

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МАМИ»

Л. В. Виноградов

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ЛОПАТОК ТУРБИН**

Учебное пособие для студентов, обучающихся по
специальности 14050365 и направлению 14050065

Одобрено методической комиссией по специальности
140503.65 «Газотурбинные, паротурбинные установки и двигатели»

Москва
2010

УДК:621.436.7
ББЛ

Разработано в соответствии с Государственным образовательным стандартом ВПО 2000 года для специальности подготовки 140503.65 “Газотурбинные, паротурбинные установки и двигатели” на основе рабочей программы дисциплины «Основы САПР»

Рецензенты: д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теплотехника и тепловые двигатели» Российского университета дружбы народов С.В. Гусаков;

к.т.н., профессор кафедры «Транспортные газотурбинные двигатели» МГТУ «МАМИ»
М.В. Эммиль

Работа подготовлена на кафедре “Транспортные газотурбинные двигатели”

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛОПАТОК ТУРБИН: учебное пособие /Л.В. Виноградов. – М.: МГТУ «МАМИ», 2010. – 88 С

В работе приведены пакеты прикладных программ (ППП) для проектирования профилей турбинных лопаток и решеток методом парабол. Программы организованы в системы автоматизированного проектирования (САПР), которые построены по модульному принципу.

В работе решается основная задача проектирования – разработка вновь создаваемых профилей лопаток турбин на основе параболы, как огибающей серии касательных. Построения турбинных профилей осуществляется при различных граничных условиях. Все программные модули даны в тестовом режиме, что существенно облегчает отладку программ и помогает пониманию процесса проектирования элементов турбин.

УДК: 621.436.7
ББК

© Л.В. Виноградов, 2010
© МГТУ “МАМИ”, 2010

Содержание

	стр.
ВВЕДЕНИЕ	4
1 Основные геометрические параметры профиля и решетки профилей	4
Параметры одиночного профиля	4
Параметры решетки профилей	6
Основные направления в профилировании лопаток	8
Влияние относительного шага (густоты решетки)	11
Построение профилей лопаток турбин	12
2 Способы построения профилей турбомашин	15
Построение профиля методом парабол	16
Алгоритм построения профиля реактивной лопатки	17
Программа построения расчетной схемы метода парабол	20
Программа построения параболы	29
3 Программа построения профиля лопатки с параболической спинкой и корытцем в виде окружности одного радиуса	33
Подпрограмма расчета максимальной толщины профиля	44
Определение основных геометрических характеристик профиля лопатки	47
Конфузорность канала решетки профилей	52
Построение треугольников скоростей	57
Построение элементарной ступени турбины	59
4. Построение профиля заданной толщины	61
5. Построение двухпараболической спинки профиля	73
6. Профиль активной дозвуковой решетки (корневое сечение реактивной лопатки)	77
ЛИТЕРАТУРА	87

ВВЕДЕНИЕ

Создание высокоэффективных газовых турбин требует тщательного профилирования элементов проточной части: неподвижных лопаточных венцов – сопловых аппаратов и подвижных – рабочих колес [1].

Для инженерных целей успешно используется представление о том, что на значительной части высоты проточной части (исключая области вблизи ее радиальных границ) течение в проточной части можно рассматривать как плоское (двумерное). Это дает возможность ввести в теорию газовых турбин понятие «элементарной ступени» и использовать для анализа такой ступени данные о профильных потерях, получающиеся при экспериментальном исследовании плоских турбинных решеток.

Использование результатов таких исследований (продувок плоских решеток) позволяет создавать лопаточные венцы высокой эффективности. Для этого требуется правильный выбор параметров отдельных элементарных ступеней с учетом изменения параметров по радиусу (высоте лопатки) и особенностей трехмерного потока в проточной части.

Выбор параметров отдельных элементарных ступеней основывается на изучении особенностей течения в плоских решетках и факторов, влияющих на потери в них, а следовательно и на КПД ступени.

1. Основные геометрические параметры профиля и решетки профилей

Параметры одиночного профиля

Проточная часть соплового аппарата или рабочего колеса элементарной ступени представляет собой решетку, т.е. определенную периодическую совокупность одинаковых профилей.

На рис. 1. представлен одиночный профиль с обозначением его основных параметров.

Осевой дугой или осевой линией профиля называется линия, равно удаленная от выпуклой (спинка) и вогнутой (корыто) частей профиля. Она представляет собой геометрическое место центров окружностей, вписанных в профиль (рис. 1).

Прямая, соединяющая наиболее удаленные точки осевой линии, называется хордой. (Возможно и иное определение хорды, но их величины и направление во всех случаях практически совпадают. Часто это зависит от

конкретной расчетной схемы профиля, по которой разрабатывается математическая модель контура.)

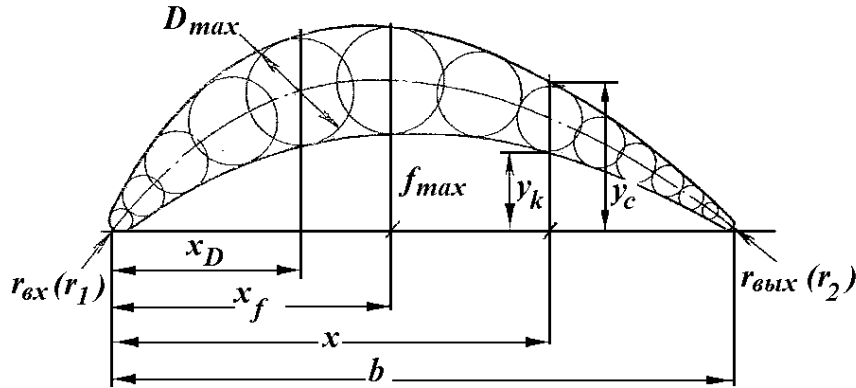


Рис. 1. 1. Основные параметры одиночного профиля

Профиль часто задается двумя координатами его точек: абсциссой – x , отсчитываемой по хорде, обычно от входной части к выходной, и ординатами вогнутой y_k (корыта) и выпуклой y_c (спинки) частей.

Обычно профиль характеризуется относительными значениями его основных параметров, иногда определяемыми в процентах:

а) относительная абсцисса

$$\overline{x} = \frac{x}{b};$$

б) относительные ординаты

спинки
$$\overline{y_c} = \frac{y_c}{b},$$

корыта
$$\overline{y_k} = \frac{y_k}{b};$$

в) относительная толщина профиля

$$\overline{D} = \frac{D_{\max}}{b};$$

(В литературе иногда относительная толщина обозначается \overline{c} .)

г) относительная вогнутость (кривизна) профиля

$$\overline{f} = \frac{f_{\max}}{b};$$

д) относительная абсцисса места максимальной толщины профиля

$$\overline{b_D} = \frac{x_D}{b};$$

е) относительная абсцисса места максимальной вогнутости

$$\overline{b_f} = \frac{x_f}{b}.$$

В практике проектирования встречаются различные формы входной части профиля (носка). Чаще всего носовая часть профиля характеризуется радиусом скругления профиля на входе $r_{\text{вх}}$ (или r_1).

Формы выходного участка профиля также могут выполняться различным способом. В большинстве случаев – это скругленная выходная кромка.

Параметры входной и выходной кромок в виде дуг окружностей также могут задаваться относительными величинами:

$$\overline{r_1} = \frac{r_1}{b}, \quad \overline{d_2} = \frac{d_2}{b},$$

где $d_2 = 2r_2$.

Если профиль образуется сопряжением дуг окружностей и прямых линий, то его очертания могут задаваться координатами центров окружностей, их радиусами и координатами точек сопряжения.

Параметры решетки профилей

Линия, соединяющая соответственные точки профилей, называется фронтом решетки (различают обычно передний или входной и задний или выходной фронт решетки). Нормаль к фронту называется осью решетки.

Если фронт решетки – прямая линия, решетка называется прямолинейной (рис. 2). На рис. 2 показаны параметры решетки рабочего колеса в относительном движении. (Решетка соплового аппарата в принципе аналогична, и должна рассматриваться в абсолютном движении с индексами, соответствующими расчетным сечениям турбины.)

Прямолинейные решетки получаются развертыванием элементарной ступени осевой турбомашин на плоскость и рассматриваются в теории осевых турбомашин.

Если фронт решетки окружность – решетка называется круговой (радиальной). Такие решетки характерны для радиальных турбомашин и рассматриваются в теории радиальных турбомашин.

Известно, что прямолинейная решетка полностью определяется, если заданы шаг решетки t – расстояние по фронту между соответственными точками соседних профилей, форма профиля и угол γ установки профиля в решетке (установочный угол).

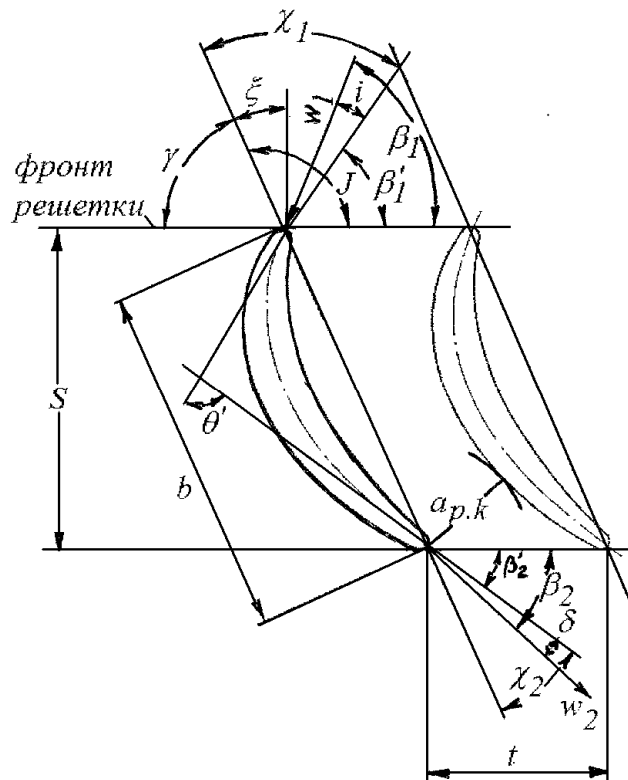


Рис. 1. 2. Геометрические параметры рабочей решетки

Профиль в рабочей решетке (рис.1. 2) характеризуется следующими углами:

χ_1 и χ_2 - углы изгиба входной и выходной кромок профиля, образуемые направлением хорды и соответствующими касательными к средней линии профиля;

γ - угол выноса (угол установки профиля), образуемый направлением хорды и фронтом решетки;

β_1 - угол потока на входе в решетку;

β_2 - угол потока на выходе из решетки;

β'_1 и β'_2 - входной и выходной углы профиля, образуемые соответствующими касательными к средней линии профиля и фронтом решетки;

θ' - угол кривизны, или угол изгиба профиля; для турбин $\theta = \chi_1 + \chi_2$;

i - угол атаки; $i = \beta'_1 - \beta_1$;

δ - угол отставания потока на выходе из решетки; $\delta = \beta_2 - \beta'_2$.

Для профилей и решетки неподвижного аппарата углы потока и профиля обозначаются буквами α с соответствующими индексами.

Решетки характеризуются следующими параметрами:

s - ширина решетки (иногда обозначается буквой B);

t - шаг решетки, равный расстоянию между двумя одноименными точками соседних профилей;

$\frac{b}{t}$ - густота решетки (обратная величина называется относительным шагом);

$\Delta\beta$ – угол отклонения потока в рабочей решетке, образованный векторами скоростей w_1 и w_2 ;

$\Delta\alpha$ – угол отклонения потока, образованный векторами скоростей c_0 и c_1 в сопловом аппарате турбины.

Углы отклонения потока в турбинной решетке, как правило, существенно больше, чем в решетке компрессорной. В турбинной решетке отклонение составляет в среднем $\Delta\alpha = 50^\circ - 80^\circ$.

Турбинные решетки реактивного типа имеют непрерывно сужающиеся каналы, а активного типа составлены из более изогнутых и утолщенных профилей, образующих каналы с приблизительно постоянным проходным сечением.

Основные направления в профилировании лопаток

При создании контура лопаток принципиально надо уменьшать разрывы в кривизне [3].

В каждой точке линии тока плоского потенциального потока справедливо соотношение

$$\frac{\partial c}{\partial n} = -\frac{c}{r};$$

здесь r – радиус кривизны линии тока, в то время как $\frac{\partial c}{\partial n}$ – производная скорости в направлении нормали. Это отношение следует из условия безвихревого движения.

Если образовать ограничивающую стенку из дуг окружностей с радиусами r_1 и r_2 , соприкасающиеся друг с другом и имеющих общую касательную, то тогда в месте перехода правый член уравнения разрывно изменяется с $-\frac{c}{r_1}$ на $-\frac{c}{r_2}$. Поэтому в точке сопряжения дуг окружностей

$\frac{\partial c}{\partial n}$ также должна принимать два разных значения, что, однако, невозможно.

При сильном разрыве радиуса кривизны возможен значительный местный градиент давления. Это неблагоприятное поле давлений будет влиять на пограничный слой и может вызвать местный отрыв потока.

В силу того, что точный расчет течения вблизи скачка кривизны достаточно затруднителен для оценки влияния разрыва, то наиболее надеж-

ный путь – принципиальное уменьшение разрывов кривизны обвода профиля лопатки.

Турбинные решетки почти всегда имеют настолько малый шаг, что профиль никогда нельзя рассматривать сам по себе; напротив, форма профиля вообще должна разрабатываться в связи с соседним профилем. Сначала проектировать профиль и затем создавать из него решетку – такой путь здесь нельзя рекомендовать. В большинстве случаев надо исходить из рассмотрения канала [3].

Наилучший способ состоит в свободном проектировании, причем наряду с требованиями аэродинамики нужно принимать во внимание также требования технологии и механической прочности. Задача, правда, состоит в том, чтобы из этой примерной (эскизной) формы получить точную (окончательную) форму.

При профилировании необходимо, насколько это возможно, избегать местного повышения скорости и резкого повышения давления. Канал надо выполнять непрерывно сужающимся. Особенно важно формирование носика профиля, который должен быть нечувствителен к изменению направления входа. Это требование надо выполнять даже у облопачивания, которое не меняет режима работы. Это объясняется тем, что в краевых зонах скорости по величине и направлению всегда существенно отклоняются от предположенных по расчету, отчего краевые потери будут тем меньше, чем менее чувствителен профиль к изменению направления потока.

Иногда считают, что эта нечувствительность всегда обеспечивается носиком профиля с большим радиусом кривизны (скругления). Это справедливо только тогда, когда одновременно с этим закругленная входная часть производит сильное поджатие потока и переход к спинке профиля может происходить с относительно мало изменяющейся кривизной (рис.1.3, *г*). Вообще входную часть надо профилировать, чтобы при значительном изменении направления потока все же не возникало большого местного повышения давления.

На рис.1.3 показано шесть решеток, причем каждая пара решеток спроектирована для одинаковых условий по углам входа и выхода, левая – неблагоприятно, правая – удачно.

Решетка (*а*) – классическая турбинная решетка равного давления (активная рабочая решетка), составленная из прямых и дуг окружностей; неудовлетворительная, так как имеет сильные разрывы кривизны, отрыв на стороне разрежения в выходном участке; также, очевидно, плох вход в канал.

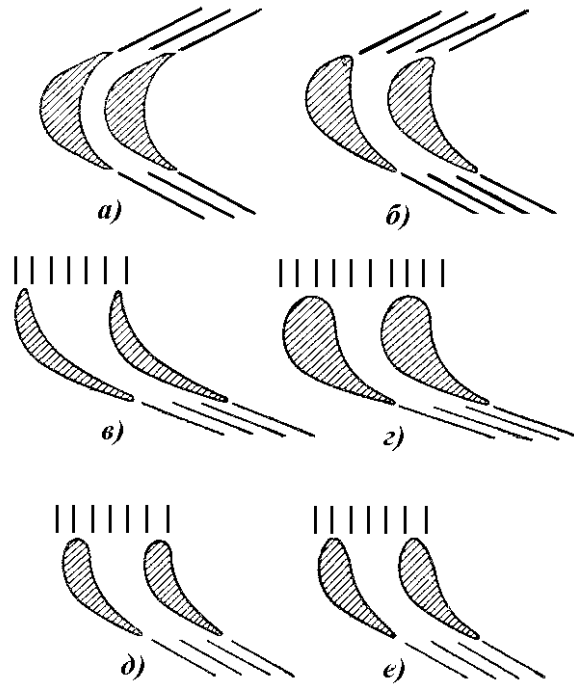


Рис.1. 3. Примеры форм профилей турбинных решеток

Решетка (б) спроектирована для тех же условий, что и (а), однако имеет непрерывное изменение кривизны, хороший выходной участок на стороне разрежения. Форма носика благоприятна, так как в широком диапазоне изменения угла натекания во входной части с обеих сторон профиля поток ускоряется. При относительно остром носике точка повышенного давления при различных направлениях натекания лишь немного смещается, благодаря чему возникает только местный эффект. Имеет место только сильное уменьшение скорости в зоне справа от передней точки повышенного давления. Но это уменьшение скорости несущественно, так как оно происходит в пространстве, а не вдоль профиля. Оно ощутимо только на боковых стенках, где, однако, может вызывать только несущественные потери.

Профиль (в). Решетка с перпендикулярным входом и пологим выходом (например, решетка направляющего аппарата). Благодаря сильному ускорению благоприятна, но все же не оптимальна, так как достаточно тонкая. Поэтому ни острым носиком, как показано, ни закругленным носиком нельзя достичь нечувствительности к изменению направления потока на входе.

Профиль (г). Решетка спроектирована для тех же условий, что и (в), но более благоприятна, так как имеет более толстый профиль. При сильно закругленном носике происходит мощное сужение канала и слабое изменение кривизны, благодаря чему решетка нечувствительна к изменению направления натекания.

Профиль (д). Перпендикулярный вход и относительно крутой выход (решетка газовой турбины). Закругленный носик неудачен, так как закругление не может быть сделано достаточно большим (иначе оставшаяся часть канала будет расширяющейся); отсюда неблагоприятное изменение кривизны. Имеется опасность отрыва уже в расчетной точке и тем более при измененном направлении натекания.

Профиль (е). Условия, как у (д), однако острый носик, что здесь лучше, так как ведет к небольшому изменению кривизны. Даже при отклоняющемся угле натекания во входном участке всегда будет ускорение. Местное повышение и снижение скорости возможно только локально в узкой области у выходных кромок.

Влияние относительного шага (густоты решетки)

Одним из параметров, которым необходимо задаваться при профилировании лопаток является относительный шаг решетки.

Как показали многочисленные эксперименты [7], существует значение относительного шага решетки, при котором потери минимальны. Это объясняется тем, что с увеличением шага (при неизменной хорде) уменьшается суммарный периметр профилей и, следовательно, суммарная поверхность трения газа о профили, что и вызывает уменьшение потерь.

В то же время в связи с ростом нагрузки на профили появляются значительные пики в распределении давления, и это обуславливает более ранний отрыв, что ведет к увеличению потерь.

Величина оптимального шага, как показали эксперименты, зависит от угла поворота профиля в решетке, угла установки и типа решетки.

Известна эмпирическая формула, предложенная В.И. Дышлевым:

$$\left(\frac{t}{b}\right)_{opt} = 0,55 \left[\frac{180}{180 - (\beta_1 + \beta_2)} K \right]^{\frac{1}{3}} (1 - \bar{c}),$$

где \bar{c} - относительная толщина профиля;

$$K = \frac{\sin \beta_1'}{\sin \beta_{2\phi}}.$$

В ряде случаев по конструктивным соображениям целесообразно применить более редкие решетки. Эксперименты показали, что при увеличении шага t по сравнению с его оптимальным значением КПД уменьшается менее быстро, чем при таком же уменьшении шага.

Вместе с тем некоторое увеличение относительного шага представляется целесообразным, так как в этом случае при неизменной хорде

уменьшается число лопаток, их суммарная масса, облегчается их крепление. Уменьшение хорды также уменьшает массу турбины.

У современных турбин ТРД (для решеток на среднем радиусе)

$$\left(\frac{t}{b}\right)_{opt.c.a} = 0,8 - 1,0;$$

$$\left(\frac{t}{b}\right)_{opt.p.k} = 0,6 \div 0,8.$$

У активных турбин (например, для привода агрегатов)

$$\left(\frac{t}{b}\right)_{opt.p.k} = 0,5 \div 0,75.$$

Построение профилей лопаток турбин

Предварительное построение профилей лопаток можно производить различными способами [7]. Полученный таким путем профиль следует рассматривать как предварительный, который в дальнейшем корректируется на основе требований к форме межлопаточного канала и к гидродинамически целесообразному распределению скоростей по контуру профиля, т.е. такому, при котором не возникает больших местных градиентов давления, могущих вызвать отрывы потока. Такой способ, хотя и не является наиболее совершенным, но достаточно прост, и это облегчает его применение в учебном процессе.

При построении профилей обычно на начальном этапе задаются рядом параметров, которые помогают получить удовлетворительное начальное решение, которое, как отмечено ранее, в дальнейшем уточняется.

1. Определяется максимальная толщина $\overline{c_{max}}$ и ее координата \overline{x} .
2. Радиус скругления входной кромки $r_1 = (0,2 - 0,3)c_{max}$. Наибольшая величина r_1 определяется так, чтобы диаметр окружности, вписанной в начальную часть канала, был не меньше $(1,05 - 1,1)a$, где a – ширина канала на выходе.
3. Радиус скругления выходной кромки $r_2 = (0,05 - 0,08)c_{max}$ (у корня); $r_2 = (0,08 - 0,15)c_{max}$ (на периферии).

Рекомендуется также r_1 от 1 мм (в периферийных сечениях рабочих лопаток) до 3 мм (в сопловых лопатках и корневых сечениях рабочих лопаток) и $r_2 = 0,3 - 0,08$ мм.

Для построения лопаток рекомендуются следующие максимальные относительные толщины профилей:

а) для лопаток соплового аппарата на всех радиусах

$$\bar{c}_{\max c.a.} = 10\% ;$$

б) для лопаток рабочего колеса турбины:

у корня $\bar{c}_{\max .p.k.вт} = 20 - 30\%$ (большая величина для активных профилей);

на периферии $\bar{c}_{\max .p.k.n} = 4 - 5\%$;

в среднем сечении $\bar{c}_{cp} = 10 - 15\%$.

Окончательный выбор этих величин зависит от высоты лопаток, расчетных напряжений в ней и абсолютной толщины профиля на периферии, которая должна быть не менее 2-3 мм.

Изменение относительной толщин профиля рабочей лопатки от корня к периферии зависит от выбранного закона (линейный или экспоненциальный) изменения площадей поперечного сечения лопатки по радиусу (по высоте).

(Практически обычно применяется закон изменения сечения по высоте лопатки, промежуточный между линейным и экспоненциальным [7].)

При конструировании лопатки соплового аппарата профили, соответствующие различным радиусам, накладываются друг на друга так, что их передние кромки совмещаются (рис.1. 4). При хорде, постоянной по высоте лопатки, осевая ширина лопаток может несколько увеличиваться к периферии ($s > s_{вт}$).

При конструировании лопаток рабочего колеса профили часто совмещаются так, что совпадают центры тяжести сечений лопатки, что предотвращает появление дополнительных напряжений изгиба. Центры масс всех совмещенных профилей должны лежать внутри треугольника со стороной не свыше 2-3 мм. При большом разбросе центров массы необходимо соответственно корректировать форму профилей, соблюдая требования в отношении их газодинамического совершенства.

Иногда при совмещении профилей центры массы их размещают на таком расстоянии от продольной оси лопаточного замка, при котором действие центробежных сил разгружает лопатку полностью или частично от изгибных напряжений, возникающих от действия газовых сил.

