Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана Калужский филиал

Д.В. Тимофеев, А.И. Савельев, С.С. Панаиотти

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ ЛОПАСТЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ РАБОЧИХ КОЛЕС

Руководство пользователя

Калуга 2008 УДК 621.5 ББК 31.56 Т41

Рецензент:

канд. техн. наук, доцент А.А. Жинов

Утверждено методической комиссией КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана (протокол № 5 от 2.05.2006)

Т41 Тимофеев Д.В., Савельев А.И., Панаиотти С.С. Автоматизированное профилирование лопастей центробежных рабочих колес: Руководство пользователя. — Калуга, 2008. — 66 с.

Разработана программа «Профилирование лопасти» для автоматизированного профилирования лопастей рабочих колес центробежных насосов. Лопасть профилируется на развертке цилиндра на плоскость. Затем элементарные решетки с развертки конформно отображаются на поверхности тока равноскоростного меридианного потока. Профилирование выполняется в интерактивном режиме, а его качество контролируется непосредственно в процессе работы. Программа генерирует пакетные файлы для создания рабочих чертежей в системе AutoCAD.

Руководство предназначено для специалистов, занимающимся расчетом и проектированием лопастных насосов и может быть полезно студентам специальности «Гидромашины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика», выполняющим дипломные проекты.

> УДК 621.5 ББК 31.56

© Тимофеев Д.В., Савельев А.И., Панаиотти С.С., 2006

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАТОРЫ

- *b*₂ (B2) ширина рабочего колеса на выходе, мм
 - *d*, *D* диаметр, мм
 - di шаг отображения меридианов
 - *di* шаг отображения параллелей

 $F = 2\pi R_{\rm u} l_n$ — площадь сечения меридианного потока, мм²

- *H* напор ступени, м
- *k* номер точки на графике толщин лопасти
- *j* номер параллели
- L координата параллели на конформной диаграмме, м
- *l* то же на поверхности тока, м
- *l_n* длина нормали, м
- т номер линии тока
- N = 0, 1, 2, ... число расчетных линий тока
 - *п* частота вращения, об/мин
 - Q_{κ} расход через колесо, м³/с

*R*_п — радиус центра тяжести, м

 $U = \omega r$ — окружная (переносная) скорость, м/с

- $(rV_u)_1$ момент скорости на входе в рабочее колесо, м²/с
 - *V_m* меридианная скорость со стеснением потока, м/с

V'_m — меридианная скорость без стеснения потока, м/с

- $V_{1u} = (rV_u)_1$ окружная составляющая абсолютной скорости на входе в рабочее колесо, м/с
 - *W* относительная скорость, м/с
 - *z* координата, мм
 - *z*₀ координата торца входной воронки, мм
 - Z число лопастей рабочего колеса
 - β угол относительного потока, градус
 - $\beta_{\scriptscriptstyle \! \Pi} \left(B_{\scriptscriptstyle \! \Pi} \right)$ угол установки лопасти, градус

- δ (dB) угол атаки со стеснением *по умолчанию* при $(rV_u)_1 = 0$ в равноскоростном меридианном потоке, градус
- (delB) угол атаки со стеснением при заданных проектировщиком $(rV_u)_1$ и V'_{1m} , градус
- Δ*L* (dL) расстояние между двумя соседними параллелями на развертке цилиндра, мм
- ΔS (dS) расстояние между двумя соседними меридианами на развертке цилиндра, мм
- θ (TETA) угол охвата лопасти в плане, градус
- λ (LAMB) угол между линией тока и меридианным сечением лопасти, градус
 - $\mu = \theta \phi$ угол на графике толщин лопасти, градус
 - ψ (PSI) коэффициент стеснения
 - ρ (RO) радиус окружности, мм
 - σ (SIG) нормальная толщина лопасти, мм
 - SIG_{*m*} меридианная толщина лопасти, мм
 - φ полярный угол, градус
 - φ₁, *z*₁, *r*₁ цилиндрические координаты точки на входной кромке

