выравнивании все сечения смещаются таким образом, что одни и те же точки сечений находятся на выбранной линии отсчета.



AxSTREAM автоматически выравнивает сечения по

- входной кромке;
- выходной кромке;
- центру тяжести (центроиду).

Тип формирования можно выбрать в контекстном меню окна 3D проектирования лопаток или в таблицах **Статора** и **Ротора** в разделе **Формирование пера лопатки**.

Рисунок 46. Выбор типа формирования лопатки в контекстном меню

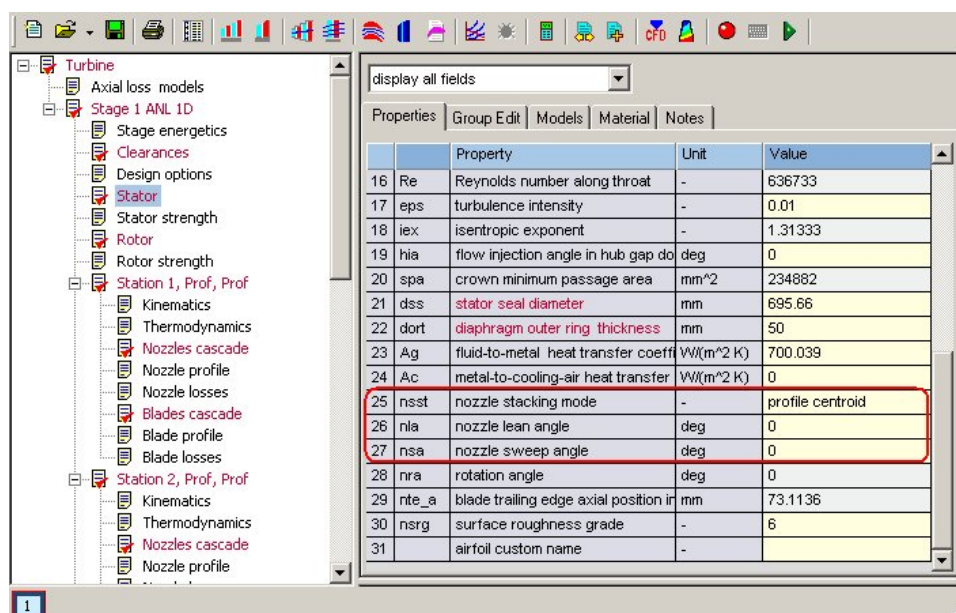


Рисунок 47. Выбор типа формирования углов тангенциального и осевого навалов

Постоянные величины для углов осевого и тангенциального навалов могут быть заданы в тех же таблицах.

Внимание:

Система AxSTREAM позволяет проектировать углы осевого и тангенциального навала, но вычисляется КПД только для угла тангенциального навала.

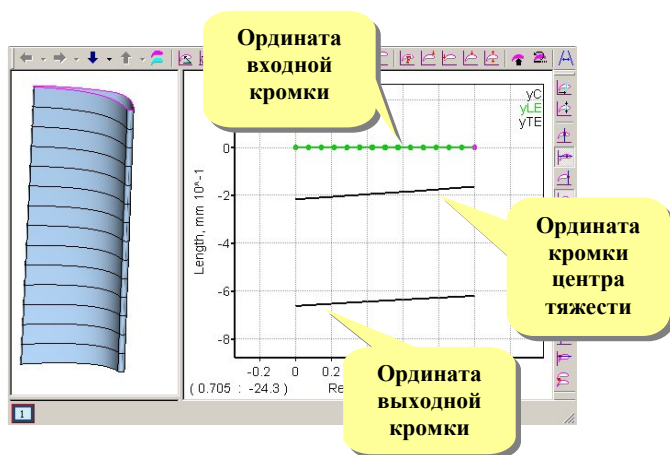


Рисунок 48. Лопатка статора, сформированная по входной кромке

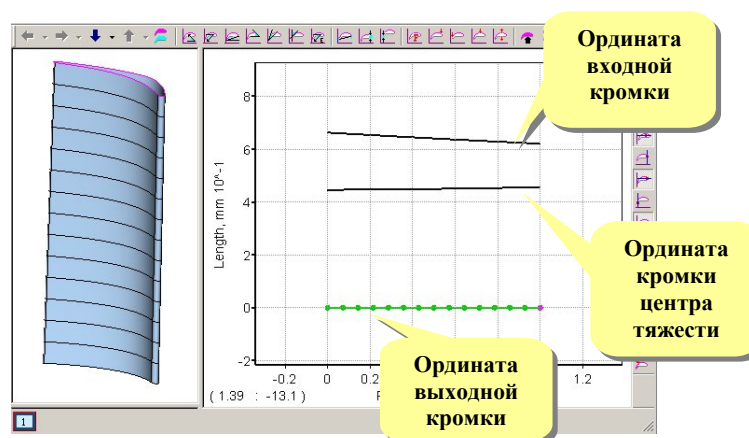


Рисунок 48.1 Лопатка статора, сформированная по выходной кромке

AxSTREAM позволяет перемещать произвольную кривую посредством переноса точек формирования вручную, либо задания нового местоположения точек в таблице. На рисунках 46 – 47.1 изображены разные типы лопаток, с углом тангенциального навала и без.

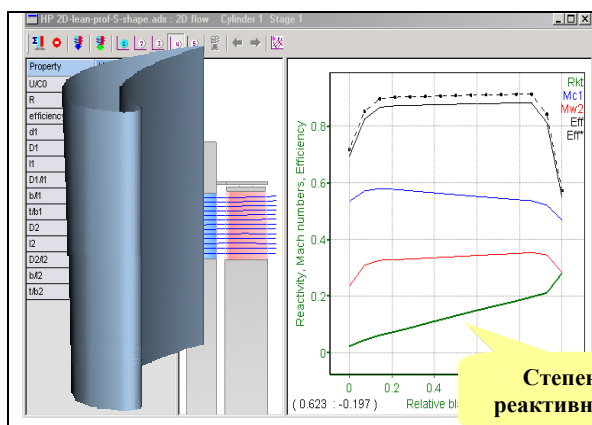


Рисунок 49. Цилиндрическая лопатка статора

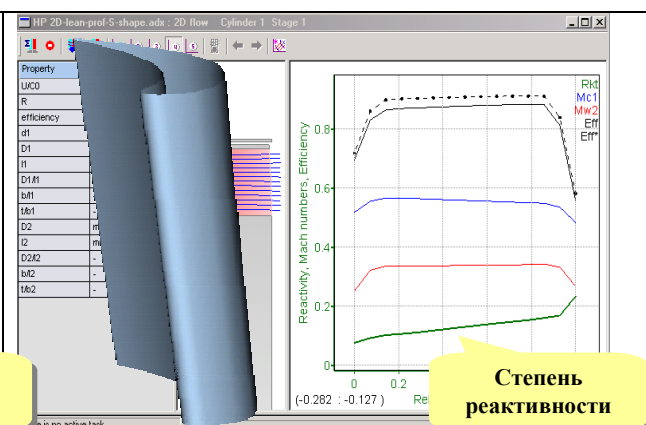
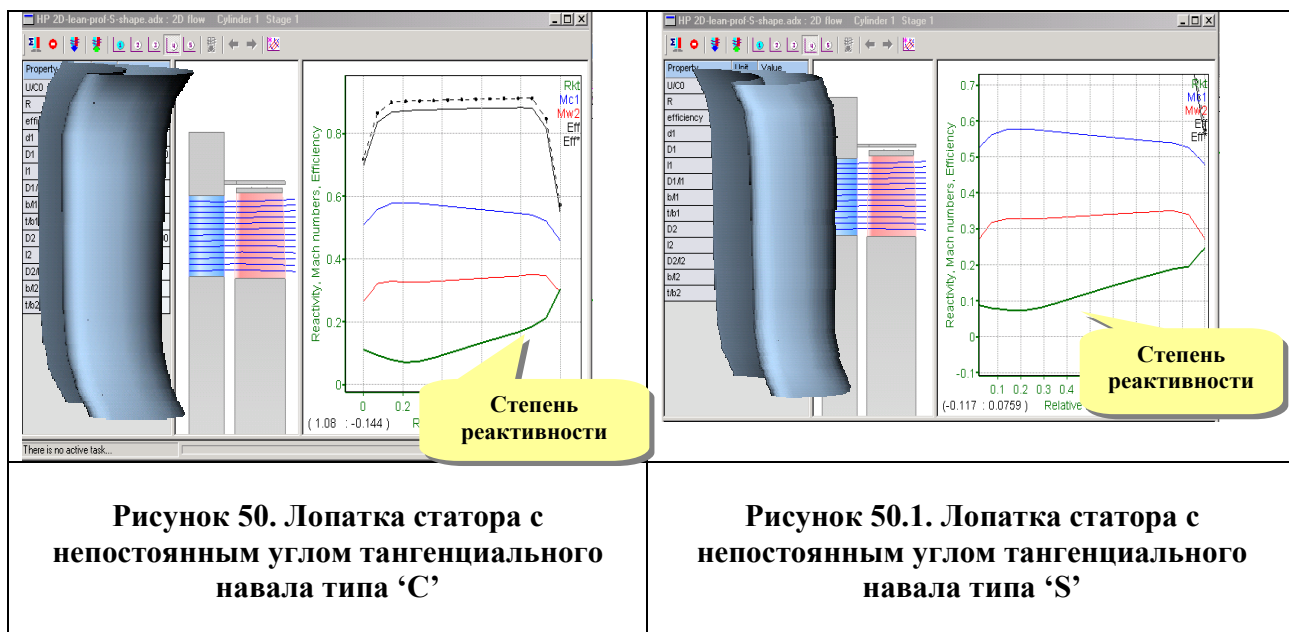


Рисунок 49.1. Лопатка статора с постоянным углом тангенциального навала +10°



5 База профилей АТЛАС

База данных *АТЛАС* предназначена для:

- хранения профилей, хорошо зарекомендовавших себя в производстве, а также пользовательских профилей;
- хранения профилей, сконструированных в текущем проекте, для дальнейшего использования в настоящем или в других проектах;
- конструирования новых и редактирования уже существующих профилей.