После построения двух сечений лопаток на расстоянии шага вычисляется эффективный угол решетки (на всех радиуса) рабочего колеса и соплового аппарата.

$$\beta_{2\phi} = \arcsin \frac{a_{p.k.}}{t_{p.k.}} ;$$

$$\alpha_{1\phi} = \arcsin \frac{a_{c.a.}}{t_{c.a.}} .$$

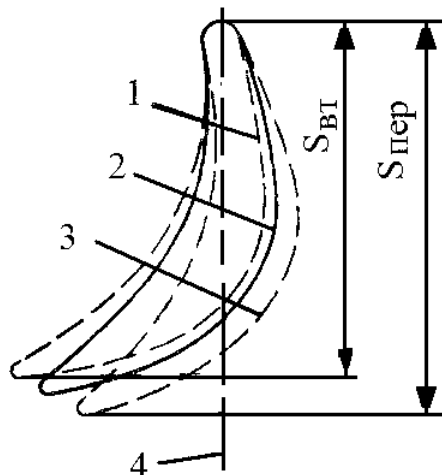


Рис. 1. 4. Совмещение сечений соплового аппарата на различных радиусах проточной части : 1 – у корня; 2 – на D_{cp} ; 3 – на периферии; 4 – ось турбины

Для получения эффективных углов, равным углам заданным, кромки профилей можно несколько подогнуть или повернуть весь профиль.

Форма межлопаточного канала должна обеспечивать плавное изменение сечений, т.е. не иметь диффузорных участков. При этом в реактивных решетках ($\beta_1 > \beta_2$) межлопаточный канал должен быть плавно сужающимся, а в активных решетках ($\beta_1 \approx \beta_2$) – постоянной ширины, что проверяют, вписывая в канал окружности. Получившуюся диффузорность в канале необходимо устранить, изменив очертание профиля в выходной или входной его части в зависимости от того, где она имеется. При этом допускается незначительное расширение канала на входе, но такое, чтобы отношение максимальной ширины канала к его ширине на входе было бы не более 1,05-1,1.

Наименьшая ширина канала a плоской турбинной решетки должна быть увязана с выходным сечением. Как указывалось выше, диффузорность канала, особенно в корневых сечениях, может быть устранена выбором при проектировании повышенных значений углов атаки в этих сечениях. При этом лопатка получается менее закрученной по высоте. Весьма полезно полученные профили сопоставить с аналогичными профилями, имеющимися в атласах, а также проверить распределение на них скоростей с помощью методов, изложенных в гидродинамической теории решеток. После конструирования лопатка турбины рассчитывается на прочность по существующим методам.

2. Способы построения профилей турбомашин

Множество способов профилирования можно условно разделить на графические и аналитические [2].

К первой группе следует отнести методы подрезки входной кромки профилей, изгиба специальных аэродинамических профилей, характерные для построения компрессорных решеток, и др. Методом ручного профилирования, заключающимся обычно в построении профиля с помощью лекал и последующей аппроксимации контура дугами окружностей, получено большинство аэродинамически совершенных решеток, используемых до настоящего времени [2].

Аналитическое описание контура профиля может производиться с помощью различных кривых: дуг окружностей, отрезков прямых, участков парабол и гипербол, лемнискат Бернулли, различных спиралей, сплайнов, полиномов высоких степеней и т. д. Большинство аналитических методов предполагает использование при профилировании ЭВМ.

Некоторые авторы связывают аэродинамическое совершенство решетки с благоприятным изменением кривизны по обводу профиля. Поэтому они рассматривают метод, называемый методом доминирующей кривизны. Этот метод дает возможность при правильном выборе кривизны получать совершенные профили, однако его применение осложняется отсутствием однозначных рекомендаций по выбору кривизны, обеспечивающей минимум профильных потерь в решетке.

Достаточно перспективно профилирование с помощью степенных полиномов высоких степеней, позволяющих аппроксимировать практически любую гладкую кривую. Такие методы построения профиля относительно легко автоматизируются. Кроме того, выпуклая или вогнутая часть профиля может описываться одной кривой, а не набором отрезков кривых, как при использовании других способов профилирования.

Наглядным, эффективным, достаточно хорошо поддающимся автоматизации является графоаналитический метод - метод парабол [3]. Этот метод предложен достаточно давно. Однако следует заметить, что в основе этого метода лежит расчетная схема, которая в своей основе используется и в других методах профилирования лопаток турбин более поздней разработки.

Указанный метод позволяет применять для описания обводов спинки и корытца различные кривые: окружности, параболы, лемнискаты Бернулли, комбинации кривых и т.д.

Построение профиля методом парабол

При проектировании лопаток турбин наиболее целесообразно пользоваться заводскими нормальными (атласами) профилей или профилями, рекомендуемыми научно-исследовательскими организациями. Это тем более удобно, что для таких профилей указываются рекомендуемые величины шага, угла установки, угла атаки и приводятся опытные материалы по исследованию данной решетки, которые позволяют установить идентичность угла выхода β_2 с заданным и найти КПД решетки (или коэффициент скорости ψ).

Если необходимого профиля нет, то можно использовать один из существующих методов, например, метод, основанный на построении параболы как огибающей серии касательных, проведенных соответствующим образом [3].

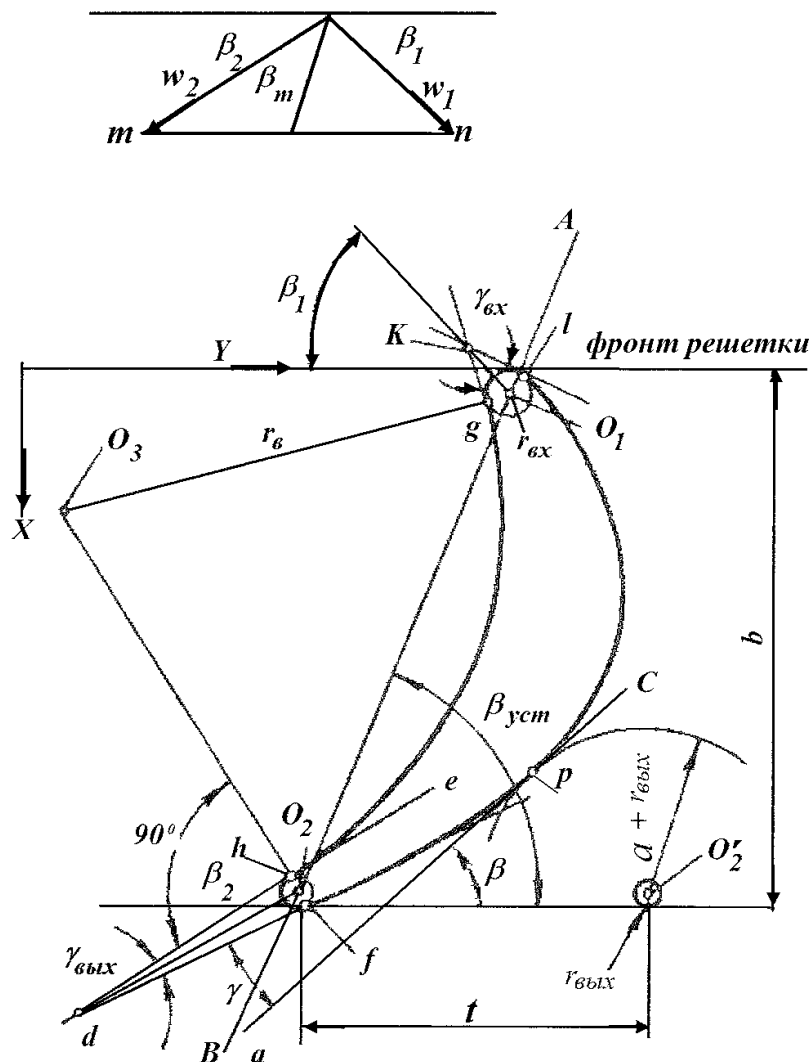


Рис. 2. 1. Расчетная схема построения профиля лопатки и решетки профилей [3]

Чаще всего проектирование решеток проводят по методу плоских решеток, который применим на поверхностях, близких к цилиндрическим. Однако метод плоских решеток успешно применяется и при профилировании круговых решеток центростремительных турбин [12].

Общие требования, предъявляемые к построенному профилю лопаток, изложены в ряде работ [1, 2, 3, и т.д.].

На рис. 2. 1 представлена расчетная схема прямой решетки с указанием линий построения и характерных параметров и точек.

Основой исходных данных являются результаты теплового расчета ступени. В качестве исходных данных приняты углы входа и выхода потока, скорости входа и выхода, ширина решетки, минимальные радиусы входной и выходной кромок, шаг решетки, горло, угол установки профиля в решетке, затылочный угол, углы заострения кромок. Ширину решетки или хорду профиля выбирают по соображениям, изложенным в [4], а также с учетом прочности лопатки.

Следует отметить, что набор задаваемых (исходных) и определяемых (расчетных) параметров в силу решения определенной задачи может несколько меняться, не нарушая общего подхода к проектированию профиля и решетки профилей.

Алгоритм построения профиля реактивной лопатки

При всем разнообразии проектных задач, которые могут быть решены при применении расчетной схемы, представленной на рис.2. 1, основа алгоритма построения профиля лопатки турбины остается без изменения.

Основная последовательность операций профилирования выглядит следующим образом.

Проведя под углами β_1 и β_2 векторы скоростей w_1 и w_2 (рис.2. 1), делим пополам замыкающую линию mn ; этим определяется величина угла β_m , под которым наклонен вектор среднегеометрической скорости. Величину этого угла принимаем за установочный угол профиля $\beta_{уст}$.

Выбрав ширину профиля b , проводим линию AB под углом $\beta_{уст}$.

Выбираем радиусы скругления $r_{вх}$ и $r_{вых}$ входной и выходной кромок профиля.

Из центров O_1 , O_2 , лежащих на линии AB , описываем дуги окружностей, касательных к фронтальным линиям решетки. Через O_1 , O_2 проводим линии под углами β_1 и β_2 к фронтальным линиям.

Выбираем угол заострения выходной кромки $\gamma_{вых}=4..8^\circ$ и затылочный угол $\gamma=5..10^\circ$ (максимально 15°).

Находим выходную ширину канала.

$$a = \frac{t \sin \beta_2}{m},$$

где $m=1,05-1,1$.

Из точки O_2 , являющийся центром выходной кромки соседней лопатки, описываем дугу радиусом $a + r_{\text{вых}}$. Этой дуги должна касаться спинка строящегося профиля. Под углом β к этой дуге проводим касательную ac , причем

$$\beta = \beta_2 - \frac{\gamma_{\text{вых}}}{2} + \gamma.$$

Спинка профиля должна пройти через точку p (рис. 2. 1).

Под углом $\beta_2 - \frac{\gamma_{\text{вых}}}{2}$ проводим линию df , касательную к окружности радиуса $r_{\text{вых}}$. Точка f является конечной точкой спинки профиля.

Под углом $\beta_2 + \frac{\gamma_{\text{вых}}}{2}$ проводим касательную de к той же окружности.

Точка h является конечной точкой вогнутой поверхности профиля.

Из точки h восстанавливаем перпендикуляр к de и на нем отыскиваем точку O_3 ; дуга круга радиуса $r_{\text{вх}}$, проведенная из этой точки, должна коснуться в точке g окружности радиуса $r_{\text{вх}}$. В этой точке проводим касательную gk до пересечения с линией, проведенной под углом β_1 из точки O_1 . Через точку k проводим касательную к окружности радиуса $r_{\text{вх}}$ и этим определим точку l , являющуюся началом кривой, которой очерчивается спинка.

Если угол заострения входной кромки $\gamma_{\text{вх}}$ получается слишком большим или желательно уменьшить максимальную толщину профиля, то вогнутую поверхность очерчиваем двумя радиусами (рис. 2. 3 [4]).

Теперь остается построить спинку профиля, которая должна пройти через точки l, p, f . Соответствующая кривая может быть очерчена несколькими дугами окружностей, радиусы которых увеличиваются от входа к выходу; можно также очертить спинку по лемнискате, параболе и т.п.

Наиболее простой графоаналитический способ построения параболы показан на рис. 2. 2.

Для реализации этого метода продолжаем до взаимного пересечения в точке x линии kl и df . Отрезки lx и fx делим на одинаковое число равных частей и точки деления соединяем последовательно друг с другом, как показано на фигуре (рис. 2. 2). Парабола является огибающей проведенных прямых.

Может оказаться, что построенная таким образом парабола не пройдет через точку p . В этом случае надо изменить наклон линии df , что сводится к изменению затылочного угла (угла отгиба) γ . В большинстве случаев перестраивать вогнутую поверхность при этом не приходится.

В случае необходимости можно варьировать углами $\gamma_{\text{вых}}$ и β_1 ; на рис.2. 1 угол $\beta_{\text{геом}} = \beta_1$; можно, однако, допустить некоторый угол атаки и выбрать

$$\beta_{\text{геом}} = \beta_1 + \delta,$$

где δ можно варьировать от -10 до $+5^\circ$.

После построения профиля следует проверить плавность изменения ширины канала.

Профиль сопловой лопатки строят описанным выше методом по углам α_0 и α_1 . Ширина сопловой лопатки обычно на 20-40% больше ширины рабочей [4].

Описанный выше метод профилирования лопаток турбин является графоаналитическим [4], т.е. требующим применения операций как аналитических, так и ручных графических.

Принимая во внимание граничные условия, которым должны соответствовать обводы профиля после построения, задача профилирования требует многовариантных построений, что не совместимо с оперативностью и точностью решения подобных задач. Решением этой проблемы может быть автоматизированное проектирование лопаток турбин.

Программа построения расчетной схемы метода парабол

На рис.2. 1 была представлена расчетная схема профилирования лопатки турбины. На основании этой схемы разработана математическая модель (ММ) профилирования, реализованная в программных модулях системы автоматизированного проектирования решеток турбин. Язык программирования – *Mathcad*.

Построение расчетной схемы является первым этапом при проектировании решеток турбины.

Программа построения расчетной схемы представлена в таблице 2. 1 в тестовом режиме, т.е. для проверки работы программного модуля перед его использованием следует ввести исходные данные, указанные в программе и получить все результаты, указанные в таблице.

Таблица 2. 1.

Программа построения расчетной схемы профиля лопатки турбины

№ п/п	Наименование параметра	Формула, результат расчета
Программа построения расчетной схемы профиля лопатки турбины		
1	Исходные данные: Ширина решетки b , ордината точки A ; угол установки профиля в решетке по отношению к оси V (вертикальная ось); углы α входе и выходе из решетки; радиусы скругления $r_{\text{вх}}$ и $r_{\text{вых}}$ входной и выходной кромок; коэффициент шага решетки; угол заострения выходной кромки $\gamma_{\text{вых}}$ и затылочный угол γ .	

Таблица 2. 1. (продолжение)

		$V_A := 100$ $b := 100$ $\alpha_{yct} := 36.33$ $\alpha_0 := 90$ $\alpha_1 := 14$ $r_{vx} := 0.0243$ $r_{vux} := 0.006025$ $K_t := 0.595$ $m := 1.05$ $\gamma_{vux} := 7$ $\gamma := 7$
2	Угол линии AB с осью U равен	$\alpha_{AB} := 90 - \alpha_{yct}$
3	Задаем начальную абсциссу т. A	$U_A := 0$
4	Уравнение линии AB	$L_{AB}(u) := \tan\left(-\alpha_{AB} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot u + V_A$
5	Линия направления хорды профиля AB	$u := 0, 0.1 .. 100$
6	Хорда профиля b_0	$b_0 := \frac{b}{\cos\left(\alpha_{AB} \cdot \frac{\pi}{180}\right)}$ $b_0 = 168.795$
7	Радиусы входной и выходной кромок профиля лопатки	$r_{vxx} := r_{vx} \cdot b_0$ $r_{vx} = 4.102$ $r_{vuxx} := r_{vux} \cdot b_0$ $r_{vux} = 1.017$
8	Координаты центров окружностей входной и выходной кромок профиля соответственно	$U_{01} := r_{vx}$ $U_{01} = 4.102$ $V_{01} := L_{AB}(r_{vx})$ $V_{01} = 94.422$ $U_{02} := b - r_{vux}$ $U_{02} = 98.983$ $V_{02} := L_{AB}(b - r_{vux})$ $V_{02} = -34.601$
9	Параметрическое уравнение окружности входной кромки	$U_{C1}(\theta) := r_{vx} \cdot \cos(\theta) + U_{01}$ $V_{C1}(\theta) := r_{vx} \cdot \sin(\theta) + V_{01}$

Таблица 2. 1. (продолжение)

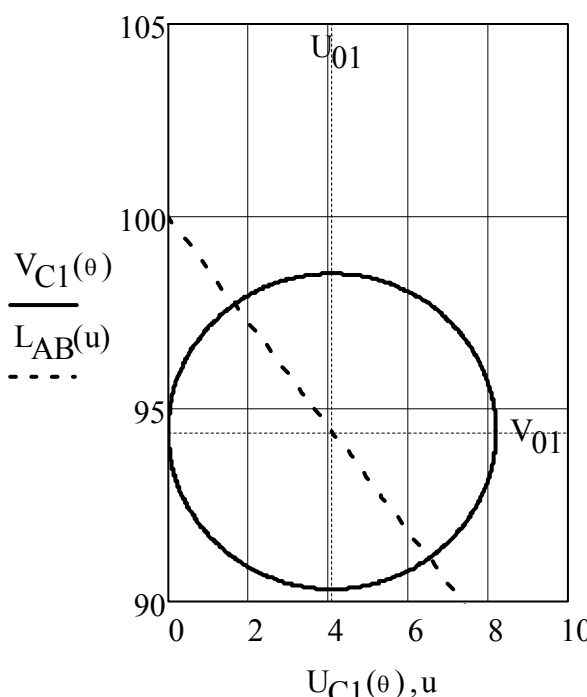
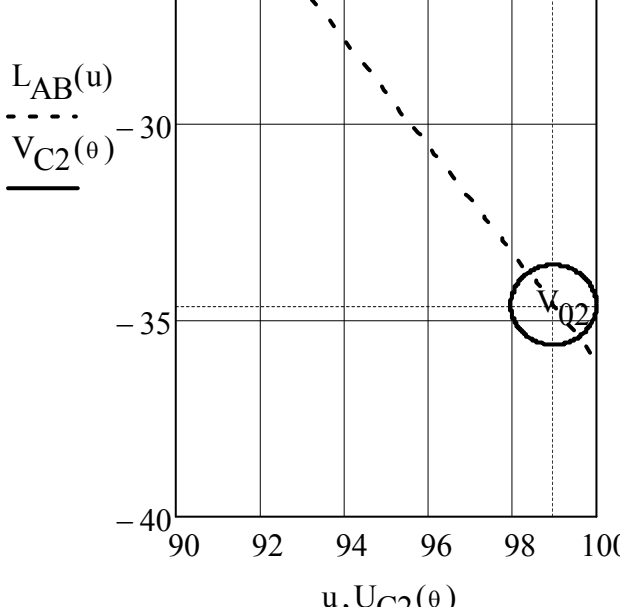
10	Входная кромка, линия АВ и центр окружности входной кромки	$\theta := 0, 0.01 \dots 2 \cdot \pi$ 
11	Параметрическое уравнение окружности выходной кромки	$U_{C2}(\theta) := r_{vux} \cdot \cos(\theta) + U_{02}$ $V_{C2}(\theta) := r_{vux} \cdot \sin(\theta) + V_{02}$
12	Выходная кромка, линия АВ и центр окружности выходной кромки	
13	Под углом входа потока проводим линию через точку O ₁ (центр входной кромки).	$\alpha_{0u} := 90 - \alpha_0 \quad \alpha_{0u} = 0$ $L_1(u) := \tan\left(\alpha_{0u} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot (u - U_{01}) + V_{01}$

Таблица 2. 1. (продолжение)

14	Уравнение линии, проходящей через точку O_2 под углом α_1	$L_2(u) := -\cot\left(\frac{1}{180} \cdot \pi \cdot \alpha_1\right) \cdot (u - U_{02}) + V_{02}$
15	Выходная кромка профиля, линия AB , центр окружности выходной кромки, линия направления выхода потока $L_2(u)$	
16	Определяем шаг решетки t и выходную ширину канала a_{th}	$t := K_t \cdot b_0 \quad t = 100.433$ $a_{th} := t \cdot \frac{\sin\left(\alpha_1 \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{m} \quad a_{th} = 23.14$
17	Координаты центра окружности выходной кромки в точке O'_2	$U_{O'2} := U_{02} \quad U_{O'2} = 98.983$ $V_{O'2} := V_{02} + t \quad V_{O'2} = 65.832$
18	Уравнение окружности радиуса $a_{th} + r_{vux}$ (нижняя полуокружность)	$C'_2(u) := -\sqrt{(a_{th} + r_{vux})^2 - (u - U_{O'2})^2} + V_{O'2}$

Таблица 2. 1. (продолжение)

19	Определение координат точки p , в которой касательная имеет угол β	$u := U_{O'2} \quad \beta := \beta_2 - \frac{\gamma_{vux}}{2} + \gamma$ $U_p := \text{root} \left[\left(\frac{d}{du} C'_2(u) \right) - \tan \left(-\beta \cdot \frac{\pi}{180} \right), u \right]$ $U_p = 91.719 \quad V_p := C'_2(U_p)$ $V_p = 42.793$
20	Определение величины радиуса вогнутой части профиля (корытца) при построении его в виде окружности одного радиуса	<p>Параметрический угол точки h</p> $\theta_h := \pi + \left(\alpha_1 + \frac{\gamma_{vux}}{2} \right) \cdot \frac{\pi}{180} \quad \theta_h = 3.447$ <p>Координаты точки h</p> $U_h := U_{C2}(\theta_h) \quad U_h = 98.013$ $V_h := V_{C2}(\theta_h) \quad V_h = -34.907$ <p>Угол наклона касательной в точке h</p> $\beta_{hx} := \theta_h - \pi \quad \beta_{hx} = 0.305$ $\Delta U := U_h - U_{01} \quad \Delta U = 93.911$ $\Delta V := V_h - V_{01} \quad \Delta V = -129.329$

Таблица 2. 1. (продолжение)

21	Радиус корытца	$R_3 := \frac{\left(\Delta U^2 + \Delta V^2 - r_{vx}^2\right)}{2 \cdot \Delta U \cdot \cos(\beta_{hx}) + 2 \cdot \Delta V \cdot \sin(\beta_{hx}) + 2 \cdot r_{vx}}$ $R_3 = 233.025$	
22	Уравнение окружности корытца		
	$C_3(u) := \sqrt{R_3^2 - \left[u - \left(U_h - R_3 \cdot \cos(\beta_{hx})\right)\right]^2} + \left(V_h - R_3 \cdot \sin(\beta_{hx})\right)$		
23	Уравнение окружности входной кромки (нижняя полуокружность)	$C_1(u) := -\sqrt{r_{vx}^2 - \left(u - U_{01}\right)^2} + V_{01}$	
24	Уравнение окружности выходной кромки (нижняя полуокружность)	$C_2(u) := -\sqrt{r_{vux}^2 - \left(u - U_{02}\right)^2} + V_{02}$	
25	Определение координат центра окружности R_3	Абсцисса $U_{03} := U_h - R_3 \cdot \cos(\beta_{hx}) \quad U_{03} = -124.227$ Ордината $V_{03} := V_h - R_3 \cdot \sin(\beta_{hx}) \quad V_{03} = -104.979$	
26	Параметрический угол в точке сопряжения входной кромки и корытца т. g	$\theta_g := \left(3 \cdot \frac{\pi}{2}\right) - \operatorname{atan}\left(\frac{U_{01} - U_{03}}{V_{01} - V_{03}}\right)$ $\theta_g = 4.141$ $U_g := U_{C1}(\theta_g) \quad U_g = 1.882$	
27	Уравнение вогнутой части профиля - корытца	$W(u) :=$	$\begin{cases} C_1(u) & \text{if } 0 \leq u < U_g \\ C_3(u) & \text{if } U_g \leq u < U_h \\ C_2(u) & \text{if } U_h \leq u < b \end{cases}$
28	Вогнутая часть профиля - корытце в виде окружности одного радиуса и окружность, проходящая через точку p	$u := 0, 0.01 \dots b$	

Таблица 2. 1. (продолжение)

29	Угол заострения входной кромки	$\gamma_{vx} := 2 \cdot (\beta_{gv} - 90)$ $\gamma_{vx} = 65.528$
30	Угол наклона касательной к профилю в т. l	$\beta_{lv} := \alpha_0 - \frac{\gamma_{vx}}{2}$ $\beta_{lu} := 90 - \beta_{lv}$ $\beta_{lu} = 32.764$
31	Параметрический угол точки l	$\theta_1 := \frac{\pi}{2} + \beta_{lu} \cdot \frac{\pi}{180}$ $\theta_1 = 2.143$
32	Координаты точки l	$U_1 := U_{C1}(\theta_1)$ $U_1 = 1.882$ $V_1 := V_{C1}(\theta_1)$ $V_1 = 97.871$
33	Уравнение касательной к входной кромке в точке l	$L_{lvx}(u) := \tan\left(\beta_{lu} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot (u - U_1) + V_1$
34	Окружность входной кромки лопатки, линия AB , центр окружности, линия направления набегающего потока $L_1(u)$, касательная в точке l $L_{lvx}(u)$	

Таблица 2. 1. (продолжение)

35	Определение координат точки f	<p>Угол касательной в точке f с горизонтальной осью U</p> $\beta_{fu} := 90 + \alpha_1 - \frac{\gamma_{vux}}{2} \quad \beta_{fu} = 100.5$ <p>Параметрический угол в точке f</p> $\theta_f := \left(\alpha_1 - \frac{\gamma_{vux}}{2} \right) \cdot \frac{\pi}{180} \quad \theta_f = 0.183$ $U_f := U_{C2}(\theta_f) \quad U_f = 99.983$ $V_f := V_{C2}(\theta_f) \quad V_f = -34.416$ <p>Угол наклона касательной к оси абсцисс в точке f</p> $\beta_{fu} = 100.5$
36	Уравнение касательной к выходной кромке в точке f	$L_{fvux}(u) := \tan \left[(\beta_{fu}) \cdot \frac{\pi}{180} \right] \cdot (u - U_f) + V_f$
37	Выходная кромка профиля, линия AB , центр окружности выходной кромки, линия направления выхода потока $L_2(u)$, касательная в точке f $L_{fvux}(u)$	<p> $L_{AB}(u)$ — solid line $V_{C2}(\theta)$ — dashed line $L_2(u)$ — solid line V_f — dashed line $L_{fvux}(u)$ — solid line </p>
38	Построение контрольного треугольника, в который вписывается спинка профиля	<p>Угол наклона линии lf - основания контрольного треугольника к оси U</p> $\alpha_{lf} := \operatorname{atan} \left(\frac{V_f - V_l}{U_f - U_l} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \alpha_{lf} = -53.44$ <p>Длина линии lf</p> $\Delta L_{lf} := \left[(V_f - V_l)^2 + (U_f - U_l)^2 \right]^{0.5}$ $\Delta L_{lf} = 164.693$

Таблица 2. 1. (продолжение)

39	Уравнение линии lf	$L_{lf}(u) := \tan\left(\alpha_{lf} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot (u - U_1) + V_1$
40	Координаты точки B контрольного треугольника	$z := \frac{U_1 + U_f}{2}$ $U_B := \text{root}(L_{lvx}(z) - L_{fvux}(z), z)$ $U_B = 67.623$ $V_B := L_{lvx}(U_B) \quad V_B = 140.181$
41	Расчетная схема решетки турбинных профилей: окружности входной и выходной кромок профиля, линия AB , линия lf , контрольный треугольник, окружность горла решетки a_{th} , базовые точки контрольного треугольника	

ное число раз, где необходимо построить подобную параболу или семейство парабол и т.д.