Индексы

л — лопасти; п — поворота; ц — центра тяжести; *m* — меридианные составляющие скорости; *n* — нормали; *u* — окружные составляющие скорости;

1 — вход в рабочее колесо; 2 — выход из рабочего колеса

Сокращения

КПД — коэффициент полезного действия; ЛТ — линия тока; МП — меридианная проекция рабочего колеса; МС — меридианное сечение лопасти; ОСЦК — осецентробежное рабочее колесо; ТЗ — техническое задание; ЦК — центробежное рабочее колесо; РК — рабочее колесо

введение

Программа «Профилирование лопасти» автоматизирует весьма трудоемкую и специфическую работу профилирования лопастей рабочих колес центробежных насосов. Она входит в пакет программ для автоматизированного проектирования на ПЭВМ проточных полостей центробежных насосов общепромышленного и специального назначения [4, 12, 14]. Лопасть профилируется после расчета рабочего колеса по одной из вышеупомянутых программ. В случае необходимости, одновременно с профилированием, корректируется расчет рабочего колеса. Для профилирования применяется метод конформных отображений, который отличается наглядностью и простотой. По-видимому, он впервые применен акад. Г.Ф. Проскурой [15] еще в 1913 г. и внедрен в практику гидромашиностроения в последующие годы во ВНИИГидромаше, ВНИИАЭН, ЛМЗ и др. организациях [3, 6, 7, 17]. Предполагается, что проектировщик уже знаком с методикой профилирования лопастей рабочих колес по способу конформных отображений, подробно описанной в работах [7, 17]. Профилирование лопасти выполняется в интерактивном режиме, и любые изменения конформной диаграммы мгновенно отражаются на меридианных сечениях лопасти, углах атаки, скоростях и др. параметрах, по которым оптимизируется форма лопасти. Проектировщик должен уметь пользоваться персональным компьютером с операционной системой Microsoft Windows. Для комфортной работы необходим компьютер Pentium II 266, ОЗУ 64 Мb и выше. В качестве примера профилируются лопасти рабочего колеса питательного насоса ПЭ-580-200, расчет которого приведен в [4]. Проточную полость этого насоса разработал в МВТУ им. Н.Э. Баумана к.т.н. В.И. Мелащенко. Рабочее колесо, спроектированное на основе схемы равноскоростного меридианного потока, следует рассматривать как первое приближение. Для дальнейшей оптимизации формы колеса можно использовать современные гидродинамические методы расчета трехмерного потока.

1. КОНФОРМНОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ



Рис. 1.1. Меридианное сечение рабочего колеса (*a*) и построение нормалей (*б*): — — — — линии тока *e*, *c*, *a*; — — — — — нормали; 0, 1, 2, … — параллели (на средней линии тока); — . — . — — меридианные сечения средней поверхности лопасти

Предполагается, что поверхностями тока в рабочем колесе являются поверхности вращения (рис. 1.1). Меридианная скорость вдоль нормальной линии, пересекающей линии тока под прямым углом, принимается постоянной. Такое упрощение действительного потока называется *схемой равноскоростного меридианного потока*, которая не имеет теоретического обоснования [16]. Однако рабочие колеса насосов низкой и средней быстроходности, а также радиально-осевых обратимых гидромашин, рассчитанные согласно этой схеме, обладают высоким гидравлическим КПД, а расчетный режим хорошо согласуется с оптимальным. Вначале рассчитываются элементарные решетки лопастей на поверхностях тока равноскоростного меридианного потока, как описано в работах [1, 16, 17]. Затем из элементарных решеток на развертке цилиндра на



Рис. 1.2. Отображаемая поверхность тока (*a*), линия тока (*b*), отображающий цилиндр (*b*) и его развертка на плоскость (*c*), согласно [17]

плоскость формируется лопасть. Поверхность лопасти с развертки цилиндра конформно отображается на поверхности тока. Так как при конформном отображении сохраняется подобие соответствующих бесконечно малых фигур, то в соответствии с рис. 1.2

$$\frac{\Delta l}{\Delta s} = \frac{\Delta L}{\Delta S},\tag{1.1}$$

а координаты

$$s = r\varphi; \ S = R\varphi, \tag{1.2}$$

где радиус отображающего цилиндра $R = \Delta S / \Delta \phi$.