Атлас способен хранить профили, сконструированные по точкам, либо по сегментам дуги/линии.

5.1 Запуск Атласа

Для вызова процедуры профилирования плоских решеток используется кнопка *Атлас* на панели управления в окне *Проект*, либо команды *Задача → Атлас* в главном меню.

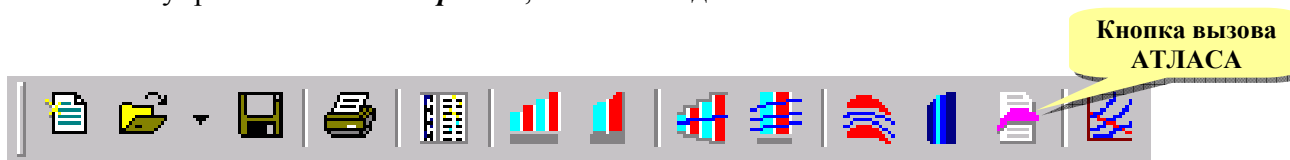


Рисунок 51. Кнопка вызова Атласа

5.2 Окно Атласа

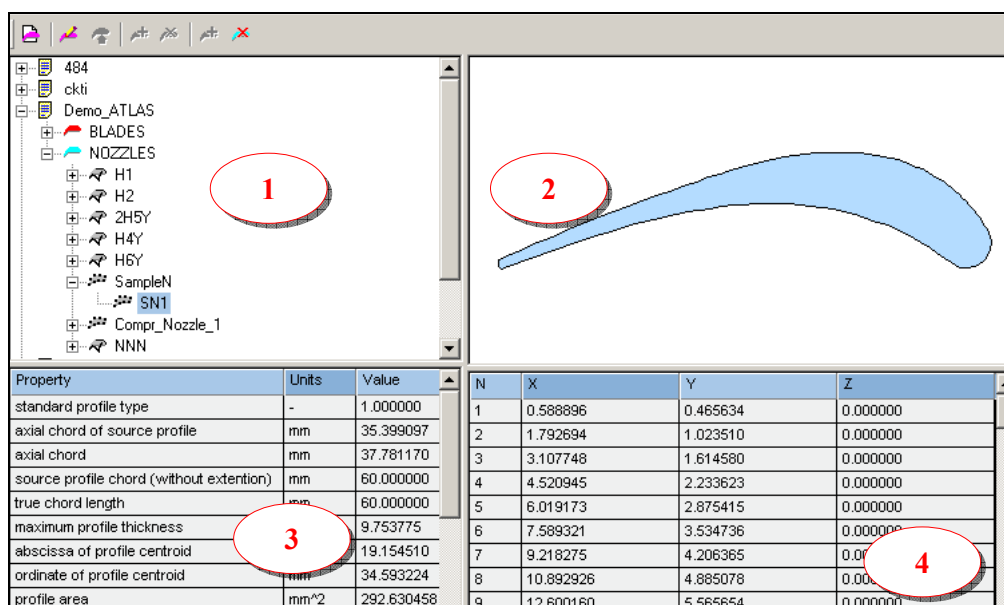


Рисунок 52. Разметка окна Атласа для профиля, сконструированного по точкам

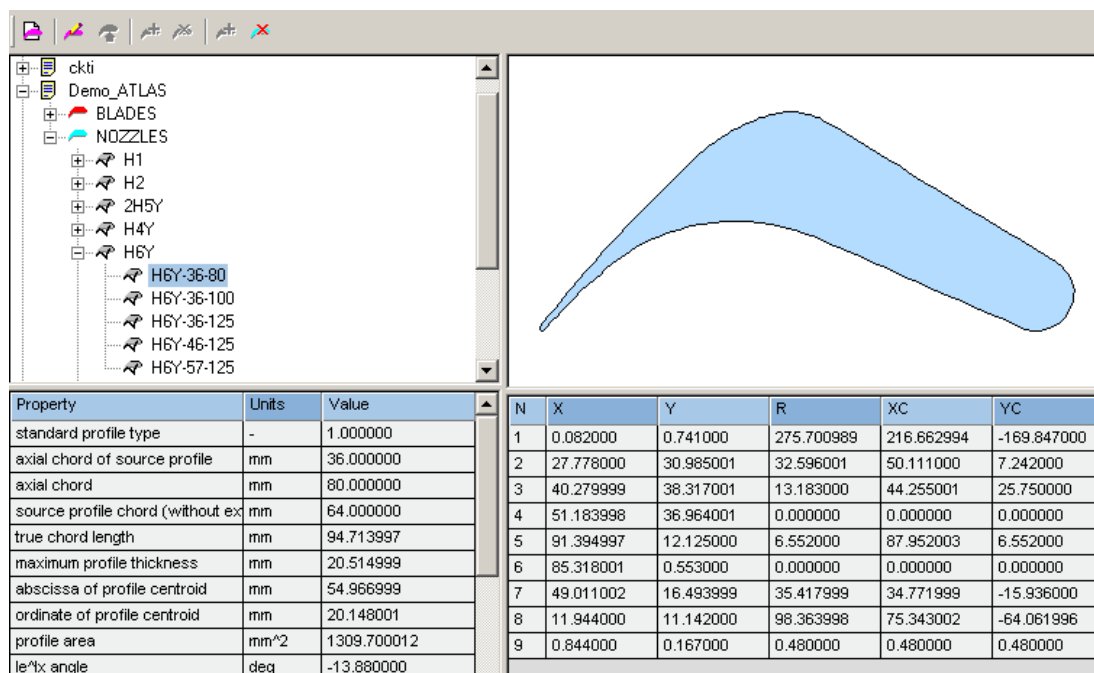


Рисунок 53. Разметка окна Атласа для профиля, сконструированного по дугам и линиям

Окно *Атласа* состоит из следующих подокон:

1. Дерево профиля.
2. Схема профиля.
3. Таблица параметров профиля.
4. Таблица координат.

5.2.1 Панель управления в окне *Атласа*

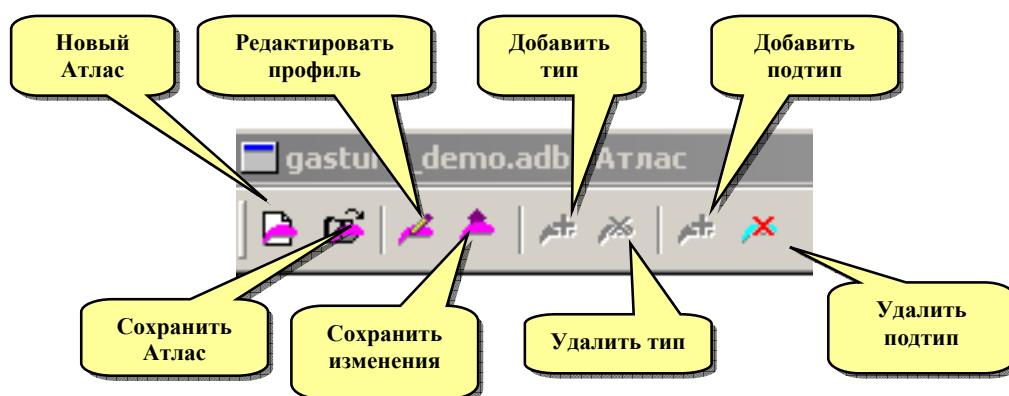


Рисунок 54. Панель управления в окне *Атласа* (в режиме редактирования профиля)

5.2.2 Подокно дерева профиля

АТЛАС имеет 3-х уровневую структуру.

- 1^{ый} уровень – папки прежде сконструированных сопел/лопаток
- 2^{ой} уровень – тип профиля
- 3^{ий} уровень – подтип профиля

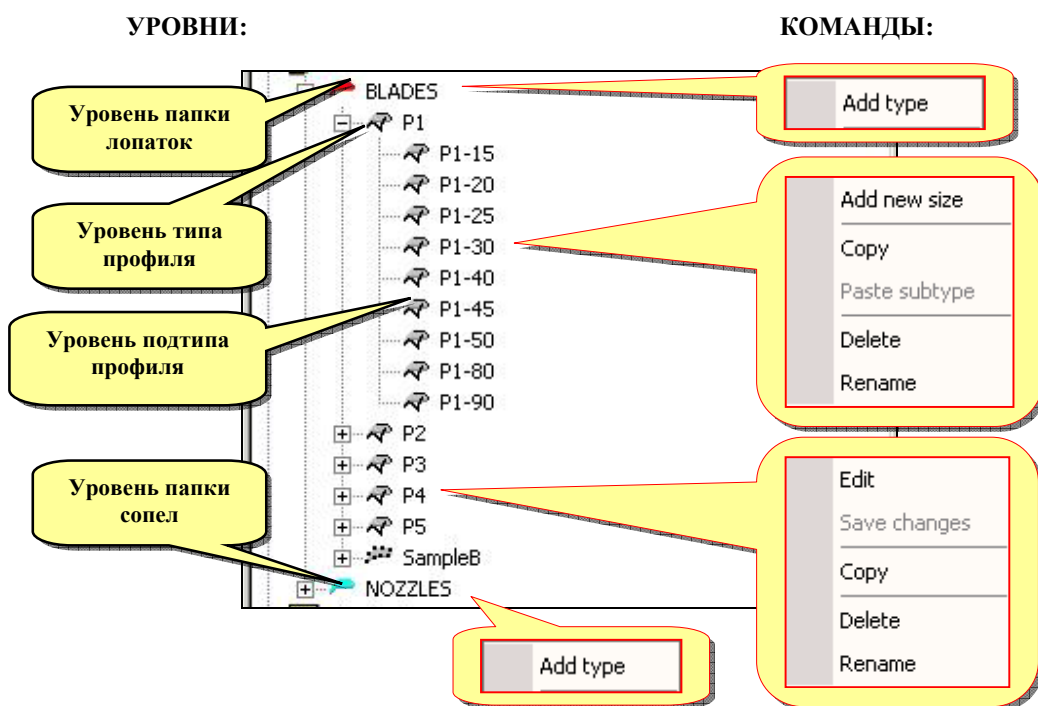




Рисунок 55. Подокно дерева профиля с контекстным меню

Каждый уровень дерева профиля связан с соответствующим контекстным меню (с набором доступных для данного уровня команд), которое вызывается нажатием правой клавиши мыши, рис. 52. Значки  и  обозначают профили, сконструированные по точкам и по сегментам, соответственно.