Для расчета координат точек параболы исходными данными являются координаты точек концевых точек A , C (рис. 2. 4) и число точек параболы N . Опыт проектирования показал, что достаточно 10 точек на каждом участке параболы. Как видно из теста (п.4 табл. 2. 2), в силу алгоритмической особенности расчета точек параболы, расчетные точки концентрируются на концах параболы.

В тексте подпрограммы имеются две переменные: $CRDL$ и $CRDR$. Первая переменная ($CRDL$) рассчитывает точки на левом участке параболы (участок AP). Вторая переменная ($CRDR$) рассчитывает точки параболы на двух участках параболы – AP и PC .

При желании можно параболу разбить на любое количество участков и на каждом выделенном участке можно применить подпрограмму и определить значения соответствующих переменных.

Таблица 2. 2

Подпрограмма построения параболы $Pp_PARMED\ RADIALCAS-CADE.xmcd$

№ п/п	Наименование параметра	Формула, результат расчета
Подпрограмма расчета промежуточных точек параболы типа "PARMED"		
1	$CRDL(N, x_A, y_A, \varepsilon_A, x_C, y_C, \varepsilon_C) :=$	$ \begin{aligned} &x_1 \leftarrow x_C \\ &y_1 \leftarrow y_C \\ &\varepsilon_1 \leftarrow \varepsilon_C \\ &m \leftarrow 0 \\ &\text{for } s \in 1, 2..N \\ &\quad s \leftarrow 1 \\ &\quad x_B \leftarrow \left(\begin{array}{c} \tan(\varepsilon_A) \cdot x_A \dots \\ + 0 - \tan(\varepsilon_1) \cdot x_1 \dots \\ + 0 - y_A + y_1 \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{c} \tan(\varepsilon_A) \dots \\ + 0 - \tan(\varepsilon_1) \end{array} \right)^{-1} \\ &\quad y_B \leftarrow \tan(\varepsilon_A) \cdot (x_B - x_A) + y_A \\ &\quad x_M \leftarrow (x_1 + x_A) \cdot 2^{-1} \\ &\quad y_M \leftarrow (y_1 + y_A) \cdot 2^{-1} \\ &\quad Xp_m \leftarrow (x_B + x_M) \cdot 2^{-1} \end{aligned} $

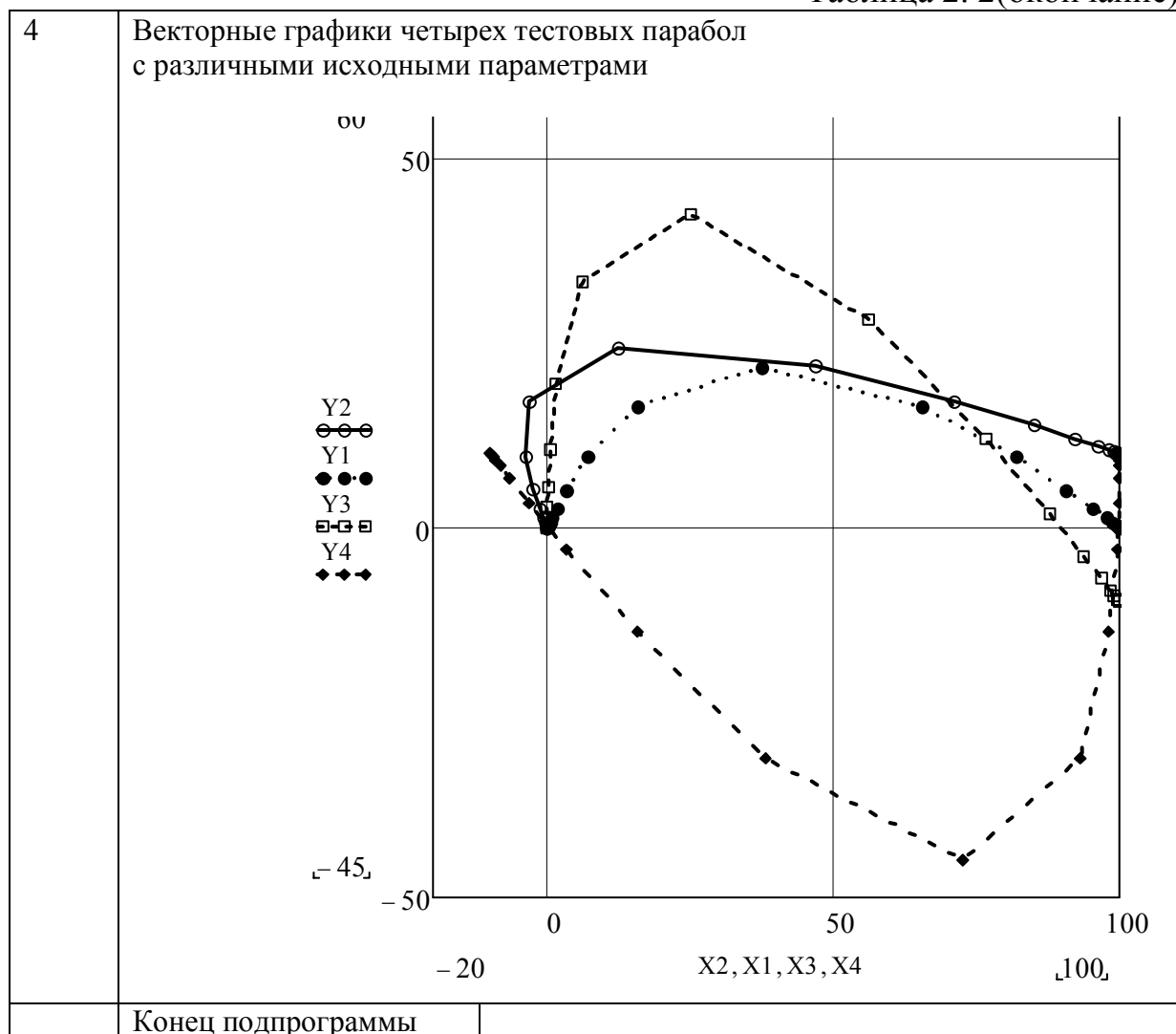
Таблица 2. 2(продолжение)

	$Y_{p_m} \leftarrow (y_B + y_M) \cdot 2^{-1}$ $\varepsilon_{p_m} \leftarrow \operatorname{atan}\left[(y_1 - y_A) \cdot (x_1 - x_A)^{-1}\right]$ $x_1 \leftarrow X_{p_m}$ $y_1 \leftarrow Y_{p_m}$ $\varepsilon_1 \leftarrow \varepsilon_{p_m}$ $m \leftarrow m + 1$ $W^{\langle 0 \rangle} \leftarrow X_p$ $W^{\langle 1 \rangle} \leftarrow Y_p$ $W^{\langle 2 \rangle} \leftarrow \varepsilon_p$ $W \leftarrow \operatorname{reverse}(W)$ $M_A \leftarrow (x_A \ y_A \ \varepsilon_A)$ $W \leftarrow \operatorname{stack}(M_A, W)$ W
2	$\operatorname{CRDR}(N, x_A, y_A, \varepsilon_A, x_C, y_C, \varepsilon_C) :=$ $x_1 \leftarrow x_A$ $y_1 \leftarrow y_A$ $\varepsilon_1 \leftarrow \varepsilon_A$ $m \leftarrow 0$ $\text{for } s \in 1, 2 \dots N$ $s \leftarrow 1$ $x_B \leftarrow \begin{pmatrix} \tan(\varepsilon_1) \cdot x_1 \dots \\ + 0 - \tan(\varepsilon_C) \cdot x_C \dots \\ + 0 - y_1 + y_C \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \tan(\varepsilon_1) \dots \\ + 0 - \tan(\varepsilon_C) \end{pmatrix}^{-1}$ $y_B \leftarrow \tan(\varepsilon_1) \cdot (x_B - x_1) + y_1$ $x_M \leftarrow (x_C + x_1) \cdot 2^{-1}$ $y_M \leftarrow (y_C + y_1) \cdot 2^{-1}$ $X_{p_m} \leftarrow (x_B + x_M) \cdot 2^{-1}$

Таблица 2. 2(продолжение)

		$Y_{p_m} \leftarrow (y_B + y_M) \cdot 2^{-1}$ $\varepsilon_{p_m} \leftarrow \operatorname{atan}\left[(y_C - y_1) \cdot (x_C - x_1)^{-1}\right]$ $x_1 \leftarrow X_{p_m}$ $y_1 \leftarrow Y_{p_m}$ $\varepsilon_1 \leftarrow \varepsilon_{p_m}$ $m \leftarrow m + 1$ $W^{(0)} \leftarrow X_p$ $W^{(1)} \leftarrow Y_p$ $W^{(2)} \leftarrow \varepsilon_p$ $W \leftarrow \operatorname{submatrix}(W, 1, \operatorname{rows}(W) - 1, 0, \operatorname{cols}(W) - 1)$ $M_C \leftarrow (x_C \ y_C \ \varepsilon_C)$ $W \leftarrow \operatorname{stack}(W, M_C)$ $W \leftarrow \operatorname{stack}(\operatorname{CRDL}(N, x_A, y_A, \varepsilon_A, x_C, y_C, \varepsilon_C), W)$ W
3	<p>Тестирование подпрограммы.</p> <p>Параметры четырех вариантов параметров парабол</p>	$\operatorname{TEST2} := \operatorname{CRDR}\left(10, 0, 0, \frac{2\pi}{3}, 100, 10, \frac{-\pi}{12}\right)$ $X2 := \operatorname{TEST2}^{(0)} \qquad Y2 := \operatorname{TEST2}^{(1)}$ $\operatorname{TEST1} := \operatorname{CRDR}\left(10, 0, 0, \frac{\pi}{3}, 100, 0, \frac{-\pi}{6}\right)$ $X1 := \operatorname{TEST1}^{(0)} \qquad Y1 := \operatorname{TEST1}^{(1)}$ $\operatorname{TEST3} := \operatorname{CRDR}\left(10, 0, 0, \frac{\pi}{2}, 100, -10, \frac{-\pi}{4}\right)$ $X3 := \operatorname{TEST3}^{(0)} \qquad Y3 := \operatorname{TEST3}^{(1)}$ $\operatorname{TEST4} := \operatorname{CRDR}\left(10, -10, 10, \frac{-\pi}{4}, 100, 10, \frac{-\pi}{2}\right)$ $X4 := \operatorname{TEST4}^{(0)} \qquad Y4 := \operatorname{TEST4}^{(1)}$

Таблица 2. 2(окончание)



3. Программа построения профиля лопатки с параболической спинкой и корытцем в виде окружности одного радиуса

Построение профиля лопатки с замкнутыми обводами является следующим этапом проектирования решетки профилей.

В таблице 3. 1 представлена программа *Profilj_lopatki_CASCADE_2.xmcd*, которая строит профиль турбинной решетки с параболической спинкой и корытцем в виде окружности одного радиуса.

В работе [4] при построении профиля задаются затылочным углом и после этого определяют координаты точки P . Как правило, парабола, построенная по результатам этого алгоритма расчета не проходит через точку P .

Предложенная [4] методика корректировки исходных данных для того, чтобы парабола обязательно проходила через точку P , не является од-

нозначной и прямой. Поэтому в алгоритме рассмотренной выше программы строится в контрольном треугольнике парабола, а затем определяются координаты точки P . (п.43, табл. 3. 1). Затылочный угол определяется в следующей позиции программы (п. 44).

Опыт проектирования большой группы решеток турбинных профилей с различными исходными параметрами и разного назначения (сопловые и рабочие реактивные) показал, что параметром с ограничениями в этом случае является затылочный угол. Если затылочный угол γ не укладывается в указанный диапазон ($+5^\circ - +15^\circ$ [4]), то достаточно изменить только шаг решетки. Возможны и другие корректировки исходных параметров. В любом случае спинка профиля будет описана одной параболой и характерная точка P всегда будет лежать на параболе.

Вектор выходных параметров программы содержит все геометрические характеристики, необходимые для построения профиля и решетки профилей.

Важнейшими параметрами являются уравнения спинки $S_p(u)$ (п.41) и корытца $W(u)$ (п.25) профиля в формате *MathCAD*. С этим форматом пользователь работает как с аналитической функцией, что особенно наглядно видно в программах для расчета геометрических характеристик профилей и решеток.

Таблица 3. 1

Программа построения профиля лопатки и решетки
Profilj lopatki CASCADE 2.xmcd

№ п/п	Наименование параметра	Формула, результат расчета
Программа построения профиля лопатки и решетки профилей с определением затылочного угла по заданному шагу решетки		
1	Исходные данные	$\alpha_{\text{yct}} := 36.33$ $\alpha_0 := 90$ $\alpha_1 := 17$ $K_t := 0.685$ $m := 1.05$ $\gamma_{\text{vux}} := 7$ $r_{\text{vux}} := 0.006025$ $r_{\text{vx}} := 0.0243$
2	Ширина решетки b , ордината точки A	$V_A := 100$ $b := 100$
3	Угол линии AB с осью U равен	$\alpha_{AB} := 90 - \alpha_{\text{yct}}$ $\alpha_{AB} = 53.67$
4	Задаем начальную абсциссу т. A	$U_A := 0$
5	Уравнение линии AB	$L_{AB}(u) := \tan\left(-\alpha_{AB} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot u + V_A$

Таблица 3. 1(продолжение)

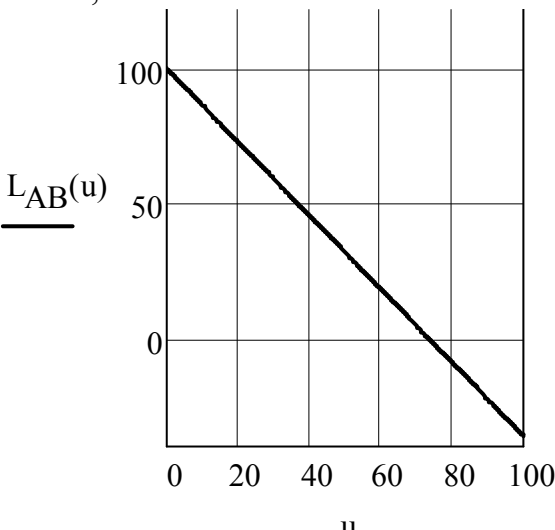
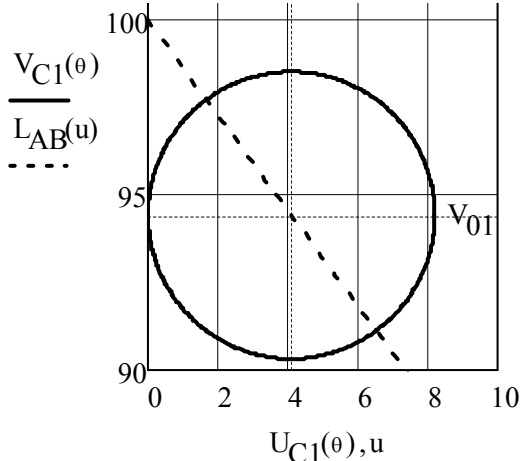
6	Линия AB	$u := 0, 0.1 \dots 100$ 
7	Хорда профиля b_0	$b_0 := \frac{b}{\cos\left(\alpha_{AB} \cdot \frac{\pi}{180}\right)}$ $b_0 = 168.795$
8	Радиусы входной и выходной кромок профиля	$r_{v_{vx}} := r_{vx} \cdot b_0$ $r_{vx} = 4.102$ $r_{v_{vux}} := r_{vux} \cdot b_0$ $r_{vux} = 1.017$
9	Определяем координаты центров окружностей входной и выходной кромок лопатки	
	Абсцисса	$U_{01} := r_{vx}$ $U_{01} = 4.102$ $U_{02} := b - r_{vux}$ $U_{02} = 98.983$
	Ордината	$V_{01} := L_{AB}(r_{vx})$ $V_{01} = 94.422$ $V_{02} := L_{AB}(b - r_{vux})$ $V_{02} = -34.601$
10	Параметрическое уравнение окружности входной кромки	$U_{C1}(\theta) := r_{vx} \cdot \cos(\theta) + U_{01}$ $V_{C1}(\theta) := r_{vx} \cdot \sin(\theta) + V_{01}$
11	Входная кромка лопатки, линия AB и центр окружности входной кромки $\theta := 0, 0.01 \dots 2 \cdot \pi$	

Таблица 3. 1(продолжение)

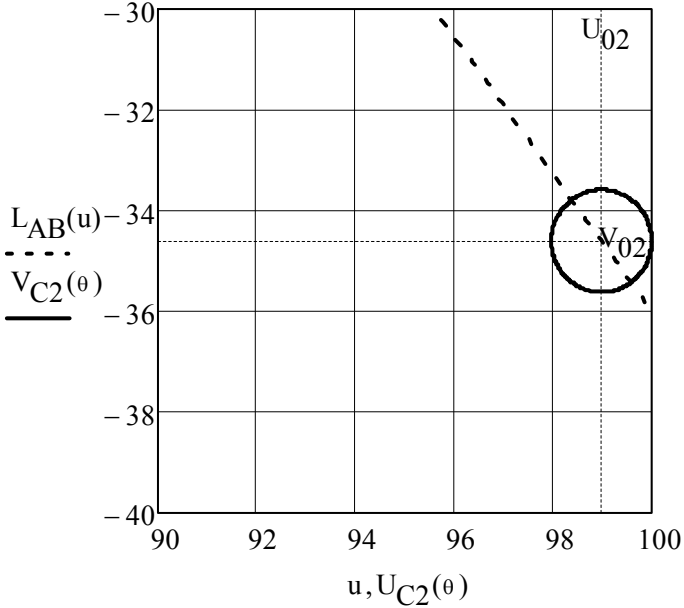
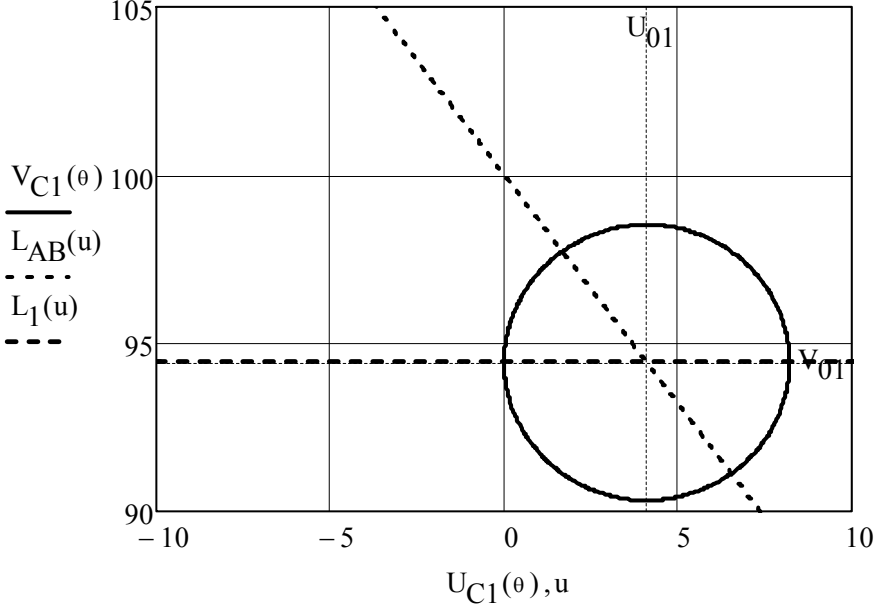
12	Параметрическое уравнение выходной кромки	$U_{C2}(\theta) := r_{vux} \cdot \cos(\theta) + U_{02}$ $V_{C2}(\theta) := r_{vux} \cdot \sin(\theta) + V_{02}$
13	Выходная кромка лопатки, линия AB и центр окружности выходной кромки	
14	Уравнение линии, проходящей через т. O_1 под углом α_0	$\alpha_{0u} := 90 - \alpha_0 \quad \alpha_{0u} = 0$ $L_1(u) := \tan\left(\alpha_{0u} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot (u - U_{01}) + V_{01}$
15	Окружность входной кромки лопатки, линия AB , центр окружности, линия направления набегающего потока $L_1(u)$ $u := -10, (-10 + 0.01) .. b$	

Таблица 3. 1(продолжение)

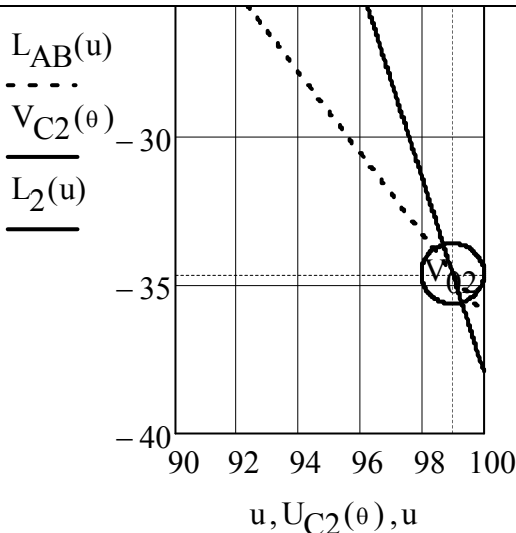
16	Уравнение линии, проходящей через т. О ₂ под углом α_1	$L_2(u) := -\cot\left(\frac{1}{180} \cdot \pi \cdot \alpha_1\right) \cdot (u - U_{02}) + V_{02}$
17	Выходная кромка профиля, линия АВ, центр окружности выходной кромки, линия направления выхода потока $L_2(u)$	
18	Шаг решетки t	$t := K_t \cdot b_0$ $t = 115.624$
19	Координаты центра выходной кромки в т. О'2	Абсцисса $U_{O'2} := U_{02}$ $U_{O'2} = 98.983$ Ордината $V_{O'2} := V_{02} + t$ $V_{O'2} = 81.023$
20	Определение величины радиуса вогнутой части профиля (корытца) при построении его в виде окружности одного радиуса	
	Параметрический угол т. h	$\theta_h := \pi + \left(\alpha_1 + \frac{\gamma_{vux}}{2} \right) \cdot \frac{\pi}{180}$ $\theta_h = 3.499$
	Координаты т. h	$U_h := U_{C2}(\theta_h)$ $U_h = 98.03$ $V_h := V_{C2}(\theta_h)$ $V_h = -34.957$ $\beta_{hx} := \theta_h - \pi$ $\beta_{hx} = 0.358$
	Радиус вогнутой части профиля - корытца	$\Delta U := U_h - U_{01}$ $\Delta U = 93.929$ $\Delta V := V_h - V_{01}$ $\Delta V = -129.38$ $R_3 := \frac{(\Delta U^2 + \Delta V^2 - r_{vx}^2)}{2 \cdot \Delta U \cdot \cos(\beta_{hx}) + 2 \cdot \Delta V \cdot \sin(\beta_{hx}) + 2 \cdot r_{vx}}$ $R_3 = 273.077$
21	Уравнение окружности корытца	
	$C_3(u) := \sqrt{R_3^2 - \left[u - (U_h - R_3 \cdot \cos(\beta_{hx})) \right]^2 + (V_h - R_3 \cdot \sin(\beta_{hx}))^2}$	

Таблица 3. 1(продолжение)

22	Уравнения входной и выходной кромок (нижние полуокружности)	$C_1(u) := -\sqrt{r_{vx}^2 - (u - U_{01})^2} + V_{01}$ $C_2(u) := -\sqrt{r_{vux}^2 - (u - U_{02})^2} + V_{02}$
23	Определение координат центра окружности R_3	Абсцисса $U_{03} := U_h - R_3 \cdot \cos(\beta_{hx}) \quad U_{03} = -157.753$ Ордината $V_{03} := V_h - R_3 \cdot \sin(\beta_{hx}) \quad V_{03} = -130.591$
24	Параметры точки сопряжения входной кромки и корытца т. g	$\theta_g := \left(3 \cdot \frac{\pi}{2}\right) - \operatorname{atan}\left(\frac{U_{01} - U_{03}}{V_{01} - V_{03}}\right) \quad \theta_g = 4.089$ $U_g := U_{C1}(\theta_g) \quad U_g = 1.707$
25	Уравнение вогнутой части профиля - корытца	$\underline{W}(u) := \begin{cases} C_1(u) & \text{if } 0 \leq u < U_g \\ C_3(u) & \text{if } U_g \leq u < U_h \\ C_2(u) & \text{if } U_h \leq u < b \end{cases}$
26	Угол наклона касательных к осям U, V	$\beta_{gu}(u) := \operatorname{atan}\left(\frac{d}{du} C_1(u)\right) \quad \beta_{gu}(U_g) = -0.624$ $\alpha_{0v} := \alpha_0 \quad \beta_{gv} := 90 - \beta_{gu}(U_g) \cdot \frac{180}{\pi}$ $\beta_{gv} = 125.728$ $\alpha_{0u} := 90 - \alpha_{0v} \quad \alpha_{0u} = 0$ $\gamma_{vx} := 2 \cdot \left(\alpha_{0u} - \beta_{gu}(U_g) \cdot \frac{180}{\pi}\right)$ $\gamma_{vx} = 71.456$ $\beta_{lu} := 2 \cdot \alpha_{0u} - \beta_{gu}(U_g) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \beta_{lu} = 35.728$
27	Вогнутая часть профиля - корытце в виде окружности одного радиуса	

Таблица 3. 1(продолжение)

28	Параметрический угол и координаты т. l	$\theta_1 := \frac{\pi}{2} + \beta_{lu} \cdot \frac{\pi}{180}$ $U_1 := U_{C1}(\theta_1)$ $V_1 := V_{C1}(\theta_1)$ $\theta_1 = 2.194$ $U_1 = 1.707$ $V_1 = 97.752$
29	Уравнение касательной к входной кромке в т. l	$L_{lvx}(u) := \tan\left(\beta_{lu} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot (u - U_1) + V_1$
30	Окружность входной кромки профиля, линия АВ, центр окружности, линия направления набегания потока $Ll(u)$, касательная в точке l $Llvx(u)$	
31	Определение координат т. f	<p>Угол касательной в точке f с осью U</p> $\beta_{fu} := 90 + \alpha_1 - \frac{\gamma_{vux}}{2}$ $\beta_{fu} = 103.5$ <p>Параметрический угол в точке f</p> $\theta_f := \left(\alpha_1 - \frac{\gamma_{vux}}{2}\right) \cdot \frac{\pi}{180}$ $\theta_f = 0.236$ $U_f := U_{C2}(\theta_f)$ $U_f = 99.972$ $V_f := V_{C2}(\theta_f)$ $V_f = -34.364$ <p>Угол наклона касательной к оси абсцисс в точке f</p> $\beta_{fu} = 103.5$
32	Уравнение касательной к выходной кромке в т. f	$L_{fvux}(u) := \tan\left[\left(\beta_{fu}\right) \cdot \frac{\pi}{180}\right] \cdot (u - U_f) + V_f$
33	Построение контрольного треугольника, в который вписывается спинка профиля	<p>Угол наклона линии lf - основания контрольного треугольника к оси U</p> $\alpha_{lf} := \operatorname{atan}\left(\frac{V_f - V_1}{U_f - U_1}\right) \cdot \frac{180}{\pi}$ $\alpha_{lf} = -53.359$

Таблица 3. 1(продолжение)

		<p>Длина линии lf</p> $\Delta L_{lf} := \left[(V_f - V_1)^2 + (U_f - U_1)^2 \right]^{0.5}$ $\Delta L_{lf} = 164.653$
34	<p>Выходная кромка лопатки, линия AB, центр окружности выходной кромки, линия направления выхода потока $L_2(u)$, касательная в точке f $L_{fvux}(u)$</p>	<p> $L_{AB}(u)$ $V_{C2}(\theta)$ $L_2(u)$ V_f $L_{fvux}(u)$ </p>
35	Уравнение линии lf	$L_{lf}(u) := \tan\left(\alpha_{lf} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot (u - U_1) + V_1$
36	Координаты т. B контрольного треугольника	$z := \frac{U_1 + U_f}{2}$ $U_B := \text{root}(L_{lvx}(z) - L_{fvux}(z), z)$ $U_B = 58.454$ $V_B := L_{lvx}(U_B) \quad V_B = 138.571$
37	Построение параболической спинки профиля лопатки	<p>Reference: <code>\ Pp_PARMED RADIAL_CASCADE.xmcd</code></p> <p>Формат параметров подпрограммы построения параболы</p> $CRDR(N, x_A, y_A, \varepsilon_A, x_C, y_C, \varepsilon_C)$

Таблица 3. 1(продолжение)

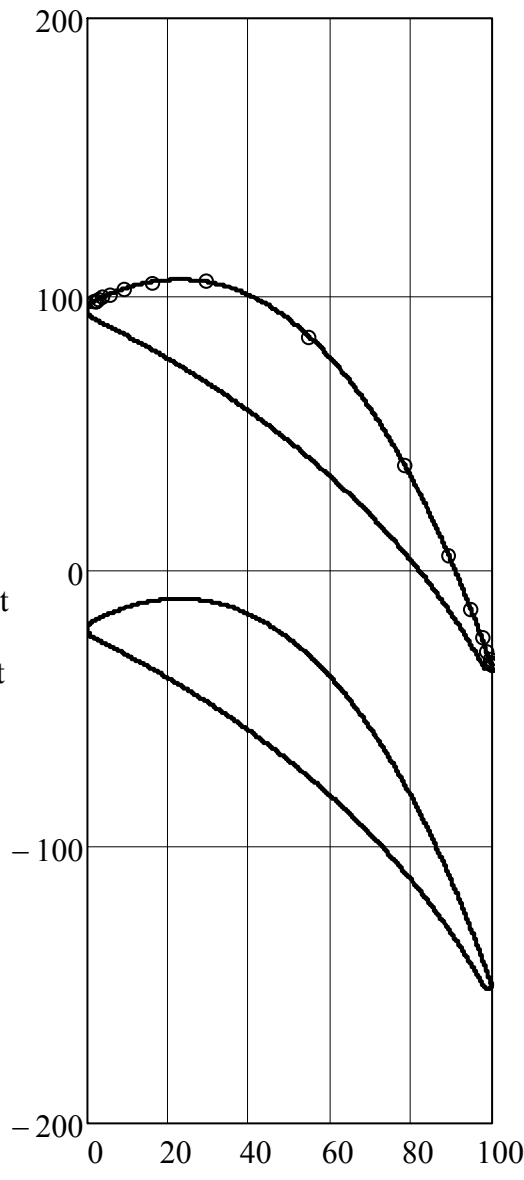
41	<p>Уравнение выпуклой части профиля – спинки</p> $S_p(u) := \begin{cases} \sqrt{r_{vX}^2 - (u - U_{01})^2} + V_{01} & \text{if } 0 \leq u < U_1 \\ S(u) & \text{if } U_1 \leq u < U_f \\ \sqrt{r_{vux}^2 - (u - U_{02})^2} + V_{02} & \text{if } U_f \leq u \leq b \end{cases}$
42	<p>Фрагмент решетки турбинных профилей с параметрами</p> $\alpha_{уст} := 36.33 \quad \alpha_0 := 90$ $\alpha_1 := 17$ $K_t := 0.685 \quad \gamma_{vux} := 7$ $r_{vux} := 0.006025$ $r_{vX} := 0.0243$ <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;"> $\frac{Y1}{S_p(u)}$ $\frac{W(u)}{S_p(u)-t}$ </div>  </div>
43	<p>Определение координат точки P. Первая производная от кривой спинки</p> $S'_p(z) := \frac{d}{dz} S_p(z)$ $z := \frac{U_{02}}{2}$

Таблица 3. 1(продолжение)

		$ZP := \text{root} \left[-S_p(z) + V_{O'2} - \tan \left(\frac{\pi}{2} + \text{atan}(S'_p(z)) \right) \cdot (U_{O'2} - z), z \right]$ $ZP = 66.932 \quad V_p := S_p(ZP) \quad V_p = 64.816$
		Угол наклона касательной в точке P $\alpha_p := \text{atan}(S'_p(ZP)) \quad \alpha_p \cdot \frac{180}{\pi} = -63.175$
44	Величина затылочного угла в точке P	$\gamma_p := \alpha_p \cdot \frac{180}{\pi} + 90 - \alpha_1 + \frac{\gamma_{vux}}{2}$ $\gamma_p = 13.325$
45	Радиус окружности в горле решетки	$R_{ath} := \sqrt{(U_{O'2} - ZP)^2 + (V_{O'2} - S_p(ZP))^2}$ $R_{ath} = 36.825$
46	Уравнение окружности радиуса $a_{th} + r_{vux}$ (нижняя полуокружность)	$C'_2(u) := -\sqrt{(R_{ath})^2 - (u - U_{O'2})^2} + V_{O'2}$
47	Фрагмент решетки турбинных профилей с параметрами $\alpha_{yct} := 36.33 \quad \alpha_0 := 90$ $\alpha_1 := 17$ $K_t := 0.685 \quad \gamma_{vux} := 7$ $r_{vux} := 0.006025$ $r_{vx} := 0.0243$	
	Горло решетки	$a_{th} := R_{ath} - r_{vux} \quad a_{th} = 35.808$
	Конец программы	

Подпрограмма расчета максимальной толщины профиля

Одним из важнейших геометрических параметров, которые входят в список определяемых, является максимальная толщина профиля D_{\max} и ее положение. При разработке программного модуля определения положения и величины максимальной толщины профиля положено условие, что в сечении максимальной толщины для спинки и корытца существует единая нормаль (рис. 3. 1) [9].

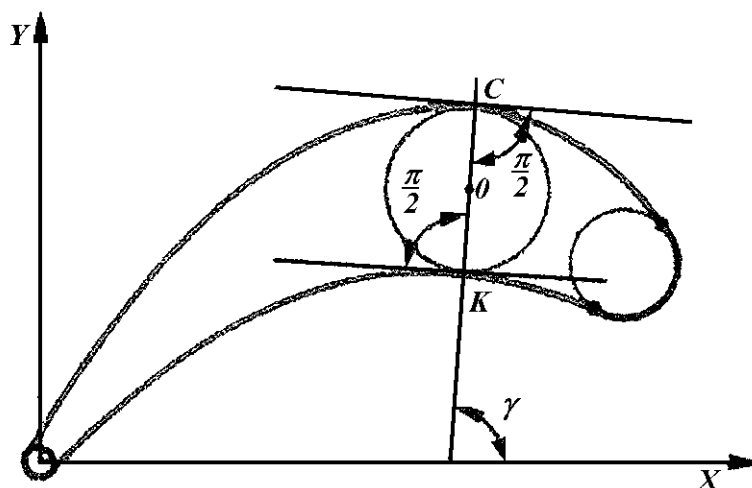


Рис. 3. 1. К определению максимальной толщины профиля [9]

Диаметр и положение максимальной вписанной в профиль окружности определяется через точки ее касания (рис. 3. 1). Касательные, проведенные в точках C и K соответственно к спинке и корыту, образуют с прямой CK образуют прямые углы, так как точки C и K являются точками касания вписанной в профиль окружности максимального диаметра. Следовательно, $\gamma_C = \gamma_K = \gamma$, где γ – параметр спинки и корыта в точках C и K , а также угол, образуемый секущей CK с осью x . (Обозначения [9])

В таблице 3. 2 представлена подпрограмма расчета максимальной толщины профиля.

Исходными данными для подпрограммы являются уравнения спинки и корытца профиля, полученные на более ранних этапах проектирования.

Результатом работы подпрограммы является: максимальная толщина профиля (п.6), координаты положения сечения на спинке и корытце, координаты окружности максимальной толщины (п.7) и т.д.

Для того, чтобы воспользоваться рассматриваемой подпрограммой, необходимо подпрограмму скопировать и вставить в основную программу после определения уравнений спинки и корытца профиля в формате $S_p(u)$, $W(u)$.

Таблица 3. 2

Подпрограмма расчета максимальной толщины профиля $Pp D_{max}$

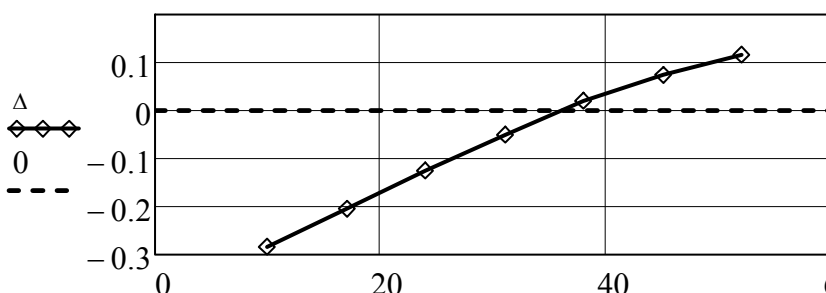
№ п/п	Наименование параметра	Формула, результат расчета
Подпрограмма расчета максимальной толщины профиля лопатки		
1	Расчет разницы углов нормалей спинки и корытца $\Delta_{\eta}(x_0) :=$	$x \leftarrow x_0$ $\alpha_w \leftarrow \operatorname{atan}\left(\frac{d}{dx} W(x)\right)$ $\eta_w \leftarrow \alpha_w + \frac{\pi}{2}$ $x \leftarrow \frac{b}{2}$ $x_{prs} \leftarrow \operatorname{root}\left[\left[\tan(\eta_w) \cdot (x - x_0) + W(x_0)\right] - S_p(x), x\right]$ $x \leftarrow x_{prs}$ $\alpha_{prs} \leftarrow \operatorname{atan}\left(\frac{d}{dx} S_p(x)\right)$ $\eta_{prs} \leftarrow \alpha_{prs} + \frac{\pi}{2}$ $\Delta \leftarrow \eta_w - \eta_{prs}$
2	Формирование вектора абсциссы и разницы углов нормалей корытца и спинки	$i := 0..6$ $X_{D_i} := 10 + 7 \cdot i$ $X_D^T = (10 \ 17 \ 24 \ 31 \ 38 \ 45 \ 52)$ $\Delta_i := \Delta_{\eta}(X_{D_i})$
		$\Delta^T = (-0.284 \ -0.204 \ -0.124 \ -0.049 \ 0.019 \ 0.075 \ 0.117)$
3	Графическое определение абсциссы максимальной толщины профиля со стороны корытца $x := 0..b$	 <p>График зависимости разницы углов нормалей Δ от абсциссы X_D, x. Ось абсцисс X_D, x имеет значения от 0 до 60. Ось ординат Δ имеет значения от -0.3 до 0.1. Точка пересечения с нулевой линией находится при $X_D \approx 38$.</p>

Таблица 3. 2(продолжение)

4	Определение абсциссы и ординаты корытца с максимальной толщиной профиля решением уравнения	<p>Линейная интерполяция разницы значений углов нормалей корытца и спинки по абсциссе корытца</p> $\Delta 90717(v) := \text{linterp}(X_D, \Delta, v)$ $x := 20$ $x_D := \text{root}(\Delta 90717(x), x) \quad x_D = 36.035$ $W(x_D) = 74.523$
5	Определение координат сечения максимальной толщины профиля для спинки	$X_{SD}(x_D) := \begin{pmatrix} x \leftarrow x_D \\ \alpha_w \leftarrow \text{atan}\left(\frac{d}{dx} W(x)\right) \\ \eta_w \leftarrow \alpha_w + \frac{\pi}{2} \\ x \leftarrow \frac{b}{2} \\ x_{\text{prs}} \leftarrow \text{root}\left[\left[\tan(\eta_w) \cdot (x - x_D) + W(x_D)\right] - S_p(x), x\right] \\ \begin{pmatrix} x_{\text{prs}} \\ S_p(x_{\text{prs}}) \end{pmatrix} \end{pmatrix}$
6	Вектор координат сечения максимальной толщины для спинки, максимальная толщина, уравнение нормали сечения максимальной толщины	$X_{SD}(x_D) = \begin{pmatrix} 44.876 \\ 87.862 \end{pmatrix}$ $D_{\max} := \sqrt{(x_D - X_{SD}(x_D)_0)^2 + (W(x_D) - X_{SD}(x_D)_1)^2}$ $D_{\max} = 16.003$ $\alpha_w(u) := \text{atan}\left(\frac{d}{du} W(u)\right)$ $L_D(u) := \tan\left(\text{atan}(\alpha_w(x_D)) + \frac{\pi}{2}\right) \cdot (u - x_D) + W(x_D)$
7	Радиус, абсцисса и ордината центра окружности максимальной толщины профиля	$R_D := \frac{D_{\max}}{2}$ $x_{0D} := \frac{(x_D + X_{SD}(x_D)_0)}{2}$ $y_{0D} := \frac{(W(x_D) + X_{SD}(x_D)_1)}{2}$

Таблица 3. 2(окончание)

8	Параметрическое уравнение окружности максимальной толщины	$x_{Dmax}(\Theta) := \frac{D_{max}}{2} \cdot \sin(\Theta) + x_{0D}$ $y_{Dmax}(\Theta) := \frac{D_{max}}{2} \cdot \cos(\Theta) + y_{0D}$
9	Фрагмент профиля лопатки с вписанной окружностью диаметром максимальной толщины $\Theta := 0, 0.01 \dots 2 \cdot \pi$	
	Конец подпрограммы	

Тестовый режим подпрограммы выполнен при следующих исходных данных:

$$\alpha_{yct} := 47 \quad \alpha_0 := 101 \quad \alpha_1 := 25 \quad r_{vx} := 0.031 \quad r_{vux} := 0.0095$$

$$K_t := 0.63 \quad \gamma_{vux} := 7 \quad \underline{m} := 1.05$$

Определение основных геометрических характеристик профиля лопатки

После построения обводов спинки и корытца профиля и определения их параметров вычисляют основные геометрические характеристики профиля и межлопаточного канала.

В таблице 3. 3 представлена программа *Rashet_geometrchar.xmcd*, которая рассчитывает ряд геометрических параметров. Эти параметры могут быть использованы в дальнейших расчетах, например, для оптимизации формы профиля, оценки прочностных характеристик, решения вопросов теплоотдачи и т.д.