5.2.3 Профили, сконструированные по точкам

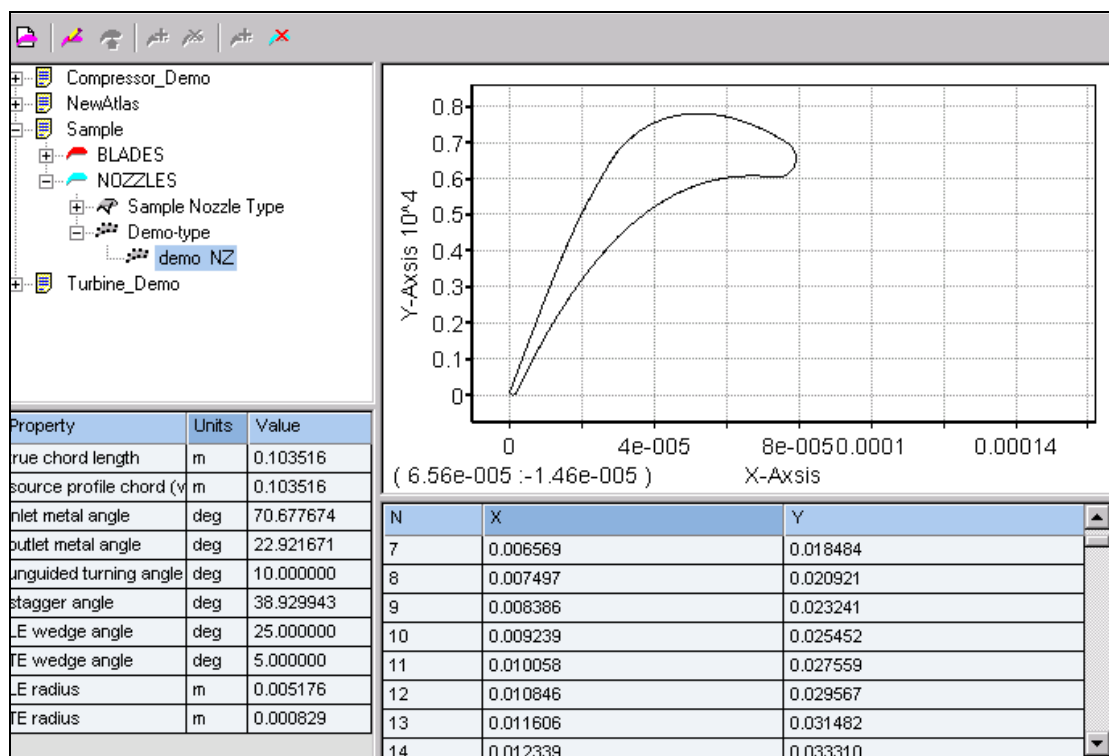


Рисунок 56. Окно Атласа для профилей, сконструированных по точкам

Обозначения в таблице:

- N – номер точки;
- X – абсцисса исходной точки сегмента;
- Y – ордината исходной точки сегмента;

Значения профилей являются дополнительной информацией и отображаются только для справки.

При сохранении данных из проекта AxSTREAM в базу АТЛАС, значения профилей автоматически вычисляются и, таким образом, не могут быть отредактированы вручную.

Другой способ расчета значений профилей – вставить профиль из АТЛАСА в сечение ступени.

5.2.4 Профили, сконструированные по дугам

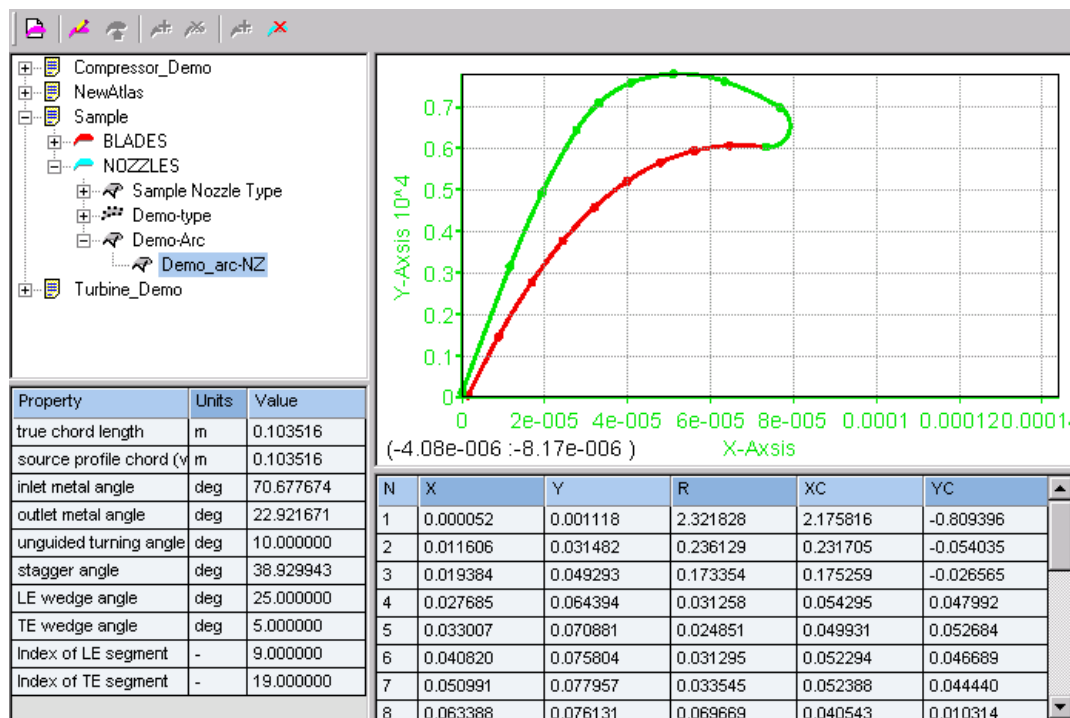


Рисунок 57. Окно Атласа для профилей, сконструированных по дугам

Обозначения в таблице:

- X** – абсцисса исходной точки сегмента;
- Y** – ордината исходной точки сегмента;
- R** – радиус дуги (если R=0, то сегмент является частью линии);
- XC** – абсцисса центра дуги;
- YC** – ордината центра дуги.

Значения профилей являются дополнительной информацией и отображаются только для справки.

При сохранении данных из проекта AxSTREAM в базу АТЛАС, значения профилей автоматически вычисляются и, таким образом, не могут быть отредактированы вручную.

Другой способ расчета значений профилей – вставить профиль из АТЛАСА в сечение ступени.

5.2.5 Стандартные профили для профилирования компрессора

Стандартные профили для профилирования компрессора конструируются посредством распределения толщины.

Распределение толщины рассчитывается как отношение толщины к хорде.

Радиусы кромок рассчитываются как процентное отношение хорды.

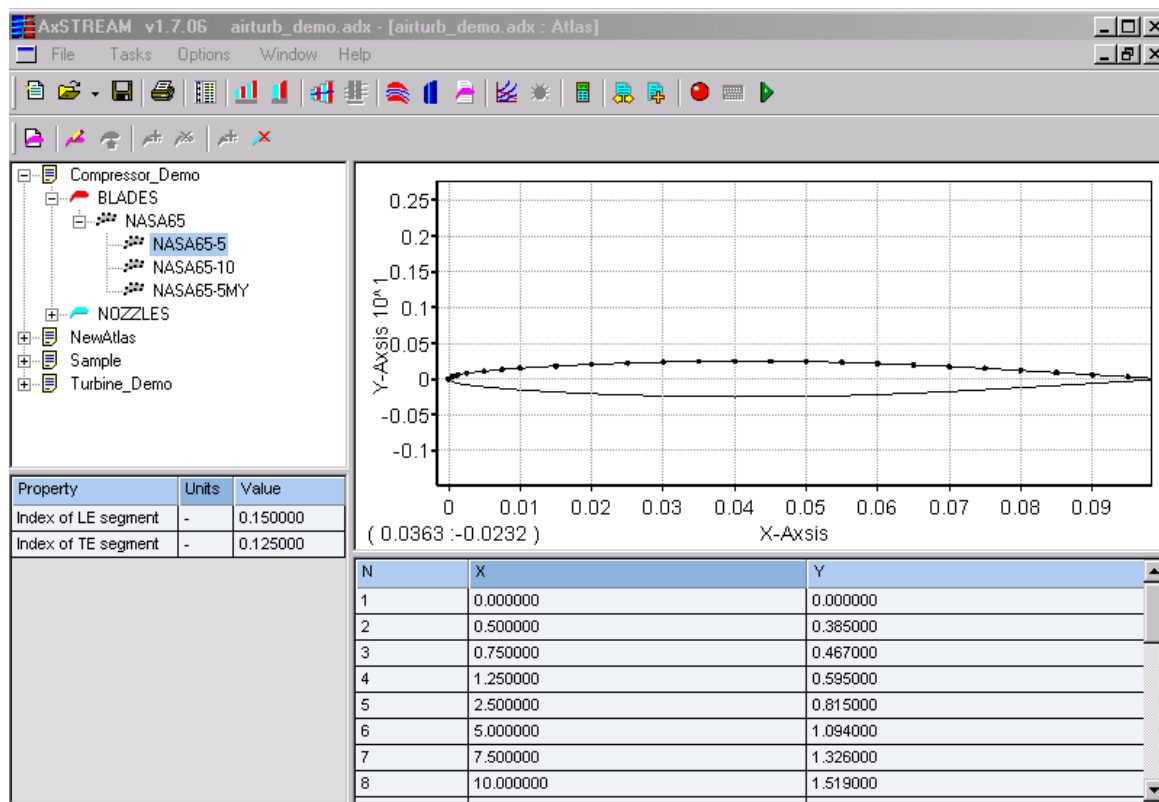


Рисунок 58. Стандартный профиль компрессора в ATLACE AxSTREAM

5.3 Работа с Атласом

При создании новой базы данных в Атласе, формируются две стандартные папки – «Сопло» и «Лопатка». После того как новый Атлас был создан, в папку Сопло/Лопатка нужно добавить новые типы профилей. Количество точек/сегментов зависит от типа профиля, поэтому для профилей с разным количеством точек/сегментов необходимо создать разные типы профилей.