Таблица 3. 3

Расчет геометрических характеристик профиля лопатки турбины *Ra-shet_geometrchar.xmcd*

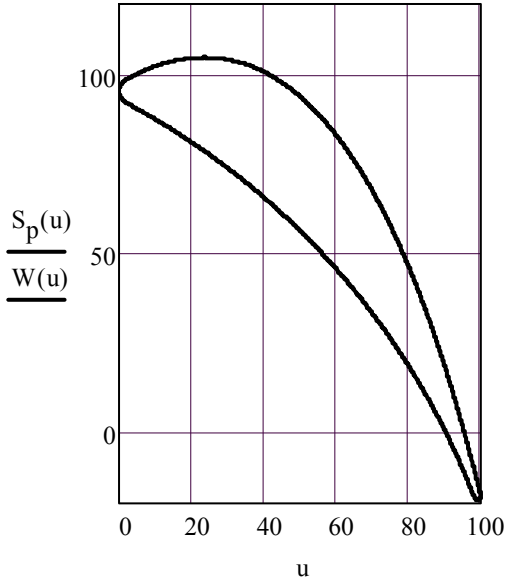
№ п/п	Наименование параметра	Формула, результат расчета
1	Исходные данные	Тип профиля C9017 $\alpha_{\text{уст}} := 40 \quad \alpha_0 := 90 \quad \alpha_1 := 17 \quad r_{\text{vX}} := 0.024$ $r_{\text{vux}} := 0.006 \quad K_t := 0.69 \quad \gamma_{\text{vux}} := 7$ $m := 1.05$
2	Профиль сопловой лопатки типа C9017 построен по программе, рассмотренной ранее	
3	Длина дуги спинки	$L_S := \int_0^{99.5} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{du} S_p(u) \right)^2} du$ $L_S = 178.126$
4	Длина дуги корытца	$L_W := \int_0^{99.45} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{du} W(u) \right)^2} du$ $L_W = 155.26$
5	Площадь профиля, мм ²	$F := \int_0^b \int_{W(u)}^{S_p(u)} 1 \, dS \, du \quad F = 2.659 \times 10^3$
6	Статические моменты инерции профиля относительно оси V - S _V , оси U - S _U , мм ³	$S_V := \int_0^b \int_{W(u)}^{S_p(u)} u \, dS \, du \quad S_V = 1.368 \times 10^5$

Таблица 3. 3(продолжение)

		$S_U := \int_0^b \int_{W(u)}^{S_p(u)} S \, dS \, du \quad S_U = 1.755 \times 10^5$
7	Моменты инерции профиля относительно V - J_V , оси U - J_U , центробежного момента J_{UV} , мм ⁴	$J_V := \int_0^b \int_{W(u)}^{S_p(u)} u^2 \, dS \, du \quad J_V = 8.506 \times 10^6$ $J_U := \int_0^b \int_{W(u)}^{S_p(u)} S^2 \, dS \, du \quad J_U = 1.363 \times 10^7$ $J_{UV} := \int_0^b \int_{W(u)}^{S_p(u)} S \cdot u \, dS \, du$ $J_{UV} = 7.488 \times 10^6$
8	Координаты центра тяжести профиля U_C , V_C , мм	$U_C := S_V \cdot F^{-1} \quad U_C = 51.457$ $V_C := S_U \cdot F^{-1} \quad V_C = 66.011$
9	Моменты инерции относительно центральных осей U_1 - U_1 , V_1 - V_1 , мм ⁴	$J_{V1} := J_V - U_C^2 \cdot F \quad J_{V1} = 1.466 \times 10^6$ $J_{U1} := J_U - V_C^2 \cdot F \quad J_{U1} = 2.04 \times 10^6$ $J_{U1V1} := J_{UV} - U_C \cdot V_C \cdot F$ $J_{U1V1} = -1.543 \times 10^6$
10	Моменты инерции профиля относительно главных центральных осей U' - U' , V' - V'	$S_{qr} := \left[\left[(J_{V1} - J_{U1}) \cdot 2^{-1} \right]^2 + J_{U1V1}^2 \right]^{0.5}$ $S_{qr} = 1.569 \times 10^6$ $J_{V'} := (J_{U1} + J_{V1}) \cdot 2^{-1} + S_{qr}$ $J_{V'} = 3.323 \times 10^6$ $J_{\max} := J_{V'} \quad J_{\max} = 3.323 \times 10^6$ $J_{U'} := (J_{U1} + J_{V1}) \cdot 2^{-1} - S_{qr}$ $J_{U'} = 1.841 \times 10^5$ $J_{\min} := J_{U'} \quad J_{\min} = 1.841 \times 10^5$

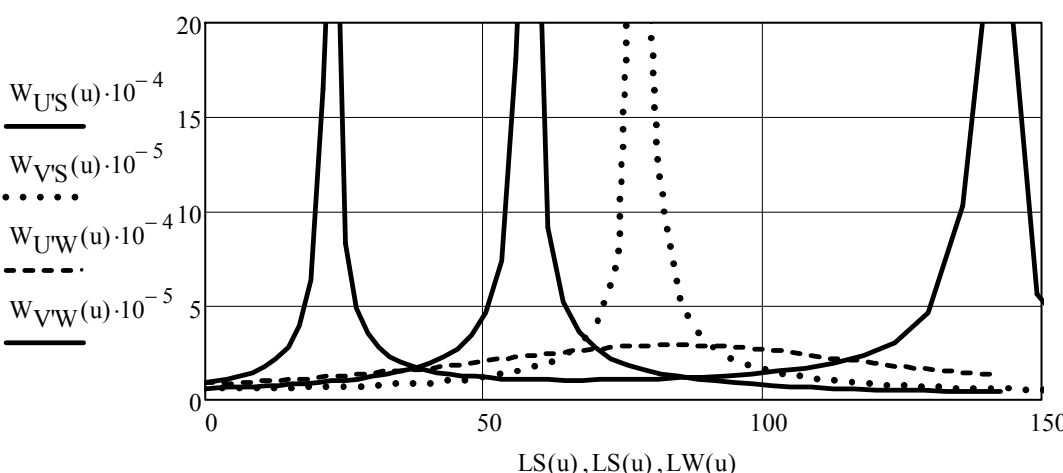
Таблица 3. 3(продолжение)

11	Угловое положения главных центральных осей, град.	$\phi := \operatorname{atan}\left[J_{U1V1} \cdot \frac{1}{(J_{V1} - J_{U'})}\right] \cdot \frac{180}{\pi}$ $\phi = -50.268$
12	Угол наклона главных центральных осей к исходным осям, рад	$\gamma_{UV} := \phi \cdot \frac{\pi}{180} \quad \gamma_{UV} = -0.877$
13	Уравнения главных центральных осей	$U'(u) := \tan(\gamma_{UV}) \cdot (u - U_C) + V_C$ $V'(u) := -\cot(\gamma_{UV}) \cdot (u - U_C) + V_C$
14	Сопловой профиль типа С9017 с главными центральными осями и центром масс	
15	Абсциссы спинки и корытца профиля в главных центральных осях	$U'_S(u) := (u - U_C) \cdot \cos(\gamma_{UV}) + (S_p(u) - V_C) \cdot \sin(\gamma_{UV})$ $U'_W(u) := (u - U_C) \cdot \cos(\gamma_{UV}) + (W(u) - V_C) \cdot \sin(\gamma_{UV})$
16	Ординаты спинки и корытца профиля в главных центральных осях	$V'_S(u) := -(u - U_C) \cdot \sin(\gamma_{UV}) + (S_p(u) - V_C) \cdot \cos(\gamma_{UV})$ $V'_W(u) := -(u - U_C) \cdot \sin(\gamma_{UV}) + (W(u) - V_C) \cdot \cos(\gamma_{UV})$
17	Момент сопротивления спинки профиля относительно осей U' , V'	$W_{U'S}(u) := \frac{J_{\min}}{ V'_S(u) } \quad W_{V'S}(u) := \frac{J_{\max}}{ U'_S(u) }$
	Момент сопротивления корытца профиля относительно осей U' , V'	$W_{U'W}(u) := \frac{J_{\min}}{ V'_W(u) }$

Таблица 3. 3(продолжение)

		$W_{V'W}(u) := \frac{J_{\max}}{ U'W(u) }$
18	Изменение момента сопротивления спинки и корытца профиля лопатки по оси u	
19	Профиль сопловой лопатки типа С9017 в главных центральных осях $U'V'$	
20	Изменение моментов сопротивления спинки и корытца профиля вдоль главной центральной оси	

Таблица 3. 3(окончание)

21	Длины дуг спинки и корытца	$LS(u) := \int_0^u \sqrt{1 + \left(\frac{d}{du} S_p(u)\right)^2} du$ $LW(u) := \int_0^u \sqrt{1 + \left(\frac{d}{du} W(u)\right)^2} du$
22	Изменение моментов сопротивления спинки и корытца профиля по длине дуг спинки и корытца	
	Конец программы расчета геометрических характеристик профиля	

Конфузорность канала решетки профилей

Одной из важнейших геометрических характеристик решетки профилей является конфузорность межлопаточного канала. Известны общие рекомендации по форме канала, по изменению площади канала по его длине.

В таблице 3. 4 представлена программа по расчету параметров окружностей, вписанных в межлопаточный канал, и расчету его конфузорности.

В программе реализован алгоритм, который включает несколько основных шагов.

1. Рассчитываются геометрические параметры профиля и строится решетка профилей.

2. В ряде сечений межлопаточного канала вписываются окружности, которые одновременно касаются спинки и корытца. Графоаналитическим методом определяются радиусы вписанных окружностей.

3. Формируется матрица параметров вписанных окружностей:

1-я колонка - абсцисса центра вписанной окружности;

2 – я колонка - ордината центра вписанной окружности;

3 – я колонка – радиус вписанной окружности.

4. Для построения ряда зависимостей и построения соответствующих графиков производится интерполяция кубическим сплайном данных матрицы по абсциссам центров вписанных окружностей.

5. Оценивается конфузурность межлопаточного канала. Так как этот параметр является оценочным, то точности графоаналитического метода вполне достаточно. (Следует принять во внимание возможности интегрированной системы *Mathcad*.)

Таблица 3. 4

Программа определения конфузурности канала решетки профилей

№ п/п	Наименование параметра	Формула, результат расчета
1	Исходные данные	Тип профиля C9017 $\alpha_{\text{yct}} := 40 \quad \alpha_0 := 90 \quad \alpha_1 := 17 \quad r_{\text{vx}} := 0.024$ $r_{\text{vux}} := 0.006 \quad K_t := 0.69 \quad \gamma_{\text{vux}} := 7$ $m := 1.05$
2	Абсцисса и угол наклона касательной в крайней точке корытца	$u_2 := 98 \quad \alpha_w(u) := \operatorname{atan}\left(\frac{d}{du} W2(u)\right)$
3	Уравнение касательной и нормали в точке корытца	$T_w(u) := \tan(\alpha_w(u_2)) \cdot (u - u_2) + W2(u_2)$ $N_w(u) := \tan\left(\alpha_w(u_2) + \frac{\pi}{2}\right) \cdot (u - u_2) + W2(u_2)$
4	Параметрическое уравнение окружности, вписываемой в межлопаточный канал	$x_D(\theta, r_D) := r_D \cdot \sin(\theta) + \left(u_2 - r_D \cdot \cos\left(\alpha_w(u_2) + \frac{\pi}{2}\right)\right)$
		$y_D(\theta, r_D) := r_D \cdot \cos(\theta) + \left(W2(u_2) - r_D \cdot \sin\left(\alpha_w(u_2) + \frac{\pi}{2}\right)\right)$
5	Графоаналитическое определение радиуса вписанной окружности в межлопаточный канал	

Таблица 3. 4(Продолжение)

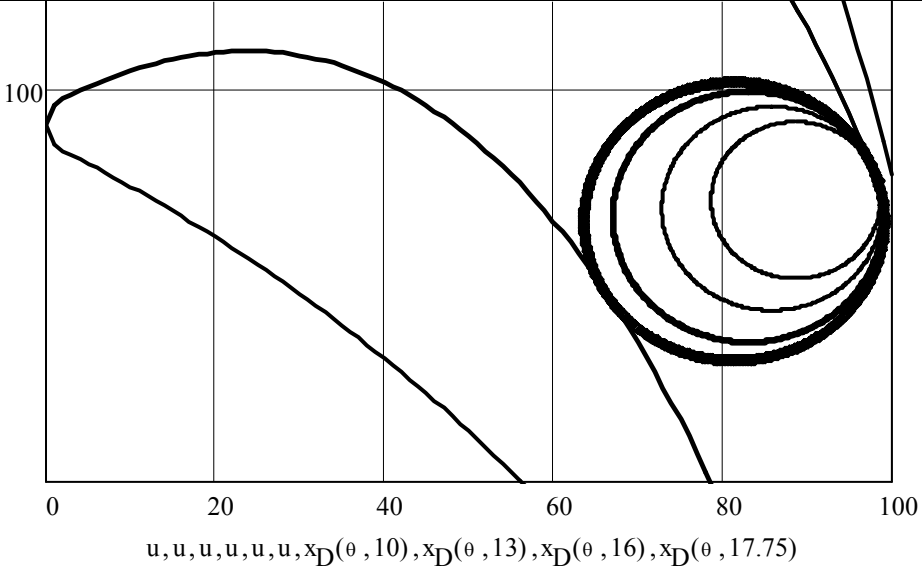
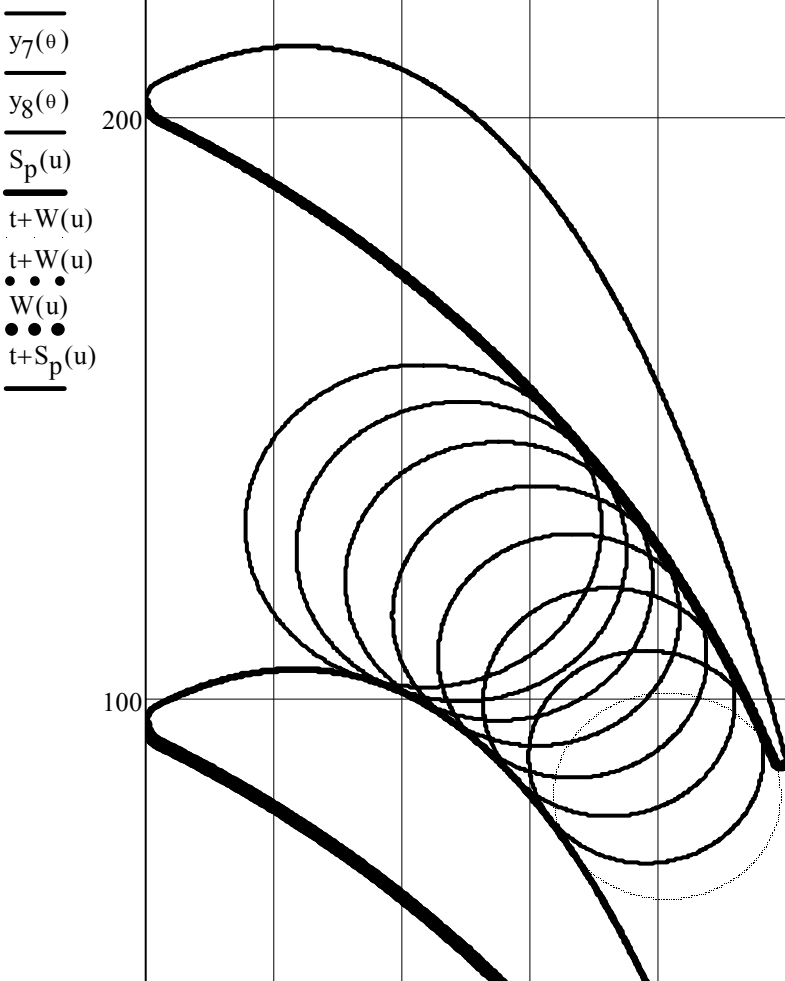
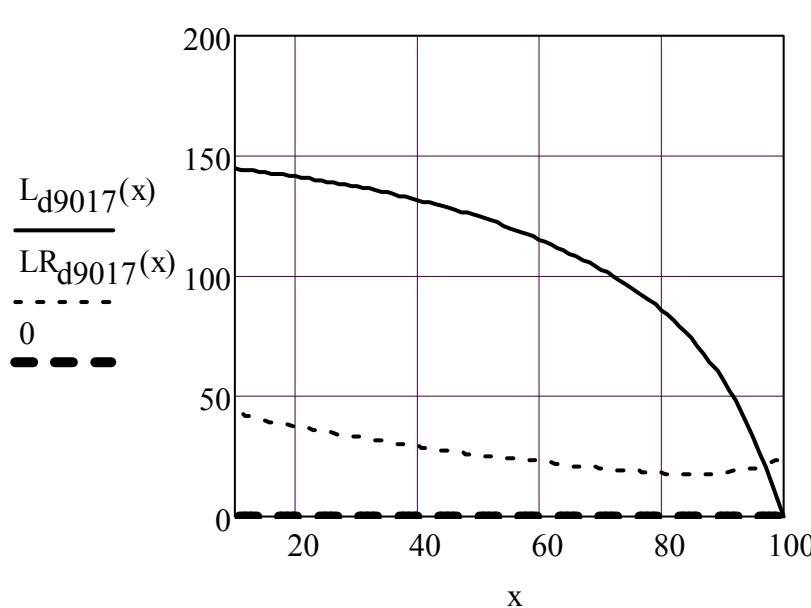
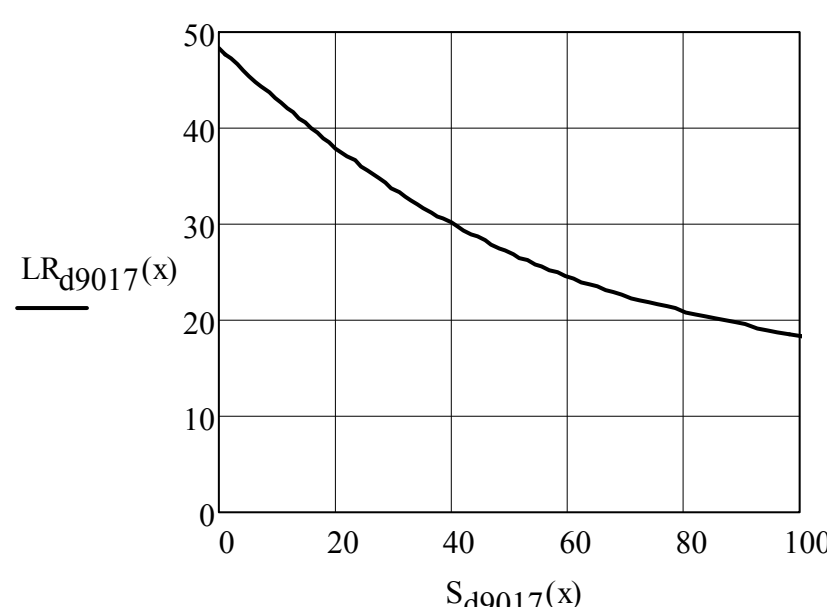
	 <p> $u, u, u, u, u, u, x_D(\theta, 10), x_D(\theta, 13), x_D(\theta, 16), x_D(\theta, 17.75)$ </p>	
6	Конфузорность межлопаточного канала	$K_{9017} := \frac{a_{th}}{2.33} \quad K_{9017} = 0.453$
7	<p>Окружности, вписанные в межлопаточный канал</p>  <p> $y_7(\theta)$ $y_8(\theta)$ $S_p(u)$ $t+W(u)$ $t+W(u)$ $W(u)$ $t+S_p(u)$ </p>	

Таблица 3. 4(Продолжение)

8	<p>Формат матрицы параметров вписанных окружностей</p> $M_{xyR} := \begin{bmatrix} \left(u_{.2} - 17.75 \cdot \cos\left(\alpha_{.w}(u_{.2}) + \frac{\pi}{2} \right) \right) & W2(u_{.2}) - 17.75 \cdot \sin\left(\alpha_{.w}(u_{.2}) + \frac{\pi}{2} \right) & 17.75 \\ \left(95 - 18.3 \cdot \cos\left(\alpha_{.w}(95) + \frac{\pi}{2} \right) \right) & \left(W2(95) - 18.3 \cdot \sin\left(\alpha_{.w}(95) + \frac{\pi}{2} \right) \right) & 18.3 \\ \left(90 - 19.65 \cdot \cos\left(\alpha_{.w}(90) + \frac{\pi}{2} \right) \right) & \left(W2(90) - 19.65 \cdot \sin\left(\alpha_{.w}(90) + \frac{\pi}{2} \right) \right) & 19.65 \\ \left(85 - 21 \cdot \cos\left(\alpha_{.w}(85) + \frac{\pi}{2} \right) \right) & \left(W2(85) - 21 \cdot \sin\left(\alpha_{.w}(85) + \frac{\pi}{2} \right) \right) & 21 \\ \left(80 - 22.4 \cdot \cos\left(\alpha_{.w}(80) + \frac{\pi}{2} \right) \right) & \left(W2(80) - 22.4 \cdot \sin\left(\alpha_{.w}(80) + \frac{\pi}{2} \right) \right) & 22.4 \\ \left(75 - 24 \cdot \cos\left(\alpha_{.w}(75) + \frac{\pi}{2} \right) \right) & \left(W2(75) - 24 \cdot \sin\left(\alpha_{.w}(75) + \frac{\pi}{2} \right) \right) & 24 \\ \left(70 - 25.8 \cdot \cos\left(\alpha_{.w}(70) + \frac{\pi}{2} \right) \right) & \left(W2(70) - 25.8 \cdot \sin\left(\alpha_{.w}(70) + \frac{\pi}{2} \right) \right) & 25.8 \\ \left(65 - 27.8 \cdot \cos\left(\alpha_{.w}(65) + \frac{\pi}{2} \right) \right) & \left(W2(65) - 27.8 \cdot \sin\left(\alpha_{.w}(65) + \frac{\pi}{2} \right) \right) & 27.8 \end{bmatrix}$	
9	Матрица результатов расчета параметров вписанных окружностей	$M_{xyR} := \text{reverse}(M_{xyR})$ $M_{xyR} = \begin{pmatrix} 43.37 & 129.662 & 27.8 \\ 49.31 & 125.268 & 25.8 \\ 55.18 & 120.138 & 24 \\ 60.966 & 114.184 & 22.4 \\ 66.654 & 107.276 & 21 \\ 72.364 & 99.282 & 19.65 \\ 78.138 & 89.873 & 18.3 \\ 81.39 & 83.208 & 17.75 \end{pmatrix}$
10	Векторы координат центров и радиусов окружностей, вписанных в канал	$X_{0d9017} := M_{xyR}^{\langle 0 \rangle} \quad Y_{0d9017} := M_{xyR}^{\langle 1 \rangle}$ $R_{0d9017} := M_{xyR}^{\langle 2 \rangle}$
11	Интерполяция кубическим сплайном ординат и радиусов в зависимости от абсцисс центров окружностей	

Таблица 3. 4(Продолжение)

	$L_{d9017}(x) := \text{interp}\left(\text{cspline}\left(M_{xyR}^{\langle 0 \rangle}, M_{xyR}^{\langle 1 \rangle}\right), M_{xyR}^{\langle 0 \rangle}, M_{xyR}^{\langle 1 \rangle}, x\right)$ $LR_{d9017}(x) := \text{interp}\left(\text{cspline}\left(M_{xyR}^{\langle 0 \rangle}, M_{xyR}^{\langle 2 \rangle}\right), M_{xyR}^{\langle 0 \rangle}, M_{xyR}^{\langle 2 \rangle}, x\right)$	
12	Длина дуги линии центров вписанных окружностей	$S_{d9017}(x) := \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} L_{d9017}(x)\right)^2} dx$
13	<p>Ординаты центра и радиусы вписанных окружностей</p>  <p> $L_{d9017}(x)$ $LR_{d9017}(x)$ 0 </p>	
14	<p>Зависимость радиуса вписанной окружности в межлопаточный канал в зависимости от длины средней линии</p>  <p> $LR_{d9017}(x)$ $S_{d9017}(x)$ </p>	
	Конец программы	

Построение треугольников скоростей

Одним из результатов расчета турбинной ступени являются треугольники скоростей. *Mathcad* позволяет строить треугольники скоростей в параметрическом виде векторных графиков.

В таблице 3. 5 приведена программа расчета и построения треугольников скоростей элементарной турбинной ступени, состоящей из сопловой и рабочей решеток.

Как можно видеть из программы исходными данными для построения треугольников скоростей являются результаты газодинамического расчета ступени турбины.

Таблица 3. 5

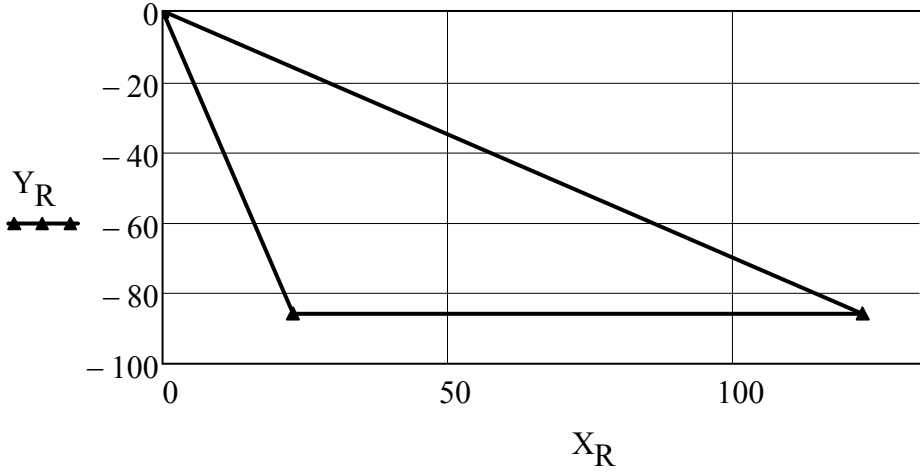
Построение треугольников скоростей турбинной ступени

№ п/п	Наименование параметра	Формула, результат расчета
1	Исходные данные	<p>Абсолютная скорость на выходе из соплового аппарата</p> $C_{1abc} := 200$ <p>Абсолютный угол выхода потока из соплового аппарата</p> $\alpha_{1abc} := 17 \cdot \frac{\pi}{180}$ <p>Окружная скорость</p> $u_{окр} := 100$ <p>Относительный угол выхода потока из рабочей решетки</p> $\beta_{2OTH} := 35 \cdot \frac{\pi}{180}$ <p>Относительная скорость на выходе из рабочей решетки</p> $W_{2OTH} := 150$
2	Общая матрица в параметрическом виде для треугольников скоростей	$\Delta_{ckr} := \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -C_{1abc} \cdot \cos(\alpha_{1abc}) & -C_{1abc} \cdot \sin(\alpha_{1abc}) \\ u_{окр} + -C_{1abc} \cdot \cos(\alpha_{1abc}) & -C_{1abc} \cdot \sin(\alpha_{1abc}) \\ 0 & 0 \\ W_{2OTH} \cdot \cos(\beta_{2OTH}) & -W_{2OTH} \cdot \sin(\beta_{2OTH}) \\ W_{2OTH} \cdot \cos(\beta_{2OTH}) - u_{окр} & -W_{2OTH} \cdot \sin(\beta_{2OTH}) \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$

Таблица 3. 5(Продолжение)

3	Вектор абсцисс и ординат	$X_{skr} := \Delta_{ckr}^{\langle 0 \rangle}$	$Y_{skr} := \Delta_{ckr}^{\langle 1 \rangle}$
4	Треугольники скоростей		
5	Матрица левого (входного) треугольника скоростей, векторы абсцисс и ординат концов векторов скоростей	$\Delta_{ckrL} := \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -C_{1abc} \cdot \cos(\alpha_{1abc}) & -C_{1abc} \cdot \sin(\alpha_{1abc}) \\ u_{okp} + -C_{1abc} \cdot \cos(\alpha_{1abc}) & -C_{1abc} \cdot \sin(\alpha_{1abc}) \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ $X_L := \Delta_{ckrL}^{\langle 0 \rangle} \quad Y_L := \Delta_{ckrL}^{\langle 1 \rangle}$	
6	Левый(входной) треугольник скоростей		
7	Матрица выходного (правого) треугольника скоростей и векторы абсцисс и ординат концов векторов скоростей	$\Delta_{ckrR} := \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ W_{.2OTH} \cdot \cos(\beta_{.2OTH}) & -W_{.2OTH} \cdot \sin(\beta_{.2OTH}) \\ W_{.2OTH} \cdot \cos(\beta_{.2OTH}) - u_{okp} & -W_{.2OTH} \cdot \sin(\beta_{.2OTH}) \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ $X_R := \Delta_{ckrR}^{\langle 0 \rangle} \quad Y_R := \Delta_{ckrR}^{\langle 1 \rangle}$	

Таблица 3. 5(Окончание)

8	Правый (выходной) треугольник скоростей 
	Конец программы построения треугольников скоростей

Построение элементарной ступени турбины

В результате расчета турбинной ступени проектант имеет графические образы профилей сопловых и рабочих лопаток и решеток, набор геометрических характеристик профилей, треугольники скоростей и т.д.

В таблице 3. 6 приведена программа оформления графического образа элементарной турбинной ступени с треугольниками скоростей.

При работе с программой следует иметь в виду, что профилирование сопловой и рабочей решеток производится по одной и той же программе. Поэтому некоторые параметры, например углы, скорости, имеют одни и те же имена (идентификаторы). Этот фактор необходимо иметь в виду при оформлении итогового документа.

(При желании проектант может на основании предложенных программ самостоятельно разработать отдельные программные модули для проектирования только соплового аппарата и только для рабочей решетки.)

Таблица 3. 6

Построение элементарной ступени турбины

№ п/п	Наименование параметра	Формула, результат расчета
	Программа построения элементарной турбинной ступени с треугольниками скоростей	
1	Исходные данные для	$\alpha_{уст} := 40$ $\alpha_0 := 90$ $\alpha_1 := 17$ $r_{vx} := 0.024$

Таблица 3. 6(Окончание)

		$r_{vux} := 0.006$ $K_t := 0.69$ $\gamma_{vux} := 7$ $m := 1.05$
2	Переиндексация имен спинки и корытца соседних профилей соплового аппарата	$CS(u) := S_p(u)$ $CS'(u) := S_p(u) - t$ $CW(u) := W(u)$ $CW'(u) := W(u) - t$
3	Исходные данные для проектирования рабочей решетки	$\alpha_{yot} := 45$ $\alpha_0 := 79$ $r_{xx} := 0.04$ $r_{vux} := 0.008$ $\gamma_{vux} := 7$ $m := 1.05$
4	Переиндексация имен спинки и корытца соседних профилей соплового аппарата и зеркальное отображение в горизонтальной плоскости	$RS(u) := 10 - S_p(u)$ $RW(u) := 10 - W(u)$ $u2(u) := u + 110$ $RS'(u) := 10 - (S_p(u) - t)$ $RW'(u) := 10 - (W(u) - t)$
5	Программа расчета и построения треугольников скоростей элементарной турбинной ступени (Таблица 3.5)	
6	Эскиз элементарной ступени с треугольниками скоростей 	
	Конец программы	

4. Построение профиля заданной толщины

При профилировании лопаток турбин иногда задается толщина профиля. В этих случаях расчетная схема, представленная ранее, дополняется новым условием, определяющим местоположение и величину максимальной толщины профиля. В таблице 2. 9 приведена программа построения расчетной схемы профиля лопатки турбины, для проектирования которой задано условие – координаты сечения и максимальная толщина профиля в этом сечении: b_D и D_{\max} .

Таблица 4. 1.

Программа построения расчетной схемы профиля лопатки с заданной толщиной профиля *Rachetnaj shema xD Dmax.xmcd*

№ п/п	Наименование параметра	Формула, результат расчета
Программа построения расчетной схемы профиля лопатки турбины с заданной максимальной толщиной и ее положения		
1	Исходные данные	$\alpha_{yct} := 40$ $r_{vx} := 0.0243$ $\alpha_0 := 90$ $r_{vux} := 0.006025$ $\alpha_1 := 17$ $m := 1.05$ $\gamma := 7$ $\gamma_{vux} := 7$ $b_D := 24.5$ $U_A := 0$
2	Угол линии AB с осью U равен	$\alpha_{AB} := 90 - \alpha_{yct}$ $\alpha_{AB} = 50$
3	Уравнение линии AB	$L_{AB}(u) := \tan\left(-\alpha_{AB} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot u + V_A$
4	Линия AB	
5	Величина отрезка AB , который в первом приближении может быть принят за хорду профиля b_0 . Радиусы входной и выходной кромок профиля	$b_0 := \frac{b}{\cos\left(\alpha_{AB} \cdot \frac{\pi}{180}\right)}$ $b_0 = 155.572$ $r_{vx} := r_{vx} \cdot b_0$ $r_{vx} = 3.78$ $r_{vux} := r_{vux} \cdot b_0$ $r_{vux} = 0.937$

Таблица 4. 1(Продолжение)

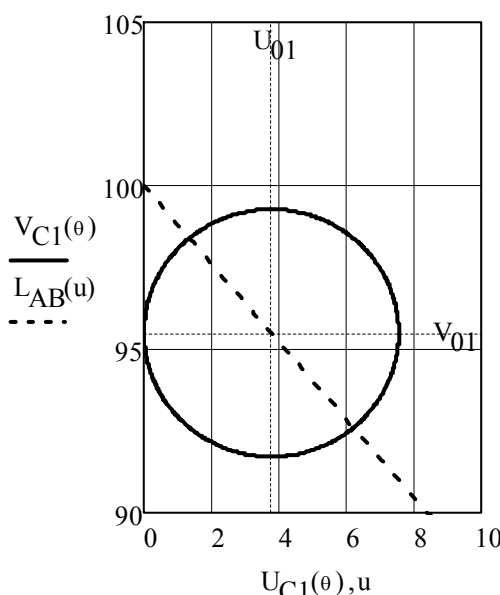
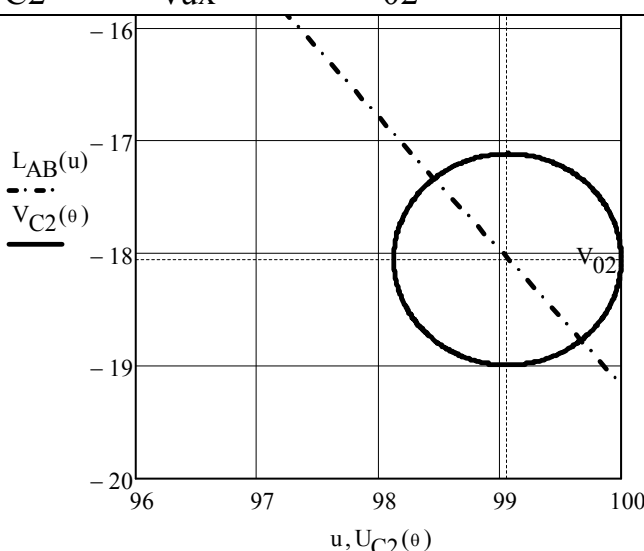
6	Координаты центров окружностей входной и выходной кромок лопатки соответственно	<p>Абсцисса $U_{01} := r_{vx}$ $U_{01} = 3.78$</p> <p>Ордината $V_{01} := L_{AB}(r_{vx})$ $V_{01} = 95.495$</p> <p>Абсцисса $U_{02} := b - r_{vux}$ $U_{02} = 99.063$</p> <p>Ордината $V_{02} := L_{AB}(b - r_{vux})$ $V_{02} = -18.058$</p>
7	Параметрическое уравнение окружности входной кромки	$U_{C1}(\theta) := r_{vx} \cdot \cos(\theta) + U_{01}$ $V_{C1}(\theta) := r_{vx} \cdot \sin(\theta) + V_{01}$
8	Входная кромка профиля, линия AB и центр окружности входной кромки	
9	Параметрическое уравнение окружности выходной кромки	$U_{C2}(\theta) := r_{vux} \cdot \cos(\theta) + U_{02}$ $V_{C2}(\theta) := r_{vux} \cdot \sin(\theta) + V_{02}$
10	Выходная кромка профиля, линия AB и центр окружности выходной кромки	

Таблица 4. 1(Продолжение)

11	Через центры окружностей кромок O_1 и O_2 проводим линии под углами входа и выхода потока α_0 и α_1 к фронтальным линиям.	$\alpha_{0u} := 90 - \alpha_0 \quad \alpha_{0u} = 0$ $L_1(u) := \tan\left(\alpha_{0u} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot (u - U_{01}) + V_{01}$ $L_2(u) := -\cot\left(\frac{1}{180} \cdot \pi \cdot \alpha_1\right) \cdot (u - U_{02}) + V_{02}$
12	Окружность входной кромки лопатки, линия AB , центр окружности, линия направления набегающего потока $L_1(u)$	
13	Выходная кромка профиля лопатки, линия AB , центр окружности выходной кромки, линия направления выхода потока $L_2(u)$	
14	После построения кромок профиля проводим среднюю линию профиля в виде параболы. Затем на заданной абсциссе x_D строим максимальную толщину профиля. Основное допущение при реализации настоящей расчетной схемы профиля состоит в том, что на заданной абсциссе существует единая нормаль для спинки, средней линии и корытца.	

Таблица 4. 1(Продолжение)

	После реализации первого приближения можно осуществить необходимую, если понадобится, корректировку и т.д.	
15	Угол наклона касательной на выходе α_{1u}	$\alpha_{1u} := (17 - 90) \cdot \frac{\pi}{180} \quad \alpha_{1u} = -1.274$
16	Подключение подпрограммы построения параболы	<i>Reference: \Pp_PARMED_RADIAL_CASCADE.xmcd</i>
17	<p>Матрица параметров параболы средней линии профиля, включающая абсциссы, ординаты и углы наклона касательных в точках параболы</p> $M_{CP} := \left(CRDR \left(10, U_{01}, V_{01}, \alpha_{0u} \cdot \frac{\pi}{180}, U_{02}, V_{02}, \alpha_{1u} \right) \right)$ $M_{CP}^T = \begin{array}{c ccccc} & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 0 & 3.78 & 3.899 & 4.017 & 4.253 & 4.725 \\ 1 & 95.495 & 95.495 & 95.494 & 95.493 & 95.488 \\ 2 & 0 & -1.832 \cdot 10^{-3} & -3.665 \cdot 10^{-3} & -7.336 \cdot 10^{-3} & -0.015 \end{array}$	
18	Векторы абсцисс, ординат параболы, углов наклона касательных	$X_{CP} := M_{CP}^{\langle 0 \rangle} \quad Y_{CP} := M_{CP}^{\langle 1 \rangle}$ $\varepsilon_{CP} := M_{CP}^{\langle 2 \rangle}$
	$X_{CP}^T = \begin{array}{c ccccccc} & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline 0 & 3.78 & 3.899 & 4.017 & 4.253 & 4.725 & 5.667 & 7.541 \end{array}$ $Y_{CP}^T = \begin{array}{c ccccccc} & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline 0 & 95.495 & 95.495 & 95.494 & 95.493 & 95.488 & 95.467 & \end{array}$	
19	<p>Интерполяция средней линии и угла наклона касательной к ней кубическими сплайнами</p> $L_{CP}(u) := \text{interp}(\text{cspline}(X_{CP}, Y_{CP}), X_{CP}, Y_{CP}, u)$ $\varepsilon_{CP}(u) := \text{interp}(\text{cspline}(X_{CP}, \varepsilon_{CP}), X_{CP}, \varepsilon_{CP}, u)$	
20	График средней линии профиля и изменение угла наклона к средней линии вдоль оси U	
21	Координата максимальной толщины b_D и максимальная толщина профиля D_{max} равны	$b_D := 24.5 \quad D_{max} := 10.6$

Таблица 4. 1(Продолжение)

22	Абсцисса максимальной толщины профиля; радиус максимальной толщины; угол наклона касательной в точке с максимальной толщиной; ордината точки средней линии с максимальной толщиной	$U_D := b_D$ $R_{Dmax} := b_0 \cdot \frac{D_{max}}{2 \cdot 100} \quad R_{Dmax} = 8.245$ $\alpha_{CPu} := E_{CP}(U_D)$ $\alpha_{CPu} \cdot \frac{180}{\pi} = -19.841$ $Y_{CPD} := L_{CP}(U_D) \quad Y_{CPD} = 91.904$
23	Уравнение касательной и нормали к средней линии в сечении с максимальной толщиной	$T_{CPD}(u) := \tan(\alpha_{CPu}) \cdot (u - U_D) + Y_{CPD}$ $N_{CPD}(u) := -\cot(\alpha_{CPu}) \cdot (u - U_D) + Y_{CPD}$
24	Параметрическое уравнение окружности максимальной толщины профиля	$x_{Rmax}(\theta) := R_{Dmax} \cdot \sin(\theta) + U_D$ $y_{Rmax}(\theta) := R_{Dmax} \cdot \cos(\theta) + Y_{CPD}$
25	Параметры точки спинки профиля сечения максимальной толщины	$X_{SD} := x_{Rmax}(-\alpha_{CPu}) \quad X_{SD} = 27.299$ $Y_{SD} := y_{Rmax}(-\alpha_{CPu}) \quad Y_{SD} = 99.66$
26	Параметры точки корытца профиля сечения максимальной толщины	$X_{WD} := x_{Rmax}(-\alpha_{CPu} + \pi)$ $X_{WD} = 21.701$ $Y_{WD} := y_{Rmax}(-\alpha_{CPu} + \pi)$ $Y_{WD} = 84.149$
27	Сечение профиля с максимальной толщиной	

Таблица 4. 1(Продолжение)

28	Уравнения касательных в сечении с максимальной толщиной на корытце и спинке	$T_{WD}(u) := \tan(\alpha_{CPu}) \cdot (u - X_{WD}) + Y_{WD}$ $T_{SD}(u) := \tan(\alpha_{CPu}) \cdot (u - X_{SD}) + Y_{SD}$
29	Область входной кромки и сечения максимальной толщины	
30	<p>Как можно видеть на входном участке профиля со стороны спинки выполняется условие, необходимое для построения спинки в виде любой кривой: окружности, параболы и т.д.</p> <p>Со стороны корытца условий для построения корытца – нет, касательная проходит ниже окружности входной кромки.</p> <p>Для обеспечения условий проектирования корытца необходимо: уменьшить толщину профиля, сместить сечение максимальной толщины ниже по потоку, увеличивать диаметр входной кромки и т.п.</p> <p>Таким образом, очевидно, что при ранее указанных допущениях задача не всегда имеет решение.</p> <p>Полученный результат достаточно интересен и важен, так как приводит к одному из выводов, что решетки, например, реактивные рабочие с существенно большими радиусами окружности входной кромки, могут быть спрофилированы на входном участке по выше рассмотренных положениях.</p> <p>Возможным решением задачи построения профиля лопатки турбины может оказаться схема, когда сначала строится корытце, а затем строится сечение максимальной толщины и т.д.</p>	
31	Определяем шаг решетки t и выходную ширину канала a_{th}	$t := K_t \cdot b_0 \quad t = 95.677$ $a_{th} := t \cdot \frac{\sin\left(\alpha \cdot 1 \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{m} \quad a_{th} = 26.641$

Таблица 4. 1(Продолжение)

32	Из точки O'_2 , являющейся центром выходной кромки соседнего профиля, описываем дугу радиусом $a_{th} + r_{vux}$. Под углом β к этой дуге проводим касательную ac	$\beta := \alpha_1 - \left(\frac{\gamma \cdot v_{ux}}{2} \right) + \gamma \quad \beta = 20.5$
33	Координаты точки O'_2 . Абсцисса Ордината	$U_{O'2} := U_{02} \quad U_{O'2} = 99.063$ $V_{O'2} := V_{02} + t \quad V_{O'2} = 77.619$
34	Уравнение окружности радиуса $a_{th} + r_{vux}$ (нижняя полуокружность)	$C'_2(u) := -\sqrt{(a_{th} + r_{vux})^2 - (u - U_{O'2})^2} + V_{O'2}$
35	Определение координат точки P , в которой касательная имеет угол β	$u := U_{O'2}$ $U_p := \text{root} \left[\left(\frac{d}{du} C'_2(u) \right) - \tan \left(-\beta \cdot \frac{\pi}{180} \right), u \right]$ $U_p = 89.404 \quad V_p := C'_2(U_p) \quad V_p = 51.787$
36		
37	Определение величины радиуса вогнутой части профиля (корытца) при построении его в виде окружности одного радиуса	<p>Параметрический угол точки h</p> $\theta_h := \pi + \left(\alpha_1 + \frac{\gamma \cdot v_{ux}}{2} \right) \cdot \frac{\pi}{180}$ $\theta_h = 3.499 \quad \theta_h \cdot \frac{180}{\pi} = 200.5$

Таблица 4. 1(Продолжение)

		Координаты точки h $U_h := U_{C2}(\theta_h)$ $U_h = 98.185$ $V_h := V_{C2}(\theta_h)$ $V_h = -18.387$ $\beta_{hx} := \theta_h - \pi$ $\beta_{hx} = 0.358$ $\beta_{hx} \cdot \frac{180}{\pi} = 20.5$
38	Определение величины радиуса корытца	$\Delta U := U_h - U_{01}$ $\Delta U = 94.404$ $\Delta V := V_h - V_{01}$ $\Delta V = -113.881$ $R_3 := \frac{(\Delta U^2 + \Delta V^2 - r_{vx}^2)}{2 \cdot \Delta U \cdot \cos(\beta_{hx}) + 2 \cdot \Delta V \cdot \sin(\beta_{hx}) + 2 \cdot r_{vx}}$ $R_3 = 208.955$
39	Уравнение корытца	$C_3(u) := \sqrt{R_3^2 - [u - (U_h - R_3 \cdot \cos(\beta_{hx}))]^2 + (V_h - R_3 \cdot \sin(\beta_{hx}))^2}$
40	Уравнения окружностей входной и выходной кромок профиля (нижние полуокружности)	$C_1(u) := -\sqrt{r_{vx}^2 - (u - U_{01})^2} + V_{01}$ $C_2(u) := -\sqrt{r_{vux}^2 - (u - U_{02})^2} + V_{02}$
41	Координаты центра окружности R_3 Абсцисса Ордината	$U_{03} := U_h - R_3 \cdot \cos(\beta_{hx})$ $U_{03} = -97.538$ $V_{03} := V_h - R_3 \cdot \sin(\beta_{hx})$ $V_{03} = -91.564$
42	Параметрический угол в точке g сопряжения входной кромки и корытца	$\theta_g := \left(3 \cdot \frac{\pi}{2}\right) - \text{atan}\left(\frac{U_{01} - U_{03}}{V_{01} - V_{03}}\right)$ $\theta_g = 4.216$ $\theta_g \cdot \frac{180}{\pi} = 241.558$ $U_g := U_{C1}(\theta_g)$ $U_g = 1.98$
43	Уравнение вогнутой части профиля - корытца	$W(u) := \begin{cases} C_1(u) & \text{if } 0 \leq u < U_g \\ C_3(u) & \text{if } U_g \leq u < U_h \\ C_2(u) & \text{if } U_h \leq u < b \end{cases}$
44	Радиус максимальной толщина профиля первого приближения	$R_{Dmax} := b_0 \cdot \frac{D_{max}}{2 \cdot 100}$ $R_{Dmax} = 8.245$
45	Угол наклона касательной и нормали в точках на корытце в сечении с заданной максимальной толщиной	Первая производная от кривой корытца $W'(u) := \frac{d}{du} W(u)$ $\alpha_W(u) := \text{atan}(W'(u))$

Таблица 4. 1(Продолжение)

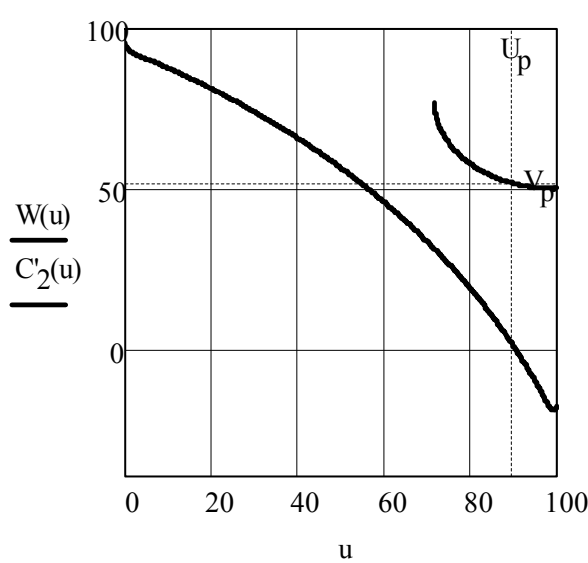
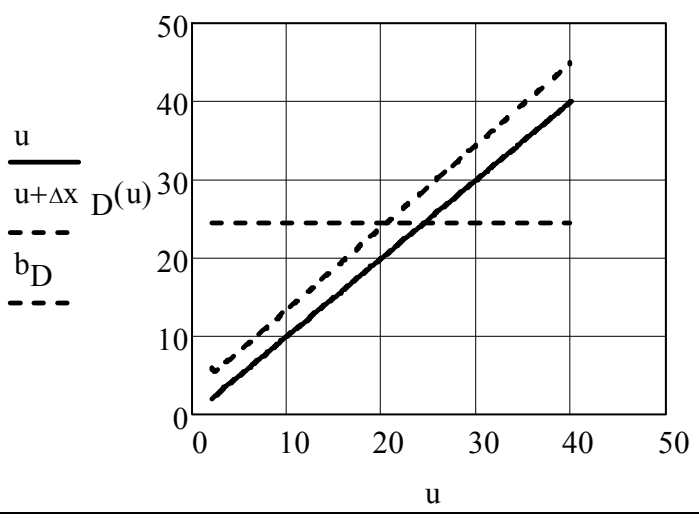
		$\eta W(u) := \frac{\pi}{2} + \text{atan}(W'(u))$
46	Вогнутая часть профиля - корытце в виде окружности одного радиуса	
47	Приращение абсциссы Приращение ординаты	$\Delta x_D(u) := R_{D\max} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \text{atan}(W'(u))\right)$ $\Delta y_D(u) := R_{D\max} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \text{atan}(W'(u))\right)$
48	Решение уравнения графическим способом по определению сечения на корытце, когда абсцисса средней линии равна b_D	$u := 2, (2 + 0.1) .. 40$ 
49	Определение абсциссы сечения с максимальной толщиной численным методом $z := b_D$	$Z_D := \text{root}\left(z + R_{D\max} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \text{atan}(W'(z))\right) - b_D, z\right)$ $Z_D = 20.527$

Таблица 4. 1(Продолжение)