5.3.1 Добавление типа турбины

Чтобы добавить папку типа турбины в АТЛАС, нужно выбрать «По дугам», либо «По точкам» в диалоге *Добавить новый тип*. Чтобы добавить папку типа компрессора, выберите «По средней линии».

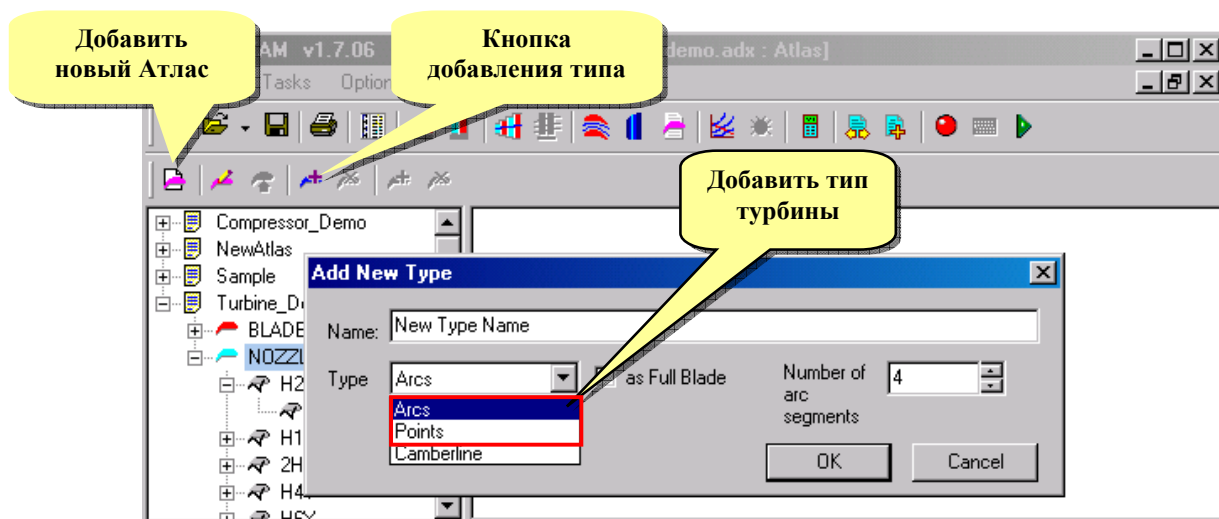


Рисунок 59. Добавление папки типа турбины в АТЛАС

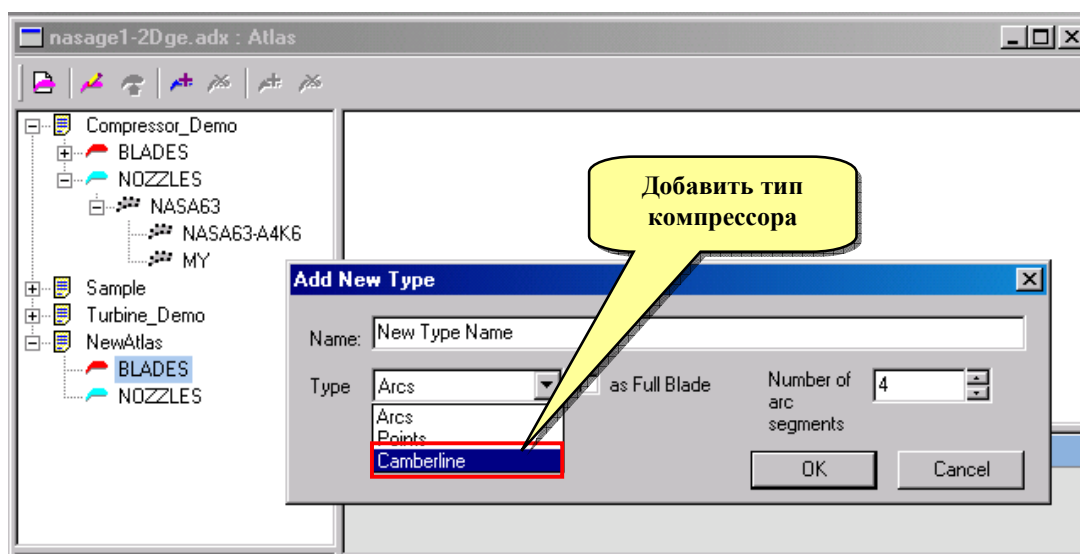


Рисунок 60. Добавление папки типа компрессора в АТЛАС

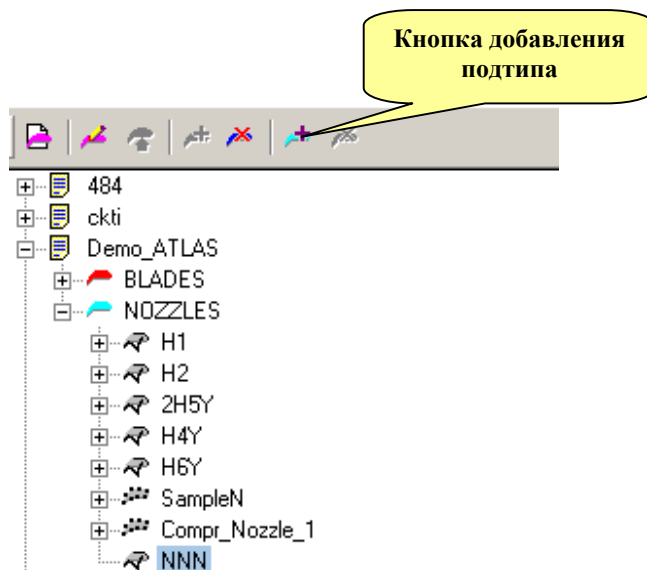


Рисунок 61. Добавление нового подтипа профиля

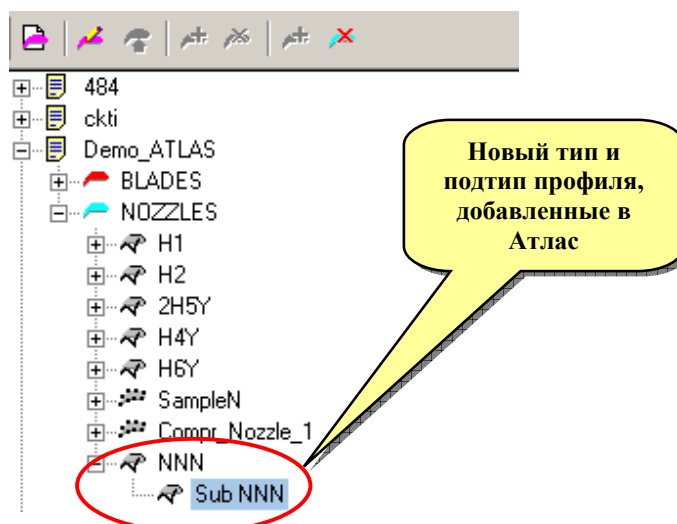


Рисунок 62. Дерево проекта с добавленными типом и подтипом профиля

6 Проектирование длинных лопаток

Процедура проектирования длинных лопаток в *AxSTREAM* имеет несколько особенностей. Отличаясь от других процедур, данный процесс, тем не менее, включает все стандартные этапы и шаги проектирования лопаток, где геометрические и аэродинамические параметры рабочего тела на входе и выходе венца лопатки вычисляются после расчета теплового баланса.

Для проектирования плоских решеток *AxSTREAM* применяет подход аналитической методологии, что позволяет описывать любые конфигурации профиля с учетом всех условий расчета теплового баланса.

AxSTREAM делит процедуру проектирования лопаток на два этапа:

- Профилирование плоских сечений;
- Профилирование пера лопатки с учетом взаимосвязи сечений.

На практике при прохождении обоих этапов выполняются итерации, до тех пор, пока подходящий профиль не будет найден.

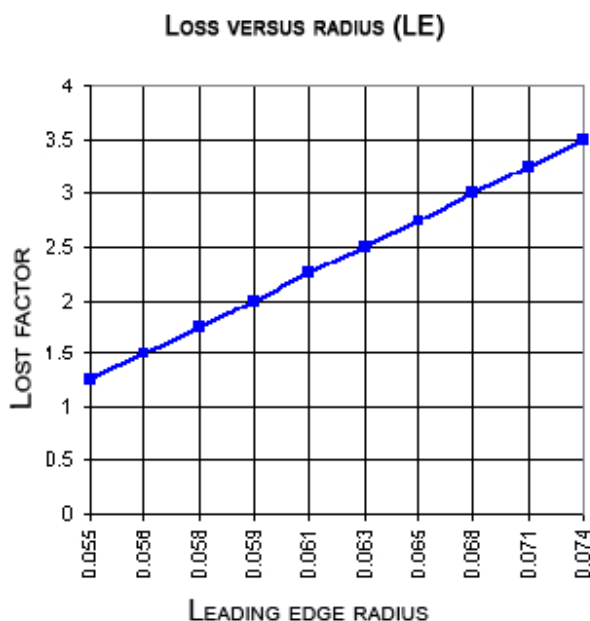
Задача оптимального профилирования длинных лопаток заключается в следующем: нужно сконструировать оптимальный профиль решетки, учитывая минимумы аэродинамических потерь с заданными геометрическими характеристиками, которые задают параметры проектирования на входе/выходе потока и соответствуют ограничениям прочности.

6.1 Начальные данные для проектирования профиля длинной лопатки:

- График проточной части турбины/ступени в меридиональной плоскости с заданной длиной хорды и количеством лопаток;
- Результаты аэродинамического расчета:
 - A_0, B_1 – угол входа потока;
 - A_1, B_2 – угол выхода потока;
 - t_n, t_b – шаг решетки;
 - a_n, a_b – горло решетки.
- Закон изменения напряжений от центробежной силы, который определяется расчетчиком в зависимости от применяемых материалов. Для лопаток последних ступеней выбор напряжений целесообразно начинать исходя из формы лопатки близкой к телу равного сопротивления.