50	Уравнение касательной и нормали в точке на корытце	$T_{W(u)} := W'(Z_D) \cdot (u - Z_D) + W(Z_D)$ $N_{W(u)} := \frac{-1}{W'(Z_D)} \cdot (u - Z_D) + W(Z_D)$
51	Абсцисса центра окружности максимальной толщины	$x_{0D} := Z_D + R_{Dmax} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \text{atan}(W'(Z_D))\right)$ $x_{0D} = 24.5$
	Ордината центра окружности максимальной толщины	$y_{0D} := W(Z_D) + R_{Dmax} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \text{atan}(W'(Z_D))\right)$ $y_{0D} = 88.11$
52	Параметрическое уравнение окружности максимальной толщины	$x_{Dmax}(\theta) := R_{Dmax} \cdot \sin(\theta) + x_{0D}$ $y_{Dmax}(\theta) := R_{Dmax} \cdot \cos(\theta) + y_{0D}$
53	Абсцисса и ордината сечения максимальной толщины на спинке	$X_{SD} := x_{Dmax}(-\text{atan}(W'(Z_D)))$ $X_{SD} = 29.133$ $X_{SD} := Z_D + 2 \cdot \Delta x_D(Z_D) \quad X_{SD} = 29.133$ $Y_{SD} := y_{Dmax}(-\text{atan}(W'(Z_D)))$ $Y_{SD} = 94.931$
	Уравнение касательной в точке на корытце	$T_S(u) := W'(Z_D) \cdot (u - X_{SD}) + Y_{SD}$
54	<p> $W(u)$ $T_{W(u)}$ $N_{W(u)}$ $y_{Dmax}(\theta)$ $V_{CI}(\theta)$ Y_{SD} $T_S(u)$ </p> <p> $u, u, u, x_{Dmax}(\theta), U_{CI}(\theta), u$ </p>	

Таблица 4. 1(Продолжение)

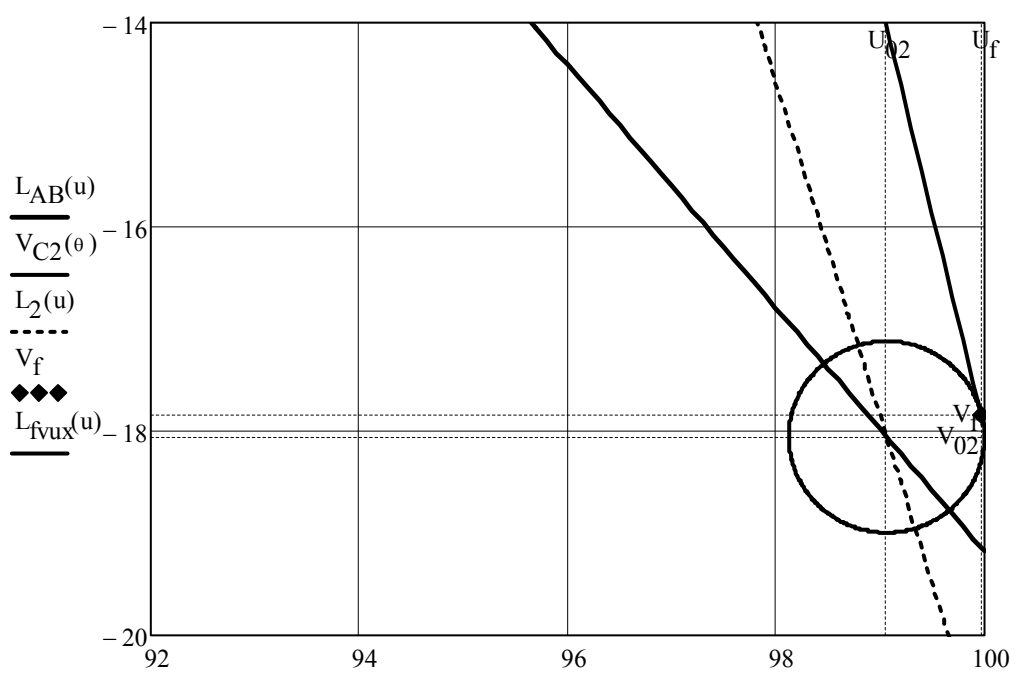
	<p>Из рисунка видно, что спинка может быть описана двумя параболами, сопрягающимися в сечении максимальной толщины.</p> <p>Принципиально начальный участок спинки может быть описан и другим типом кривых, в том числе и окружностью. Однако в этом случае необходимо уточнять угол заострения входной кромки.</p>	
60	<p>Построение спинки профиля лопатки.</p> <p>Определение координат точки f</p>	<p>Угол касательной в точке f с горизонтальной осью U</p> $\beta_{fu} := 90 + \alpha_1 - \frac{\gamma_{vux}}{2} \quad \beta_{fu} = 103.5$ <p>Параметрический угол в точке f</p> $\theta_f := \left(\alpha_1 - \frac{\gamma_{vux}}{2} \right) \cdot \frac{\pi}{180} \quad \theta_f = 0.236$ $\alpha_1 - \frac{\gamma_{vux}}{2} = 13.5 \quad \theta_f \cdot \frac{180}{\pi} = 13.5$ $U_f := U_{C2}(\theta_f) \quad U_f = 99.974$ $V_f := V_{C2}(\theta_f) \quad V_f = -17.839$
61	Уравнение касательной к выходной кромке в точке f	$L_{fvux}(u) := \tan \left[\left(\beta_{fu} \right) \cdot \frac{\pi}{180} \right] \cdot (u - U_f) + V_f$
62	<p>Выходная кромка лопатки, линия AB, центр окружности выходной кромки, линия направления выхода потока $L_2(u)$, касательная в точке f $L_{fvux}(u)$</p>  <p>Legend:</p> <ul style="list-style-type: none"> $L_{AB}(u)$ (solid line) $V_{C2}(\theta)$ (solid line) $L_2(u)$ (dashed line) V_f (dashed line) $L_{fvux}(u)$ (dashed line) 	

Таблица 4. 1(Окончание)

63	Построение контрольных треугольников, в которые вписывается спинка профиля в виде какой-либо кривой или нескольких кривых	<p>Угол наклона линии lq - основания контрольного треугольника к оси U</p> $\alpha_{lq} := \operatorname{atan}\left(\frac{Y_{SD} - V_1}{X_{SD} - U_1}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \alpha_{lq} = -8.149$ <p>Длина линии lq</p> $\Delta L_{lq} := \left[(Y_{SD} - V_1)^2 + (X_{SD} - U_1)^2 \right]^{0.5}$ $\Delta L_{lq} = 27.43$ <p>Уравнение линии lq</p> $L_{lq}(u) := \tan\left(\alpha_{lq} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot (u - U_1) + V_1$
64	Координаты точки B_q входного контрольного треугольника	$Z_{\text{вв}} := \frac{U_1 + X_{SD}}{2}$ $U_{Bq} := \operatorname{root}(L_{lvx}(z) - T_S(z), z)$ $U_{Bq} = 13.902$ $V_{Bq} := L_{lvx}(U_{Bq}) \quad V_{Bq} = 105.276$
65	Расчетная схема: входная и выходная кромки профиля; окружность максимальной толщины; касательная к сечению максимальной толщины; касательная к входной кромке; касательная к выходной кромке; линия хорды профиля; корытце как элемент расчетной схемы.	
	Конец программы	

5. Построение двухпараболической спинки профиля

Следующим этапом проектирования профиля лопатки является построение спинки профиля. До этого этапа необходимо определиться каким образом (какими кривыми) будет описана спинка. В настоящей программе спинка, выпуклая часть профиля лопатки, очерчена двумя параболами.

Программа построения двухпараболической спинки приведена в таблице 5. 1. (Вариант программы построения двухпараболической спинки приведен в работе [11].)

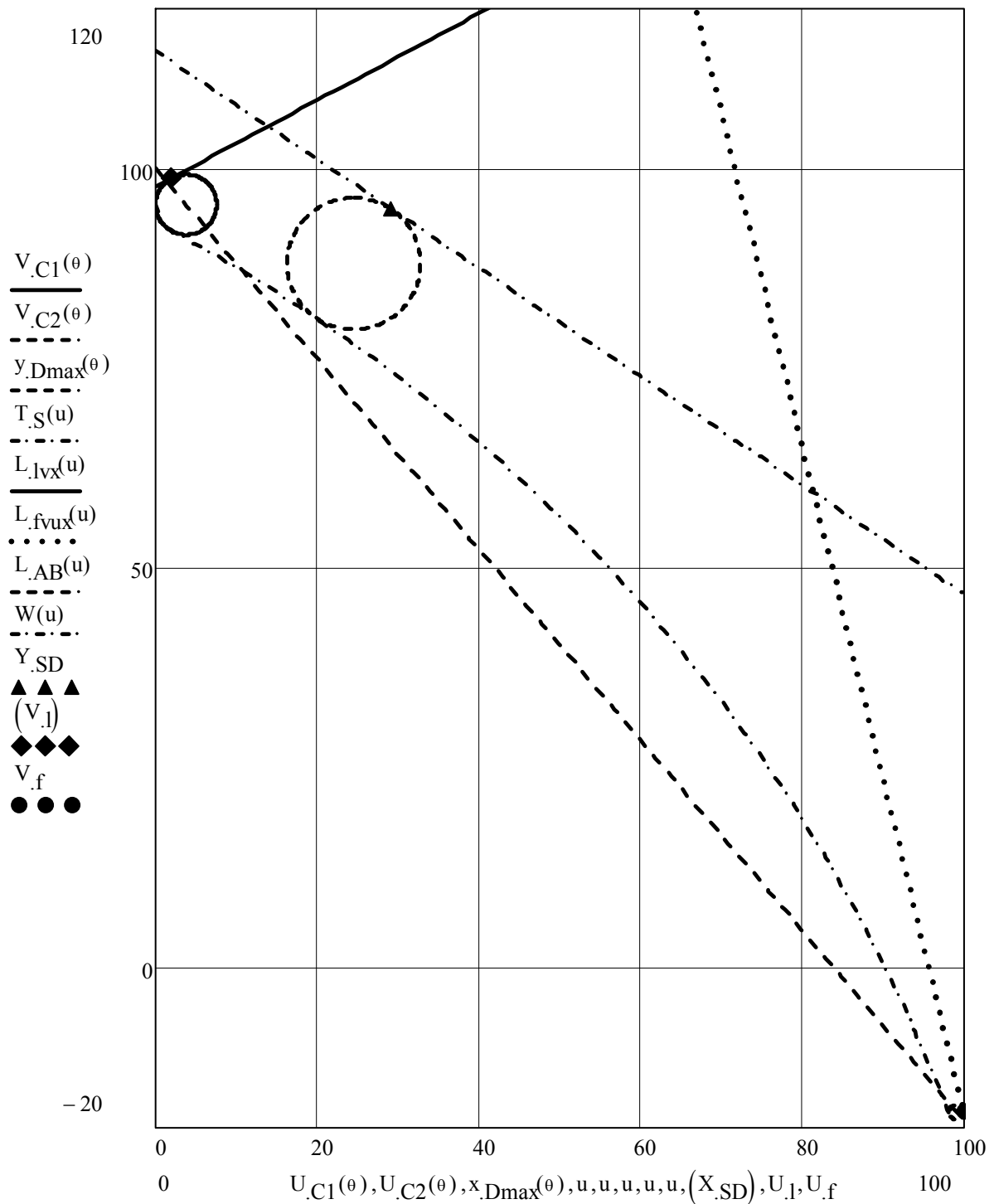


Рис. 4. 1. Расчетная схема: входная и выходная кромки профиля; окружность максимальной толщины; касательная к сечению максимальной толщины; касательная к входной кромке; касательная к выходной кромке; линия хорды профиля; корытце как элемент расчетной схемы (п. 65, Таблица 4. 1)

Таблица 5. 1

Построение спинки лопатки из двух сопряженных парабол

№ п/п	Наименование параметра	Формула, результат																																
1	Построение двухпараболической спинки профиля лопатки. Исходные данные:	$\alpha_{\text{yct}} := 40 \quad r_{\text{vx}} := 0.0243 \alpha_0 := 90$ $r_{\text{vux}} := 0.006025 \quad \alpha_1 := 17 \quad m := 1.05 \quad \gamma := 7$ $\gamma_{\text{vux}} := 7 \quad b_D := 24.5$																																
	Производится расчет параметров расчетной схемы решетки профилей по программе, когда задана толщина профиля																																	
2	Формат параметров подпрограммы построения параболы	$\text{CRDR}(N, x_A, y_A, \varepsilon_A, x_C, y_C, \varepsilon_C)$ $M_{\text{LQ}}^T =$ <table><tr><td></td><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td>1.98</td><td>2.728</td><td>3.483</td><td>5.012</td><td>8.148</td><td>14.729</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td>98.819</td><td>99.206</td><td>99.56</td><td>100.171</td><td>100.997</td><td>101.075</td><td></td></tr><tr><td>2</td><td>0.496</td><td>0.458</td><td>0.419</td><td>0.34</td><td>0.175</td><td>-0.142</td><td></td></tr></table>		0	1	2	3	4	5		0	1.98	2.728	3.483	5.012	8.148	14.729		1	98.819	99.206	99.56	100.171	100.997	101.075		2	0.496	0.458	0.419	0.34	0.175	-0.142	
	0	1	2	3	4	5																												
0	1.98	2.728	3.483	5.012	8.148	14.729																												
1	98.819	99.206	99.56	100.171	100.997	101.075																												
2	0.496	0.458	0.419	0.34	0.175	-0.142																												
3	Фрагмент матрицы координат параболы на входном участке lq (1-ый контрольный треугольник)	$M_{\text{LQ}}^T =$ <table><tr><td></td><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr><tr><td>0</td><td>2.392</td><td>3.265</td><td>4.135</td><td>5.864</td><td>9.275</td><td>15.916</td><td>22.</td></tr><tr><td>1</td><td>99.011</td><td>99.345</td><td>99.655</td><td>100.204</td><td>101.016</td><td>101.5</td><td>100.</td></tr><tr><td>2</td><td>0.376</td><td>0.354</td><td>0.331</td><td>0.283</td><td>0.182</td><td>-0.042</td><td></td></tr></table>		0	1	2	3	4	5	6	0	2.392	3.265	4.135	5.864	9.275	15.916	22.	1	99.011	99.345	99.655	100.204	101.016	101.5	100.	2	0.376	0.354	0.331	0.283	0.182	-0.042	
	0	1	2	3	4	5	6																											
0	2.392	3.265	4.135	5.864	9.275	15.916	22.																											
1	99.011	99.345	99.655	100.204	101.016	101.5	100.																											
2	0.376	0.354	0.331	0.283	0.182	-0.042																												
4	Интерполяция параболы lq кубическим сплайном	$X_{lq} := M_{\text{LQ}}^{\langle 0 \rangle} \quad Y_{lq} := M_{\text{LQ}}^{\langle 1 \rangle}$ $S_{lq}(v) := \text{interp}(\text{cspline}(X_{lq}, Y_{lq}), X_{lq}, Y_{lq}, v)$																																
5	Матрица координат параболы на выходном участке qf (2-ой контрольный треугольник). Интерполяция параболы qf кубическим сплайном	$M_{qf} := \text{CRDR}\left(10, X_{\text{SD}}, Y_{\text{SD}}, \text{atan}(W'(Z_D)), U_f, V_f, \beta_{fu} \cdot \frac{\pi}{180}\right)$ $M_{qf}^T =$ <table><tr><td></td><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr><tr><td>0</td><td>29.133</td><td>29.235</td><td>29.337</td><td>29.541</td><td>29.948</td><td>30.759</td><td>32.368</td></tr><tr><td>1</td><td>94.931</td><td>94.861</td><td>94.792</td><td>94.653</td><td>94.373</td><td>93.811</td><td>92.67</td></tr><tr><td>2</td><td>-0.597</td><td>-0.597</td><td>-0.598</td><td>-0.6</td><td>-0.603</td><td>-0.61</td><td>..</td></tr></table> $X_{qf} := M_{qf}^{\langle 0 \rangle} \quad Y_{qf} := M_{qf}^{\langle 1 \rangle}$ $S_{qf}(v) := \text{interp}(\text{cspline}(X_{qf}, Y_{qf}), X_{qf}, Y_{qf}, v)$		0	1	2	3	4	5	6	0	29.133	29.235	29.337	29.541	29.948	30.759	32.368	1	94.931	94.861	94.792	94.653	94.373	93.811	92.67	2	-0.597	-0.597	-0.598	-0.6	-0.603	-0.61	..
	0	1	2	3	4	5	6																											
0	29.133	29.235	29.337	29.541	29.948	30.759	32.368																											
1	94.931	94.861	94.792	94.653	94.373	93.811	92.67																											
2	-0.597	-0.597	-0.598	-0.6	-0.603	-0.61	..																											
6	Уравнение спинки из двух парабол																																	
	$S_{2p}(u) :=$	$\begin{cases} \sqrt{r_{\text{vx}}^2 - (u - U_{01})^2} + V_{01} & \text{if } 0 \leq u < U_1 \\ S_{lq}(u) & \text{if } U_1 \leq u < X_{\text{SD}} \\ S_{qf}(u) & \text{if } X_{\text{SD}} \leq u < U_f \\ \sqrt{r_{\text{vux}}^2 - (u - U_{02})^2} + V_{02} & \text{if } U_f \leq u \leq b \end{cases}$																																

Таблица 5. 1(Окончание)

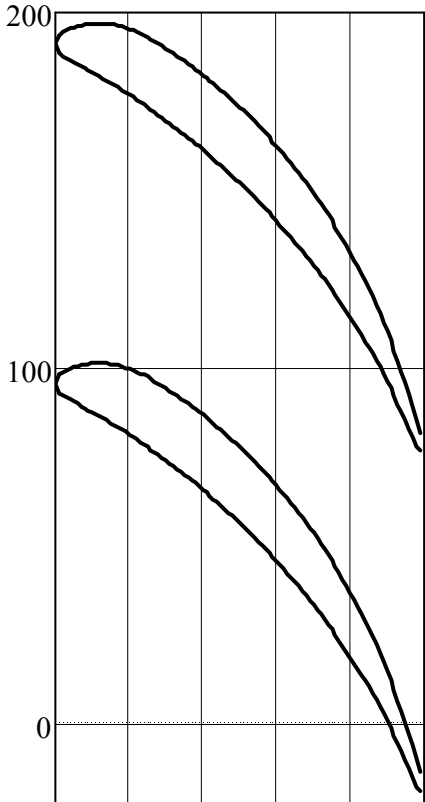
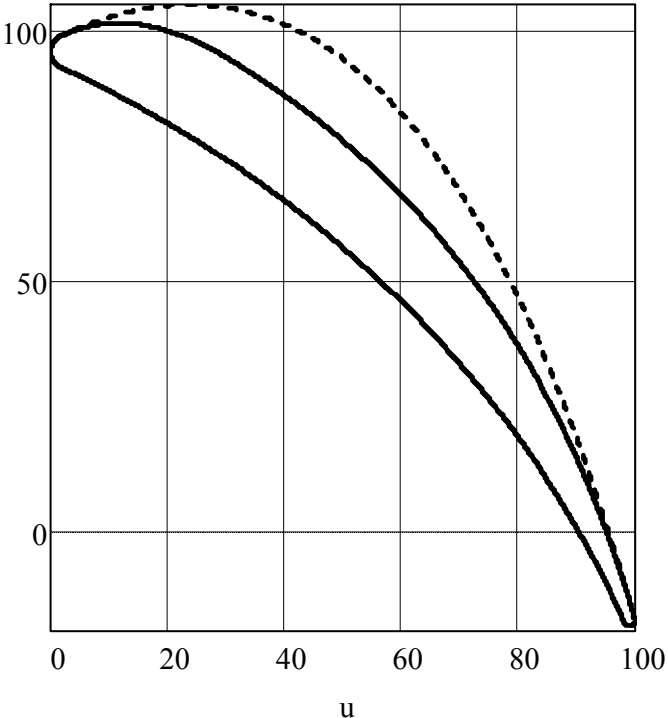
7	Решетка профилей со спинкой из двух сопряженных парабол и корытцем в виде окружности одного радиуса.	 <p>0 $S_{2p}(u)$ $W(u)$ $t+S_{2p}(u)$ $t+W(u)$</p>
8	Сравнение профилей, очерченных одной и двумя параболой. Из рисунка видно, что профиль заданной толщины менее наполненный, т.е. более тонкий.	 <p>0 $S_{2p}(u)$ $W(u)$ $S_p(u)$ ---</p> <p>u</p>
	Конец программы	

Таблица 6. 1(Продолжение)

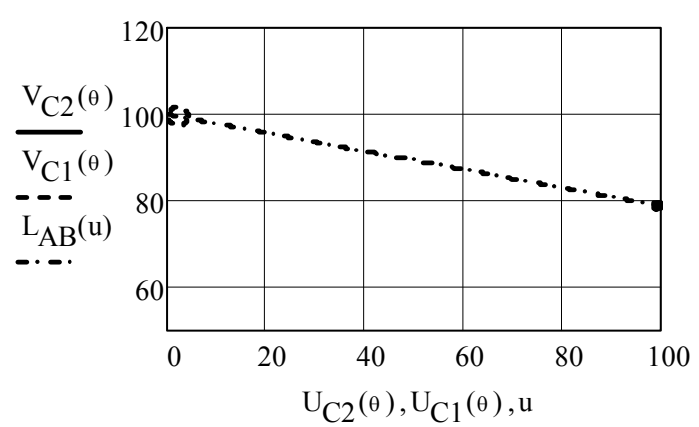
		$K_t := 0.58 \quad R_{ww} = 0.595 \quad \gamma_{vux} := 7$ $m := 1.05 \quad V_A := 100 \quad b := 100$
2	Уравнение хорды профиля по углу установки	$\alpha_{AB} := 90 - \alpha_{yct} \quad \alpha_{AB} = 12 \quad U_A := 0$ $L_{AB}(u) := \tan\left(-\alpha_{AB} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot u + V_A$
3	Определение размеров хорды профиля, радиусов входной и выходной кромок, а также радиуса корытца (вогнутой части профиля)	$b_0 := \frac{b}{\cos\left(\alpha_{AB} \cdot \frac{\pi}{180}\right)} \quad b_0 = 102.234$ $R_{ww}(b_0) = 60.877 \quad r_{vx} := r_{rvx} \cdot b_0$ $r_{vx} = 2.116 \quad r_{vux} := r_{rvux} \cdot b_0 \quad r_{vux} = 0.798$
4	Координаты входной кромки профиля	$U_{01} := r_{vx} \quad U_{01} = 2.116$ $V_{01} := L_{AB}(r_{vx}) \quad V_{01} = 99.55$
5	Координаты выходной кромки профиля лопатки	$U_{02} := b - r_{vux} \quad U_{02} = 99.202$ $V_{02} := L_{AB}(b - r_{vux}) \quad V_{02} = 78.914$
6	Параметрические уравнения входной и выходной кромок	$U_{C1}(\theta) := r_{vx} \cdot \cos(\theta) + U_{01}$ $V_{C1}(\theta) := r_{vx} \cdot \sin(\theta) + V_{01}$ $U_{C2}(\theta) := r_{vux} \cdot \cos(\theta) + U_{02}$ $V_{C2}(\theta) := r_{vux} \cdot \sin(\theta) + V_{02}$
7	Кромки входная, выходная и хорда профиля	$\theta := 0, 0.01 \dots 2 \cdot \pi$
	 <p> $\frac{V_{C2}(\theta)}{V_{C1}(\theta)}$ $L_{AB}(u)$ </p> <p> $U_{C2}(\theta), U_{C1}(\theta), u$ </p>	
8	Уравнение линии выхода потока	$\alpha_{0u} := 90 - \alpha_0 \quad \alpha_{0u} = 50$ $L_1(u) := \tan\left(\alpha_{0u} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot (u - U_{01}) + V_{01}$
9	Уравнение линии выхода потока	$L_2(u) := -\cot\left(\frac{1}{180} \cdot \pi \cdot \alpha_1\right) \cdot (u - U_{02}) + V_{02}$ $V_{02} = 78.914 \quad V_{01} = 99.55$

Таблица 6. 1(Продолжение)

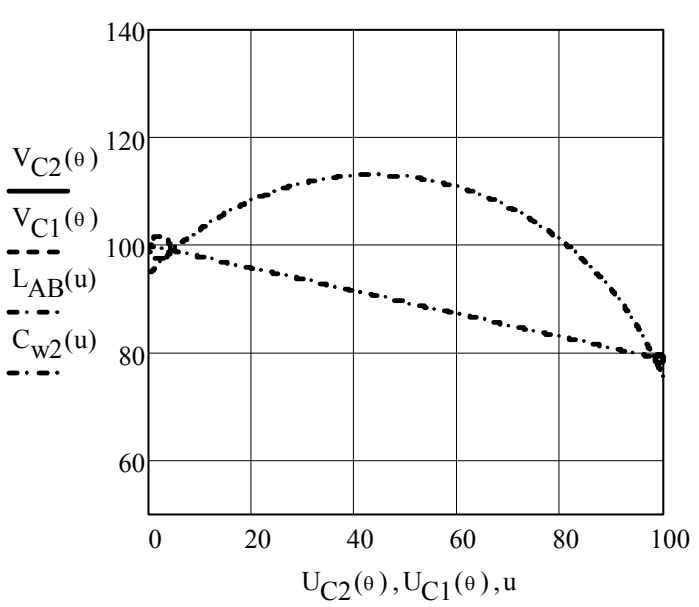
10	Построение корытца лопатки в виде окружности одного радиуса и определение параметров сопряжения окружности корытца с окружностями кромок с помощью подпрограммы <i>Pp_SPR_2C_R_zdn.xmcd</i> , используя функцию <i>Reference</i>	
11		<i>Reference C:\Pp_SPR_2C_R_zdn.xmcd</i>
12	Переменная матрицы, фрагменты матрицы параметров окружности корытца и матрицы выходных параметров переменной M2 $M2 := Pp_SPR_2C_Rzdn[r_{vx}, r_{vux}, R_{ww} \cdot (b_0), b, U_{01}, V_{01}, U_{02}, V_{02}]$ $M2 = \begin{pmatrix} 43.626 & 52.169 & -0.851 & -0.851 & 3.51 & 97.959 \\ 0 & 0 & 0.449 & 3.59 & 98.482 & 78.568 \end{pmatrix}$	
13	Координаты центра окружности корытца	$U_{03} := M2_{0,0} \quad U_{03} = 43.626$ $V_{03} := M2_{0,1} \quad V_{03} = 52.169$
14	Уравнение корытца в виде окружности одного радиуса. В этом случае известны параметры окружностей кромок профиля и радиус корытца. Все остальные параметры сопряжения окружностей определяются в результате работы подпрограммы <i>Pp_SPR_2C_Rzdn.xmcd</i> $C_{w2}(u) := \sqrt{(R_{ww} \cdot b_0)^2 - (u - U_{03})^2} + V_{03}$	
15	Хорда входная и выходные кромки профиля	
16	Шаг, величина горла, угол в точке P	$t := K_t \cdot b_0 \quad t = 59.296$ $a_{th} := t \cdot \frac{\sin\left(\alpha \cdot 1 \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{m} \quad a_{th} = 19.315$

Таблица 6. 1(Продолжение)

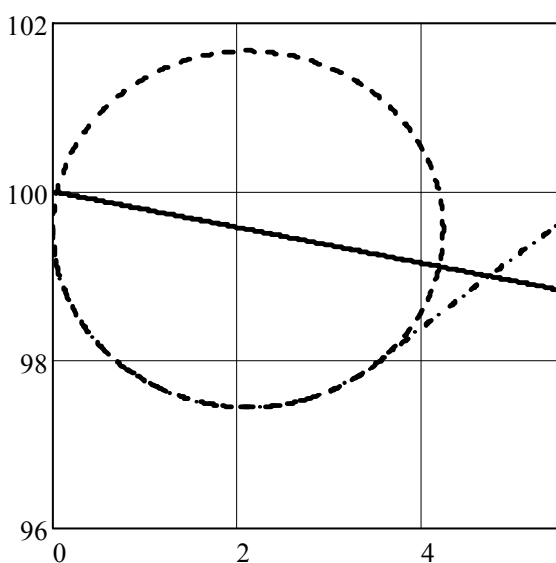
		$\beta := \alpha_1 - \left(\frac{\gamma \text{vux}}{2} \right) + \gamma \quad \beta = 17.077$
17	Координаты центра выходной кромки соседней лопатки	$U_{O'2} := U_{02} \quad U_{O'2} = 99.202$ $V_{O'2} := V_{02} + t \quad V_{O'2} = 138.21$
18	Параметры точки h	$\theta_h := \pi + \left(\alpha_1 - \frac{\gamma \text{vux}}{2} \right) \cdot \frac{\pi}{180} \quad \theta_h = 3.552$ $U_h := U_{C2}(\theta_h) \quad U_h = 98.469$ $V_h := V_{C2}(\theta_h) \quad V_h = 78.596$ $\beta_{hx} := \theta_h - \pi \quad \beta_{hx} = 0.41$ $\Delta U := U_h - U_{01} \quad \Delta U = 96.354$ $\Delta V := V_h - V_{01} \quad \Delta V = -20.955$
19	Уравнения входной и выходной кромок в декартовых координатах	$C_1(u) := -\sqrt{r_{vx}^2 - (u - U_{01})^2} + V_{01}$ $C_2(u) := -\sqrt{r_{vux}^2 - (u - U_{02})^2} + V_{02}$
20	Координаты точки g на передней кромке корытца	$\theta_g := \left(3 \cdot \frac{\pi}{2} \right) - \text{atan} \left(\frac{U_{01} - U_{03}}{V_{01} - V_{03}} \right)$ $\theta_g = 5.432 \quad U_g := U_{C1}(\theta_g) \quad U_g = 3.51$
21	Уравнение корытца	$\underline{W(u)} := \begin{cases} C_1(u) & \text{if } 0 \leq u < U_g \\ C_{w2}(u) & \text{if } U_g \leq u < U_h \\ C_2(u) & \text{if } U_h \leq u < b \end{cases}$
22	Входная кромка - сопряжение окружности входной кромки и окружности корытца	 <p> $\underline{V_{C2}(\theta)}$ $\underline{V_{C1}(\theta)}$ $\underline{L_{AB}(u)}$ $\underline{W(u)}$ </p> <p style="text-align: center;">$U_{C2}(\theta), U_{C1}(\theta), u$</p>

Таблица 6. 1(Продолжение)

23	Выходная кромка - сопряжение окружности корытца и окружности выходной кромки	<p> $V_{C2}(\theta)$ $V_{C1}(\theta)$ $L_{AB}(u)$ $W(u)$ </p> <p>98.482</p> <p>78.568</p> <p>97 98 99 100</p> <p>$U_{C2}(\theta), U_{C1}(\theta), u$</p>
24	Угол касательной и нормали к кривой спинки	$\alpha_W(u) := \operatorname{atan}\left(\frac{d}{du} W(u)\right)$ $\nu(u) := \alpha_W(u) + \frac{\pi}{2}$
25	Горло решетки на выходе	$a_{th'} := t \cdot \frac{\sin\left(\alpha_1 \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{m} \quad a_{th'} = 19.315$
26	Радиус вписанных окружностей в межлопаточный канал	$R_{ch} := \frac{a_{th'}}{2} \quad R_{ch} = 9.657$
27	Приращение координат центра окружностей межлопаточного канала	$\Delta_u(u) := R_{ch} \cdot \cos(\nu(u))$ $\Delta_v(u) := R_{ch} \cdot \sin(\nu(u))$
28	Координаты центров окружностей межлопаточного канала	$x_{0ch}(u) := u - \Delta_u(u)$ $y_{0ch}(u) := W(u) - \Delta_v(u)$
29	Уравнение окружности межлопаточного канала в параметрическом виде	$X_{ch}(\theta, u) := R_{ch} \cdot \cos(\theta) + u - \Delta_u(u)$ $Y_{ch}(\theta, u) := R_{ch} \cdot \sin(\theta) + W(u) - \Delta_v(u)$
30	Введем абсциссу близкую к абсциссе т. h	$U'_h := (U_h) - 0.1$
31	Строим контрольный треугольник активного профиля. Нормали в т.т. g и h	$N_{wvx}(u) := \tan(\nu(U_g)) \cdot (u - U_g) + W(U_g)$ $N_{wvux}(u) := \tan(\nu(U'_h)) \cdot (u - U'_h) + W(U'_h)$
32	Уравнение концентрической окружности, формирующей спинку	$C_S(u) := \sqrt{(R_{ww} \cdot b_0 - a_{th'})^2 - (u - U_{03})^2} + V_{03}$
33	Расчетная схема активного профиля: корытце, концентрическая окружность, окружности, вписанные в межлопаточный канал и нормали для т.т. g, h, центр окружностей корытца и концентрической, контрольный треугольник	

Таблица 6. 1(Продолжение)

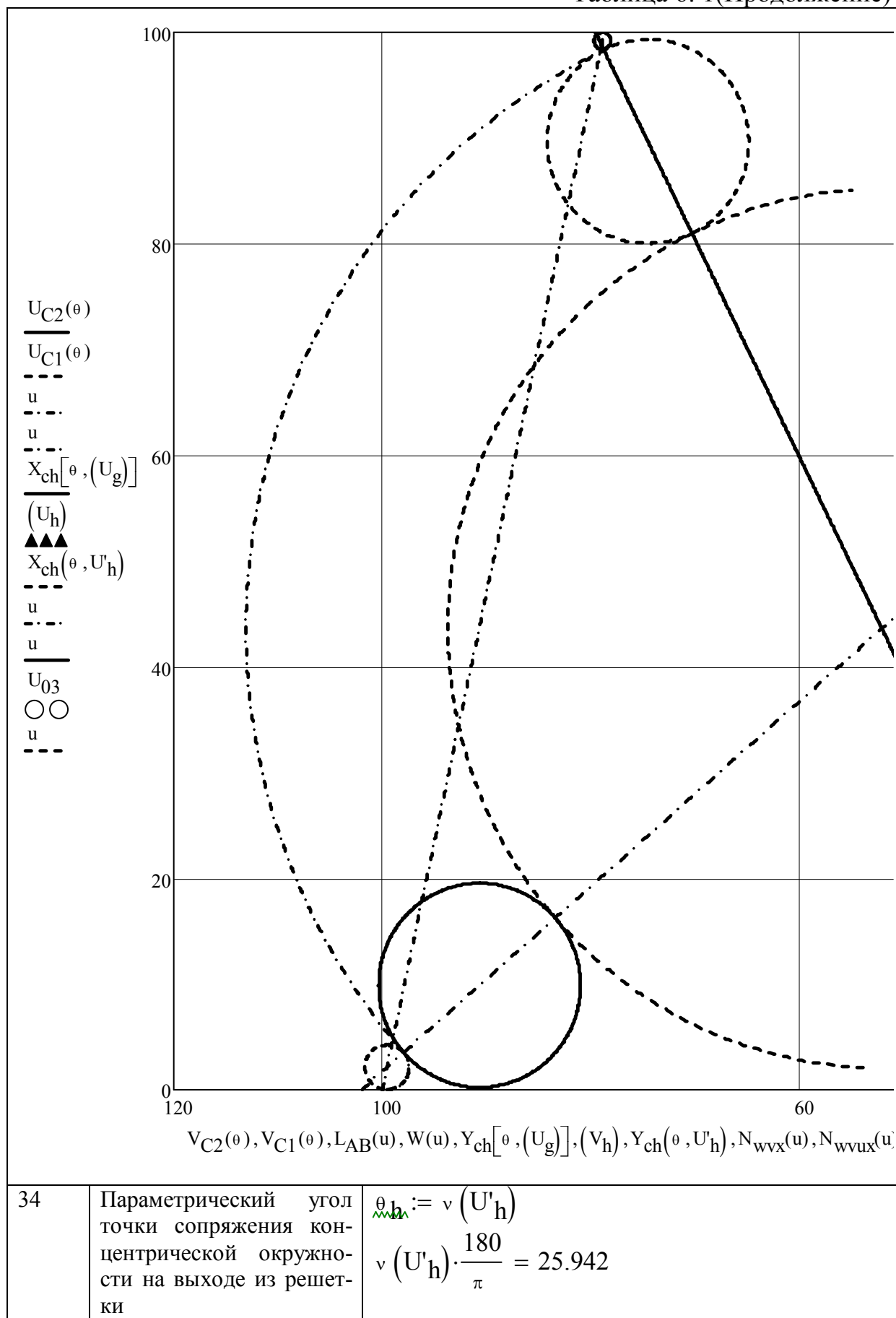


Таблица 6. 1(Продолжение)

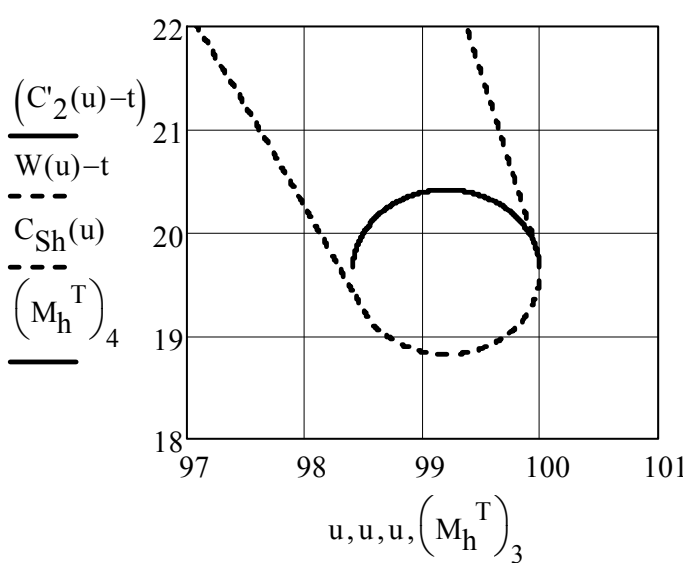
35	Абсцисса и ордината точки сопряжения h	$X_h := (R_{ww} \cdot b_0 - a_{th'}) \cdot \cos(\theta_h) + U_{03}$ $X_h = 81.00108$ $Y_h := (R_{ww} \cdot b_0 - a_{th'}) \cdot \sin(\theta_h) + V_{03}$ $Y_h = 70.35133$
36	Наклон касательной в т. h и уравнение касательной	$\alpha_h := \arctan(U'_h) - \frac{\pi}{2}$ $\alpha_h \cdot \frac{180}{\pi} = -64.058$ $L_h(u) := \tan(\alpha_h) \cdot (u - X_h) + Y_h$
37	Уравнение полуокружности выходной кромки	$C'_2(u) := \sqrt{r_{vux}^2 - (u - U_{02})^2} + V_{02}$
38	Подпрограмма сопряжения	Reference: \Pp_Spr_Okr+P.xmcd
39	Фрагмент матрицы параметров сопряжения, матрицы выходных параметров переменной Mh	$M_h := \text{Pp_Spr_Okr_P}(U_{02}, V_{02} - t, r_{vux}, X_h, Y_h, \alpha_h)$ $\begin{pmatrix} R_{spr} & \alpha_{2s} & \theta_{2s} & x_{2s} & y_{2s} & x_{02s} & y_{02s} \end{pmatrix}$ $M_h = (288.761 \quad 0.266 \quad 0.266 \quad 99.972 \quad 19.828 \quad -178.663 \quad -55.972)$
40	Уравнение сопрягающей окружности	$C_{Sh}(u) := \sqrt{\left[\begin{pmatrix} M_h^T \end{pmatrix}_0 \right]^2 - \left[u - \left[\begin{pmatrix} M_h^T \end{pmatrix}_5 \right] \right]^2} + \left[\begin{pmatrix} M_h^T \end{pmatrix}_6 \right]$
41	Область выходной кромки; сопряжение выходной кромки, спинки и корытца	
42	Уравнение окружности входной кромки в декартовых координатах - верхняя полуокружность	$C'_1(u) := \sqrt{r_{vx}^2 - (u - U_{01})^2} + V_{01}$

Таблица 6. 1(Продолжение)

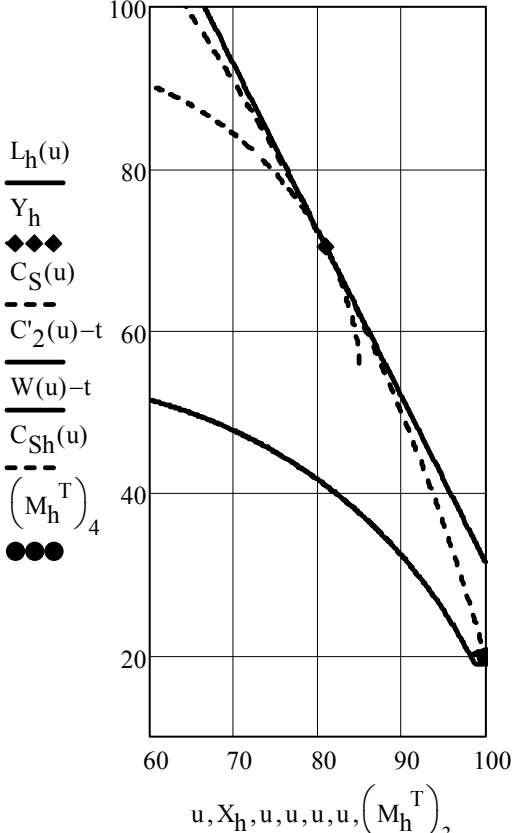
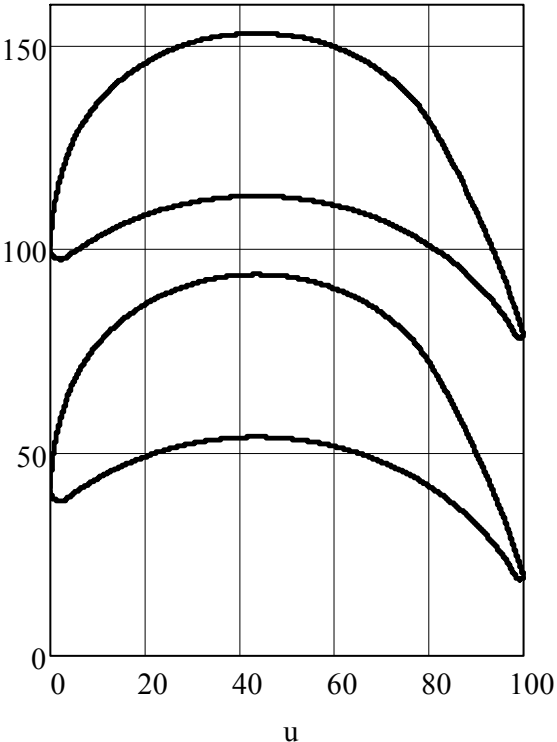
43	Формирование спинки в виде концентрической окружности в области выходной кромки	
44	Координаты точки сопряжения спинки со стороны входной кромки gs	$U_{gs} := U_g + 2 \cdot R_{ch} \cdot \cos(\theta_g) \quad U_{gs} = 16.238$ $V_{gs} := C_S(U_{gs}) \quad V_{gs} = 83.431$ $\alpha_{gs}(u) := \text{atan}\left(\frac{d}{du} C_S(u)\right)$ $\alpha_{gs}(U_{gs}) \cdot \frac{180}{\pi} = 41.222$ $\alpha_{gs} := \theta_g - 3 \cdot \frac{\pi}{2} \quad \alpha_{gs} \cdot \frac{180}{\pi} = 41.222$
	<p>Сопряжение спинки со стороны входной кромки и точки gs показало, что сопрягающая окружность выходит за пределы решетки. (Сопрягается нижняя полуокружность вместо верхней.)</p> <p>Следует изменить угол установки профиля или изменить алгоритм сопряжения входной кромки и спинки профиля.</p>	
45	Подпрограмма сопряжения	Reference: Pp_Spr_Okp+P.xmcd
46	<p>Переменная сопряжения. Формат матрицы выходных параметров переменной</p> $M_2 := Pp_Spr_Okp_P \left(U_{03}, V_{03}, R_{ww} \cdot b_0 - a_{th}, 0, W(0) - t, \frac{\pi}{2} \right)$ $M_2 := M_2^T \quad (R_{spr} \quad \alpha_{2s} \quad \theta_{2s} \quad x_{2s} \quad y_{2s} \quad x_{02s} \quad y_{02s})$	

Таблица 6. 1(Продолжение)

47	Вектор значений параметров сопряжения	$M_2 = \begin{pmatrix} 76.988 \\ -0.343 \\ 2.799 \\ 4.485 \\ 66.148 \\ 76.988 \\ 40.255 \end{pmatrix}$
48	Уравнение сопрягающей окружности	$C_{ws}(u) := \sqrt{(M_{2_0})^2 - (u - M_{2_5})^2} + M_{2_6}$
49	Расчетная схема входного участка: входная кромка, спинка, корытце, сопрягающая окружность	
50	Уравнение спинки профиля лопатки	$S_{pa}(u) := \begin{cases} C_{ws}(u) & \text{if } 0 \leq u < M_{2_3} \\ C_S(u) & \text{if } M_{2_3} \leq u < X_h \\ C_{Sh}(u) & \text{if } X_h \leq u < (M_h^T)_3 \\ (C'_2(u) - t) & \text{if } (M_h^T)_3 \leq u \leq b \end{cases}$

Таблица 6. 1(Окончание)

51	Решетка активных профилей рабочих лопаток	 <p> $\frac{S_{pa}(u) - t}{S_{pa}(u) + t}$ </p> <p>u</p>
	Конец программы	

Литература

1. Емин О.Н., Розанов И.Г. ТЕЧЕНИЕ И ПОТЕРИ В ПЛОСКОЙ ТУРБИННОЙ РЕШЕТКЕ. Учебное пособие. М.: ОБОРОНГИЗ, 1961
2. Бойко А.В., Говорущенко Ю.И. Основы теории оптимального проектирования проточной части осевых турбин: [Учеб. Пособие для вузов по спец. «Турбостроение»]. – Х. :Выща шк., Изд-во при ХГУ, 1989. – 217 с..
3. Траупель в. ТЕПЛОВЫЕ ТУРБОМАШИНЫ (ПАРОВЫЕ И ГАЗОВЫЕ ТУРБИНЫ, КРМПРЕССОРЫ) том первый ТЕПЛОЙ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ. М-Л.: ГОСЭНЕРГОИЗДАТ, 1961
4. Жирицкий Г.С., Локай В.И., МаксUTOва М.К., Стрункин В. А. Газовые турбины авиационных двигателей: Учебное пособие для авиационных вузов и факультетов. – М.: Оборонгиз, 1963.
5. Кириллов И.И. ГАЗОВЫЕ ТУРБИНЫ. М-Л.: МАШГИЗ, 1948.
6. Кириллов И.И. ТЕОРИЯ ТУРБОМАШИН. М-Л.: МАШИНОСТРОЕНИЕ, 1964
7. Кириллов И.И., Кириллов А.И. Теория турбомашин. Учебное пособие для вузов. Л.: Машиностроение, 1974.-320.
8. Холщевников К.В. ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ АВИАЦИОННЫХ ЛОПАТОЧНЫХ МАШИН. М.: МАШИНОСТРОЕНИЕ, 1970.
9. Копелев С.З. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБИН АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. М.: МАШИНОСТРОЕНИЕ, 1984.
10. Виноградов Л.В. Система автоматизированного проектирования параболического контура // Вестник РУДН. Серия «Информационные технологии и управление». М. РУДН, №1 (8), 2007. - С. 10-15.
11. Виноградов Л.В. Спинка лопатки турбины из двух сопряжённых парабол. //Вестник РУДН. Серия «Информационные технологии и управление»..М. РУДН, №2, 2008. - С. 15-20.
12. Митрохин В.Т. Выбор параметров и расчет центростремительной турбины. М. Издательство «МАШИНОСТРОЕНИЕ», 1966. – С. 198.

Учебное издание

Виноградов Леонид Валерьевич

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ЛОПАТОК ТУРБИН**

Под редакцией проф., к.т.н., Виноградова Л.В.

*Оригинал – макет подготовлен редакционно-издательским отделом
МГТУ “МАМИ”*

По тематическому плану внутривузовских изданий учебной литературы на 2010 г.

Подписано в печать 24.11.2010. Формат 60х90 1/6. Бумага 80 г/м²

Гарнитура “Таймс”. Ризография. Усл. печ. л. 5,5

Тираж 25 экз. Заказ № 158-10.

МГТУ “МАМИ”

107023, г. Москва, Б. Семеновская ул., 38