Основополагающим принципом выбора геометрических параметров является обеспечение условий прочности с учетом аэродинамических требований. Особое внимание уделяется построению плавных обводов рабочей части лопатки, что может быть реализовано плавным изменением геометрических параметров в меридиональном направлении.

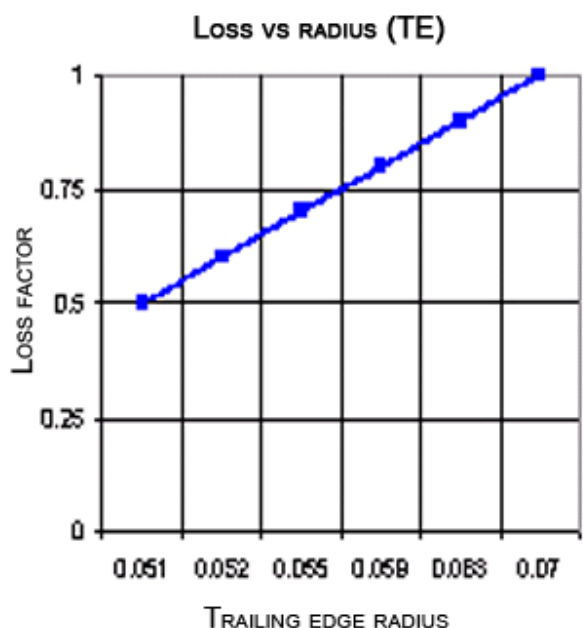
Приводимые ниже величины геометрических параметров носят исключительно рекомендательный характер. Выбор окончательных значений зависит от прочностных и аэродинамических характеристик профилей сечений рабочей части при сохранении плавности изменения параметров по высоте лопатки.



Радиус входной кромки выбирается с учетом ряда факторов. Профили с тонкой входной кромкой более экономичны на расчетных режимах, но неустойчивы, с точки зрения аэродинамики, на переменных режимах. В этом случае потери возрастают.

Увеличение радиуса входной кромки (толщины) приводит к увеличению стойкости профиля, к отклонениям потока, что характерно для нерасчетных режимов. Однако следует учитывать, что КПД на расчетном режиме может уменьшиться. Таким образом, радиус кромки следует задавать с учетом режимных факторов работы ступени. При этом необходимо обеспечивать плавное уменьшение толщины входной кромки от корневого сечения к периферийному.

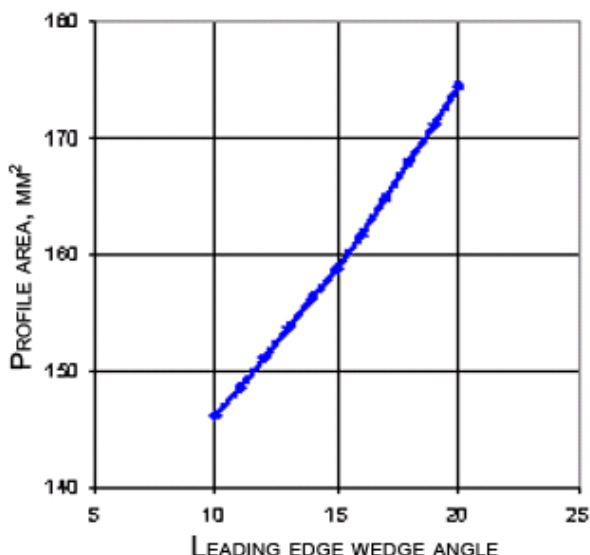
Рекомендуемая толщина входной кромки, с точки зрения аэродинамики, может быть определена из условия $\delta_1 = (0,015-0,08)b$, где b – величина хорды (2,5-3,5 мм для корневого сечения и 1,25-1,5 мм для периферийного сечения).



Радиус выходной кромки выбирается минимальным, с целью уменьшения кромочных потерь. При сходе с выходных кромок профиля, поток отрывается. В результате отрыва за выходной кромкой возникают вихри, которые образуют начальный участок кромочного следа. Взаимодействие между кромочным следом и ядром потока приводит к выравниванию поля потока за решеткой. Статическое давление потока увеличивается, а средняя скорость уменьшается. В результате возникают потери кинетической энергии. Эти потери аналогичны потерям при внезапном расширении. Толщина выходной кромки должна плавно уменьшаться от корневого сечения к периферийному и

может быть определена как $\delta_2 = (0,005-0,02)b$, где b – величина хорды. (2,0-2,2 – для корневого сечения и 1,1-1,25 для периферийного сечения).

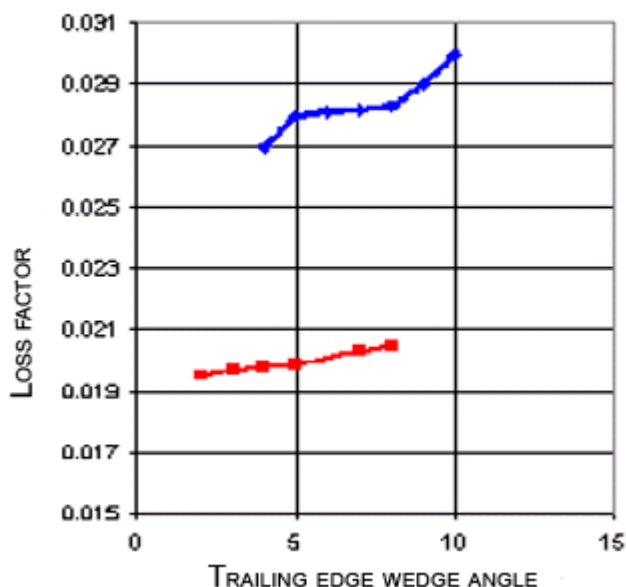
PROFILE AREA VS LEADING EDGE WEDGE ANGLE

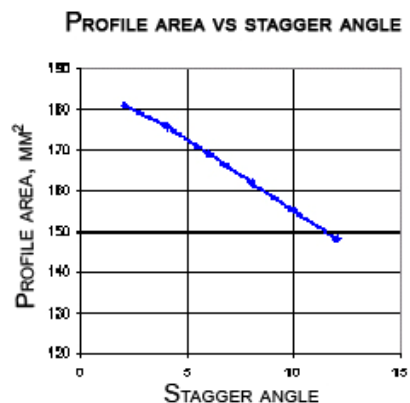
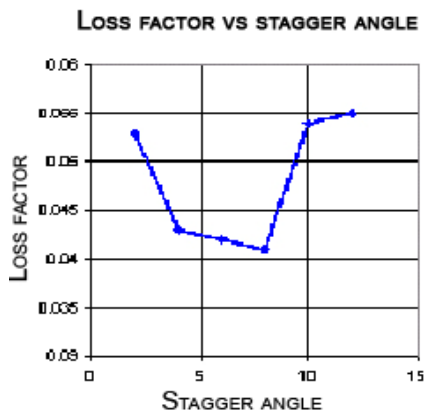


Угол заострения входной кромки, который может варьироваться, оказывает существенное влияние на формообразование и устойчивость работы профиля на нерасчетных (переменных) режимах работы. Увеличение угла приводит к увеличению площади профиля, снижает чувствительность профиля к изменению угла атаки на переменных режимах.

Угол заострения выходной кромки, как правило, оказывает существенное влияние на величину кромочных потерь, особенно для профилей с относительно толстой выходной кромкой, что характерно для корневых сечений рабочих лопаток. При больших значениях угла заострения заметно возрастают потери в решетке в связи с неравномерностью поля скоростей на выходе из нее. Величина угла заострения выходной кромки должна быть в пределах 6-10° для корневых сечений (график синего цвета) и 2-6° для периферийных сечений (график красного цвета).

LOSS FACTOR VS WEDGE ANGLE (TE)

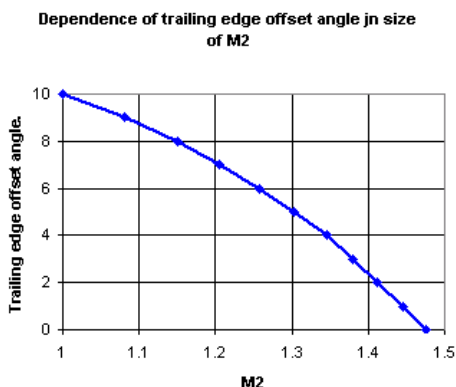




Угол установки профиля оказывает решающее значение на прочностные (площадь, жесткость) и аэродинамические (коэффициент потерь, расхождение канала) характеристики профиля. Увеличение угла установки приводит к уменьшению ширины и площади профиля, при этом происходит увеличение расхождения канала.

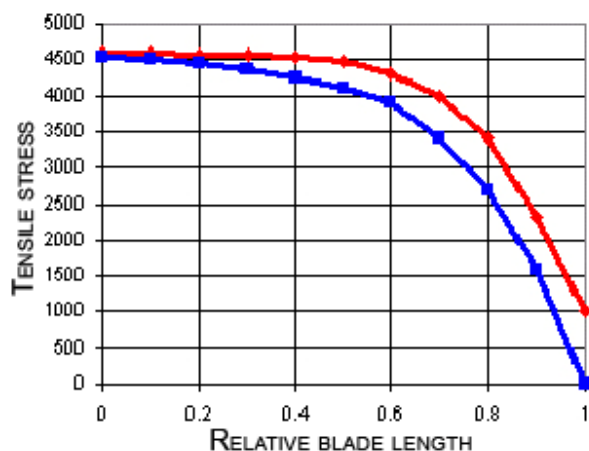
Геометрический угол входа определяет угол атаки $\Delta\beta_1 = \beta_{1g} - \beta_1$, который должен выбираться в пределах от -2° до -6° для реактивных редких решеток с относительно большим шагом и малым радиусом входной кромки, что характерно для периферийных сечений рабочих лопаток. Для корневых сечений, где относительно густые решетки с малым шагом и довольно большим радиусом входной кромки, можно допускать положительные углы атаки до $+12^\circ$. При сравнительно большой скорости рабочего тела на входе ($M_{1w} = 0,6-0,7$), решетки профилей корневых сечений рабочих лопаток имеют небольшие потери при положительных углах атаки. Этим пользуются при профилировании решеток для получения равномерно суживающегося межлопаточного канала.

Геометрический угол выхода (β_{2g}) должен быть равен углу потока. Как правило, геометрический угол выхода связан с углом выхода потока и должен быть равен углу выхода потока β_2 или меньше его на $1-1,5^\circ$. Для корневых сечений рабочих и сопловых лопаток можно допустить некоторое превышения β_{2g} над β_2 .



Угол отгиба выходной кромки определяет кривизну выпуклой части профиля. Рекомендуемая величина угла $5-20^\circ$ в зависимости от числа M_2 потока рабочего тела на выходе из решетки (меньшие числа угла соответствуют $M_2 \geq 1$). Однако следует иметь в виду, что у решеток с углом отгиба $\delta_{bTE} \leq 3^\circ$ межлопаточные каналы получаются с малой степенью сужения. Если проектируется решетка предназначенная для работы с числом $M_2 \leq 0,8$, то можно принять $= 12-16^\circ$, для решеток, работающих при числах $M_2 > 1$ значения δ_{bTE} можно выбирать по графику зависимости δ_{bTE} от M_2 .

6.1.1 Формирование длинной лопатки с учетом критериев прочности



Выбор закона распределения площадей сечений по высоте лопатки определяет величину ЦБС и уровень напряжений в рабочей лопатке. Первоначальный выбор площадей профилей сечений целесообразно начинать из формы лопатки близкой к телу равного сопротивления. Этому условию соответствует эллиптический закон распределения напряжений по высоте лопатки. Рабочие лопатки последних ступеней ЦНД выполняются с бандажной полкой, которая определяет напряжения растяжения от ЦБС в периферийном сечении. Исходя из этого,

можно в первом приближении задаться напряжениями в периферийном сечении в пределах $\approx 900-1000 \text{ кг/см}^2$ (красная кривая на графике).

Для безбандажных лопаток напряжения растяжения от ЦБС в периферийном сечении равны 0 (синяя кривая на графике).

Корневое сечение теоретически имеет наибольшие напряжения растяжения от ЦБС, которые ограничиваются прочностными характеристиками применяемого материала. Для последних ступеней ЦНД это предел текучести. Таким образом, допускаемые напряжения для корневого сечения определяются как

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{02}}{k};$$

где k – коэффициент запаса прочности.

По принятым для корневого и периферийного сечений напряжениям строится зависимость распределения напряжений по высоте лопатки. Эти напряжения являются основанием для определения площадей профилей сечений при профилировании.

Т.к. площади сечений однозначно не определены, рекомендуется начинать процесс профилирования в меридиональном направлении, придерживаясь выбранного закона распределения напряжений.

6.1.2 Пример проектирования длинной лопатки

Проектирования корневого сечения

Профили сечений корневой зоны (0-0,3 по высоте лопатки) рабочих лопаток последних ступеней отличаются малыми шагами. Разность углов входа и выхода $\beta_1 - \beta_2 = 5-20^\circ$, что определяет малое расхождение канала $O'_2 / O_2 = 1.0-1.15$. Значения скоростей M_{w2} находится в пределах 0,6-1,1.

Профилирование начинается с загрузки профиля в окно **Профилирования**. При этом происходит автоматическое построение профиля по ранее рассчитанным данным. Первый шаг – построение и оптимизация профиля по заданным параметрам с учетом площади

сечения. Площадь профиля фиксируется, после чего проводится оптимизация по минимуму кривизны и минимуму профильных потерь.

Тот же результат может быть получен путем ручного профилирования, сущность которого заключается в ручном задании и редактировании параметров решетки. При этом необходимо контролировать характер распределения скорости по выпуклой стороне профиля. Кривая распределения скорости (и, соответственно, давления) дает представление о степени расхождения межлопаточного канала.

Изменяя геометрические параметры профиля, следует добиться построения канала расхождения при заданной площади сечения. Изменяя параметры профилирования необходимо следить за тем, чтобы угол отгиба выходной кромки δ_{bTE} был больше угла заострения выходной кромки ω_{b2} , рис. 56.

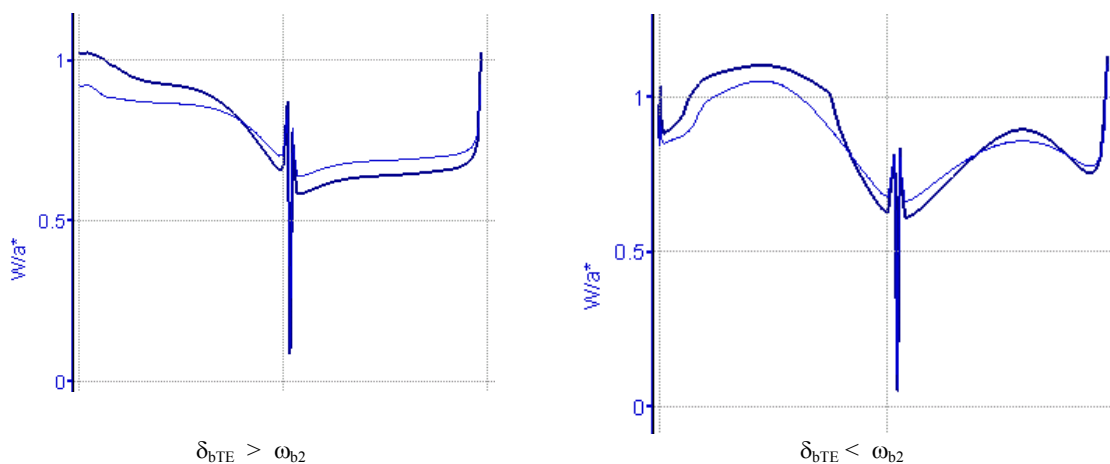
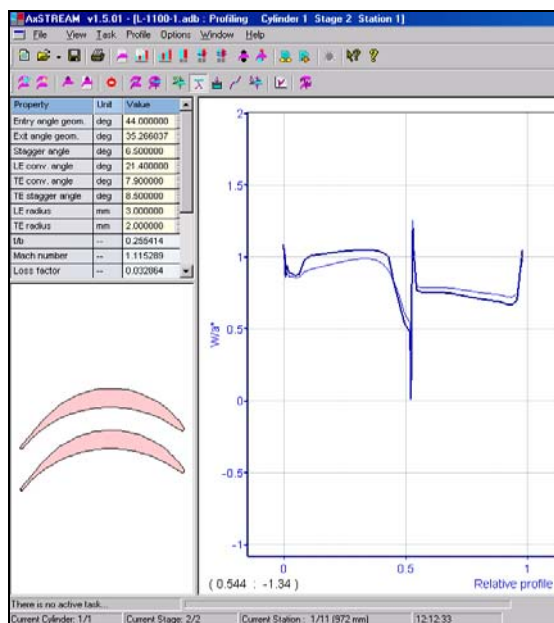
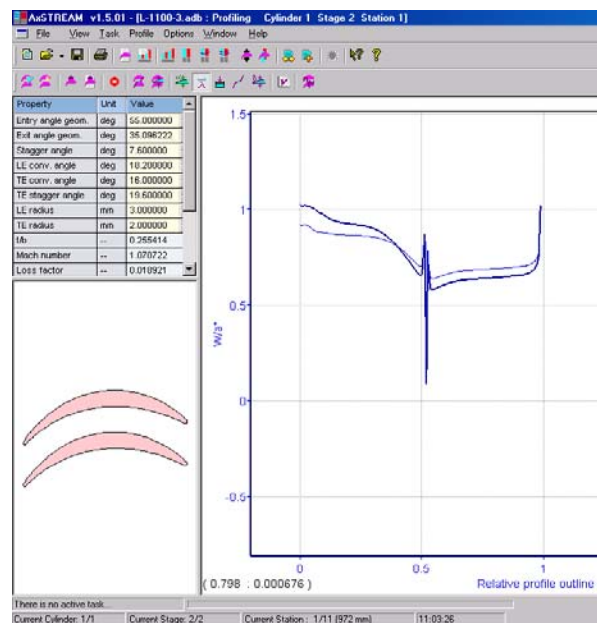


Рисунок 63. Зависимость характера обтекания от разности углов ($\delta_{bTE} - \omega_{b2}$)

В значительной степени облегчает задачу построения канала расхождения изменение угла атаки. Положительный угол атаки $\Delta\beta_1 > 0$ обеспечивает получение канала расхождения. На рисунке показано распределения скоростей по обводу профиля при различных углах атаки. При $\Delta\beta_1 = 0$ скорость на выпуклой части падает к выходной кромке, что говорит о торможении потока из-за расширения канала. Коэффициент потерь при этом составляет 0,032864. При $\Delta\beta_1 = 5$ скорость на выпуклой стороне профиля постоянно возрастает, что характерно для суживающегося канала. Коэффициент потерь в этом случае равен 0,018921.



Профиль корневого сечения с $\Delta\beta_1 = 0$



Профиль корневого сечения с $\Delta\beta_1 = +5^\circ$

Рисунок 64. Зависимость распределения скорости по выпуклой стороне профиля от угла атаки

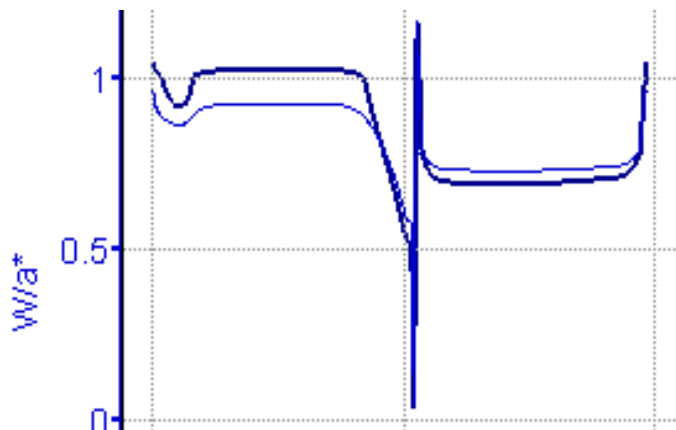


Рисунок 65.

При углах $\beta_1 \approx \beta_2$ или с разницей $10-15^\circ$ даже при положительных углах атаки, не всегда возможно получение канала расхождения при заданной площади сечения. Для корневых сечений допускается канал с 0 расхождением, т.е. постоянного проходного сечения.

Местное расширение канала в пределах $\approx 5\%$ в районе максимальной кривизны выпуклой стороны профиля не приводит к увеличению потерь в решетке, а в активных каналах с большим углом поворота потока $110^\circ - 120^\circ$ на околозвуковых и сверхзвуковых скоростях даже уменьшает их. На графике распределения скоростей по обводу профиля, рис. 58, линия постоянной скорости соответствует каналу постоянного сечения (расхождение канала равно 0).

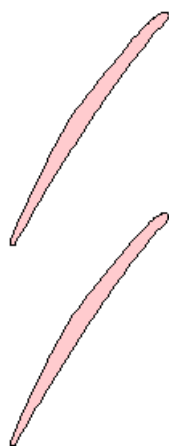
Построение профиля в среднем сечении

Средняя часть рабочей лопатки является оптимальной с точки зрения аэродинамических характеристик. Здесь наблюдается достаточное расхождение канала, оптимальный шаг, и углы входа близки к 90°.

При загрузке профиля, в окне проектирования происходит автоматическое построение. Анализ полученного профиля показывает, что конфигурация (кривизна выпуклой стороны профиля) и площадь профиля не удовлетворяют выбранным критериям.

Property	Unit	Value
Entry angle geom.	deg	101.600000
Exit angle geom.	deg	28.132000
Stagger angle	deg	56.000000
LE conv. angle	deg	25.000000
TE conv. angle	deg	6.000000
TE stagger angle	deg	16.000000
LE radius	sm	0.211500
TE radius	sm	0.157000

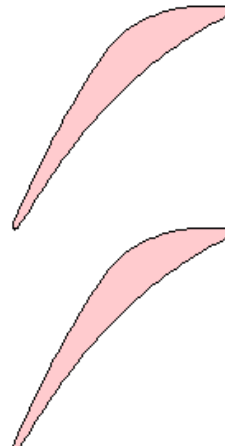
Изменяемые геометрические параметры
исходного профиля



Площадь профиля – 9,239 см²
Конфигурация исходного профиля

Property	Unit	Value
Entry angle geom.	deg	101.600000
Exit angle geom.	deg	28.132000
Stagger angle	deg	45.390000
LE conv. angle	deg	31.083000
TE conv. angle	deg	6.466000
TE stagger angle	deg	7.633000
LE radius	sm	0.211800
TE radius	sm	0.157000

Изменяемые геометрические параметры
спроектированного профиля



Площадь профиля – 16,256 см²
Конфигурация спроектированного профиля

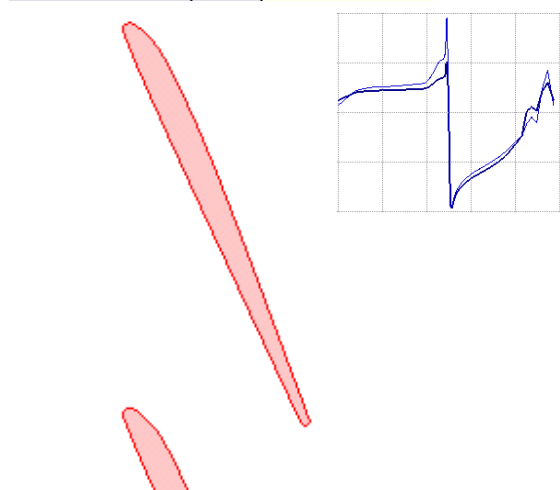
Рисунок 66. Сравнение конфигураций исходного и спроектированного профилей

Величина площади зависит от многих геометрических параметров профиля, из которых наиболее существенное влияние оказывает угол установки. Уменьшение угла приводит к увеличению площади, ширины, максимальной толщины профиля. Изменение ширины, толщины профиля обуславливает увеличение жесткости профиля.

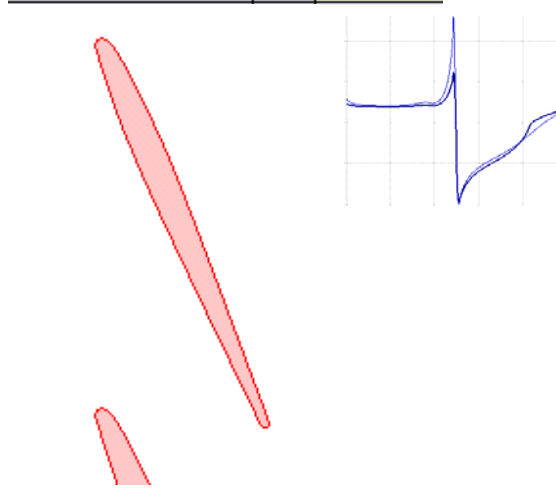
При проектировании высоконапряженных ступеней, изгибающие напряжения в зоне 0,7-0,85 становятся настолько большими, что в некоторых сечениях для увеличения момента сопротивления W_{min} ($\beta_{lg} \ll \beta_1$) приходится искусственно “сгибать профиль”. Такое положение входной части профиля не всегда удовлетворяет требованиям аэродинамики. В подобных случаях рациональнее применять двояковыпуклые профили. Формирование двояковыпуклого профиля достигается увеличением геометрического угла выхода (β_{2g}), угла заострения входной кромки и угла установки профиля. Преимуществом такого профиля является возможность менять положение центра масс профиля.

Property	Unit	Value
Entry angle geom.	deg	139.943510
Exit angle geom.	deg	22.573213
Stagger angle	deg	65.566000
LE conv. angle	deg	37.021871
TE conv. angle	deg	4.680877
TE stagger angle	deg	5.020578
LE radius	mm	1.983000
TE radius	mm	1.314000

Property	Unit	Value
Entry angle geom.	deg	144.000000
Exit angle geom.	deg	23.000000
Stagger angle	deg	66.980000
LE conv. angle	deg	40.000000
TE conv. angle	deg	5.500000
TE stagger angle	deg	5.600000
LE radius	mm	1.983000
TE radius	mm	1.314000



Стандартный профиль
Площадь профиля – 8,63 см²
Хсм 29,6 мм
Усм 68,0 мм



Двояковыпуклый профиль
Площадь профиля – 8,63 см²
Хсм 28,4 мм
Усм 65,8 мм

Рисунок 67. Сравнение стандартного и двояковыпуклого профилей

Построение периферийного профиля

Для периферийных сечений (высота лопатки 0,8-1,0) характерны большие числа Маха (в некоторых ступенях $M_{w2}=1,7-2$), небольшие углы атаки, углы входа 140-170°, большой шаг и малая площадь сечений.

Периферийные сечения рабочих лопаток предельной длины не попадают в диапазоны достоверности применяемых эмпирических оценок основных параметров решеток. Особенно критично это в отношении угла установки профиля. Некорректный выбор угла установки приводит к искажению профиля при загрузке в окно проектирования. При самопересечении кривой, описывающей выпуклую или вогнутую части профиля, происходит автоматическое отключение отображения графиков.

Первый шаг при профилировании периферийного сечения получение профиля без искажений кривизны выпуклой и вогнутой части профиля. Для уменьшения или устранения искажения необходимо изменять угол установки и угол отгиба выходной кромки, таким образом, чтобы получить стандартную форму профиля, рис. 61.

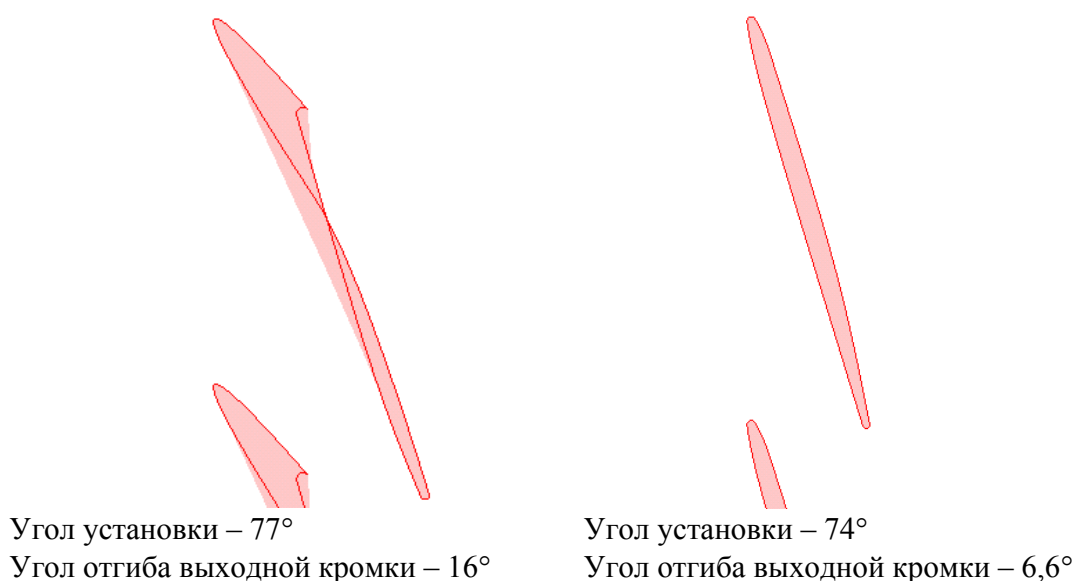


Рисунок 68. Устранение искажений профиля за счет изменения углов

Следующий шаг – построение профиля, соответствующего требованиям прочности и плавности обводов рабочей части. Это можно достичь путем изменения геометрических параметров и использования двояковыпуклых профилей для обеспечения статической и динамической прочности в периферийных сечениях.

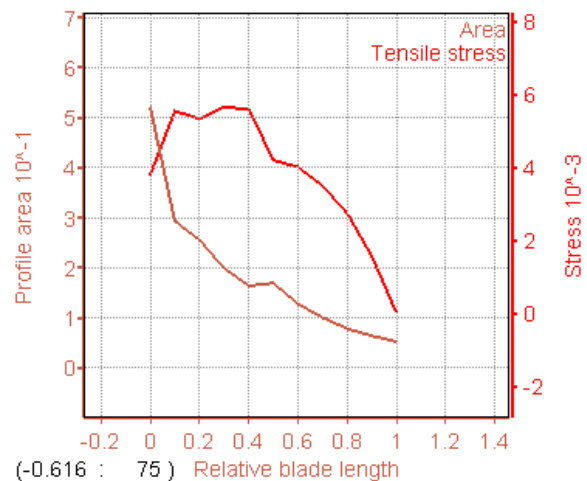
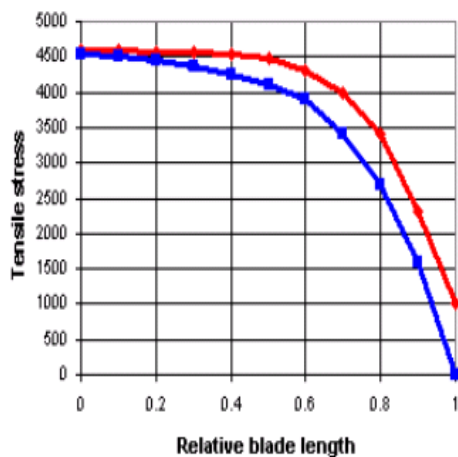
Профилирование с учетом распределения напряжений по высоте лопатки

Как и для предыдущего варианта, профилирование сечений рабочей части предпочтительнее начинать с периферийного сечения, поскольку это способствует повышению прочностных характеристик всей лопатки.

Для лопаток без полочного бандажа рекомендуется задаваться площадью в пределах $\approx 5,2-5,4 \text{ см}^2$. Для лопаток с периферийным полочным бандажом уровень напряжений растяжения от ЦБС определяется бандажной полкой и находится в пределах $\approx 900-1000 \text{ кг/см}^2$, что соответствует площади периферийного сечения ($\approx 5,2-5,4 \text{ см}^2$)

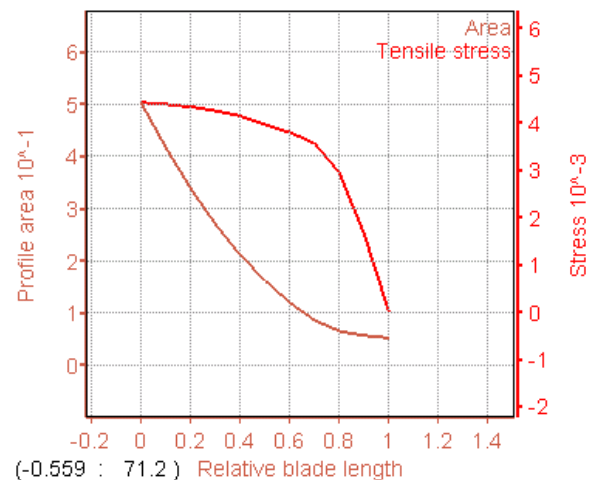
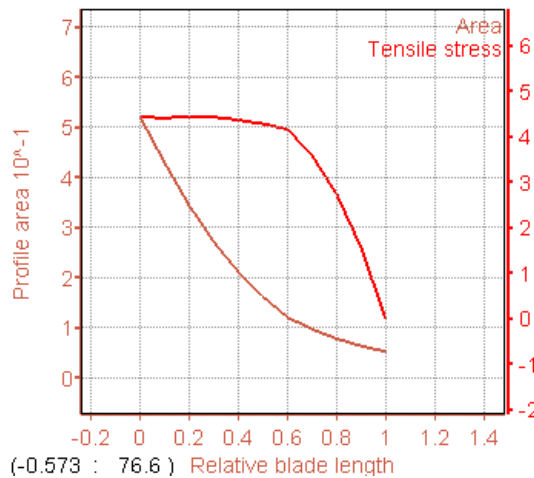
Построив периферийный профиль на заданную величину площади или напряжений растяжения от ЦБС, следует перейти к корневому сечению, а затем к остальным сечениям, двигаясь в меридиональном направлении.

На рисунке 62 приведены графики распределения напряжений по высоте лопатки последней ступени ЦНД паровой турбины на 3000 об/мин. в процессе профилирования.



Теоретический (выбираемый конструктором) закон распределения напряжений растяжения от ЦБС по высоте лопатки
Красная кривая – для лопаток с полочным бандажом
Синяя кривая – для лопаток без полочного бандажа

Характер распределения напряжений растяжения от ЦБС по высоте лопатки (график красного цвета) и площади сечений (график коричневого цвета) после профилирования 6-и сечений, начиная с периферийного, в AxSTREAM

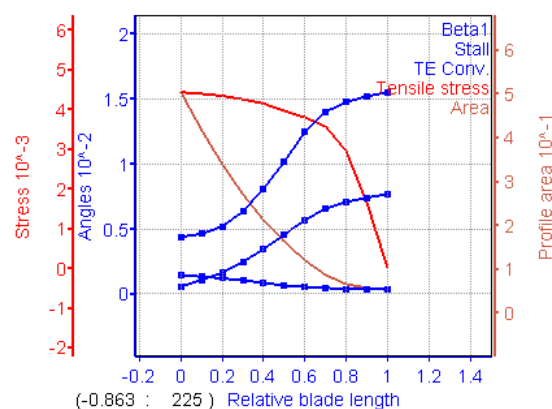
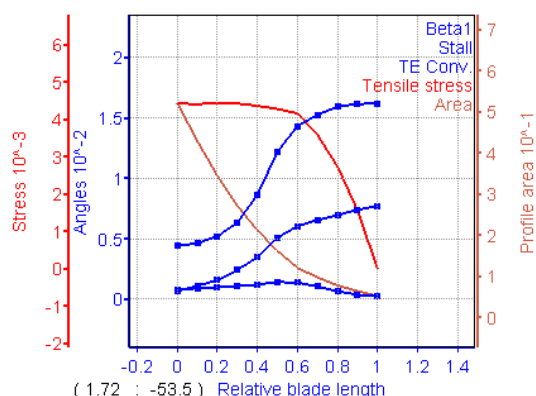


Характер распределения напряжений растяжения от ЦБС по высоте лопатки (график красного цвета) и площади сечений (график коричневого цвета) после профилирования

Характер распределения напряжений растяжения от ЦБС по высоте лопатки (график красного цвета) и площади сечений (график коричневого цвета) после корректировки плавности распределения геометрических характеристик в меридиональном направлении

Рисунок 69. Распределение напряжения и площади сечений

Выбранный уровень напряжений не является окончательным и может варьироваться в пределах 2-5%%. При этом величина полученных напряжений не должна превышать уровень допустимых, и кривые распределения напряжений растяжения от ЦБС и площади сечений должны иметь плавный характер. Изменение конфигурации профиля в процессе профилирования осуществляется путем изменения геометрических параметров профиля. Для обеспечения плавности профильной части необходимо, чтобы графики изменений геометрических характеристик имели монотонный характер. Для этого после получения профилей сечений, обеспечивающих допустимый уровень напряжений растяжения от ЦБС необходимо проконтролировать плавность распределения геометрических характеристик. AxSTREAM позволяет изменять характер графиков в интерактивном режиме с одновременным контролем уровня напряжений растяжения от ЦБС.



Графики распределения геометрических характеристик после профилирования по выбранному закону распределения напряжений

Те же графики после коррекции

Рисунок 70. Графики распределения геометрических характеристик до и после коррекции

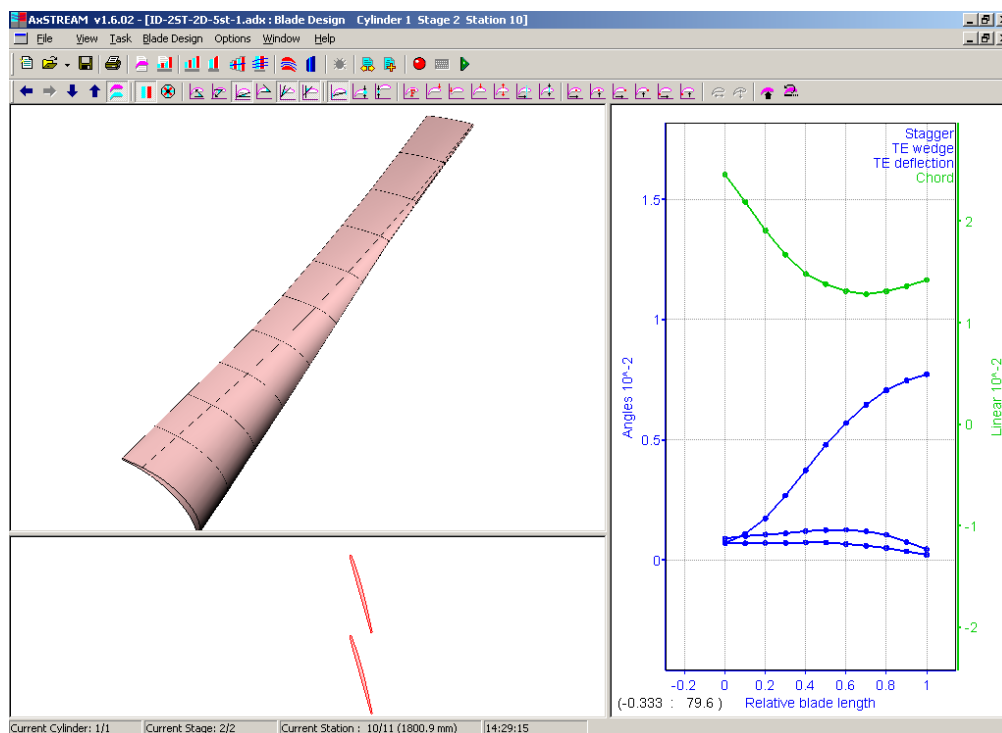


Рисунок 71. Рабочая лопатка последней ступени ЦНД, спроектированная в системе AxSTREAM (Длина лопатки = 1100 мм)