Расстояние между параллелями на поверхности тока

$$\Delta l = \frac{\Delta L}{\Delta S} \Delta \phi \cdot r. \tag{1.3}$$

Задаваясь постоянными ΔL , ΔS и $\Delta \phi$ по уравнению (1.3) найдем Δl и нанесем сетку параллелей и меридианов на поверхности тока. ПЭВМ использует густые сетки согласно соотношению (1.3) при $\Delta S / \Delta L = 2...4$ и $\Delta \phi = 1^{\circ}$ с линейной интерполяцией между ее узлами. Это позволяет точно переносить любые линии с развертки цилиндра на поверхности тока и наоборот. По условию конформности отображения ортогональной сетке параллелей и меридианов на цилиндре и его развертке на плоскость соответствует ортогональная же сетка на поверхностях тока. Так как в полярных координатах положение радиальной (меридианной) плоскости определяется полярным углом ϕ , то во избежание недоразумений на приведенных ниже рисунках и в диалоговых окнах номера меридианов не указываются и не задаются.

Для изготовления лопастей, создания твердотельных моделей и дальнейших гидродинамических расчетов необходимы цилиндрические и декартовы координаты точек длинной и короткой лопастей, если колесо проектируется с двухрядной решеткой лопастей. Как следует из рис. 1.3, эти координаты для короткой лопасти, смещенной на угол ε , связаны соотношениями:

$$x_s = r\sin(\varphi + \varepsilon), \quad y_s = r\cos(\varphi + \varepsilon).$$
 (1.4)

Для длинной лопасти



Рис. 1.3. Полярные и декартовы координаты точки для длинной и короткой лопастей

2. ПРОГРАММА «ПРОФИЛИРОВАНИЕ ЛОПАСТИ»

2.1. ГЛАВНОЕ ОКНО ПРОГРАММЫ

Установленная на ПЭВМ программа запускается из главного меню или с помощью ярлыка на рабочем столе. Если используется программа [4], то программа профилирования запускается по команде Выполнить. В этом случае в окна ТЗ и сетка, Размеры МС и др. автоматически заносятся данные рассчитанного колеса.

После запуска программы на экране появляется главное окно программы с изображением меридианного сечения рабочего колеса (рис. 2.1). В этом окне сосредоточены все управляющие функции программы. Главное меню программы содержит три меню: Файл, Параметры и <u>?</u>. Команды меню Файл показаны на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Главное окно программы, меню и команды

В меню **Параметры** находятся все команды, предназначенные для профилирования лопасти. Эти команды дублированы на вертикальной панели управления в правой части главного окна. Если в процессе профилирования эта панель оказалась закрыта диалоговыми окнами, то с помощью меню **Параметры** можно получить доступ к любой команде, не сдвигая и не сворачивая этих окон. Меню <u>?</u> содержит справочное руководство по использованию программы и информацию о программе и авторе.

Если в главном окне левой кнопкой мыши выбрать точку, то отобразятся координаты *z* и *r* этой точки.

На панели инструментов расположены кнопки команд и поле для отображения меридианных сечений: средней поверхности лопасти, лицевой или тыльной сторон лопасти. Чтобы ускорить освоение программы, многие диалоговые окна снабжены «желтыми подсказками».

2.2. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ И ПАРАМЕТРЫ СЕТОК

Из главного окна программы подается команда ТЗ и сетка. В открывшееся диалоговое окно с аналогичным названием вводятся наименование рабочего колеса, данные ТЗ и параметры сеток (рис. 2.2). Следует обратить внимание, что задается не подача насоса, а расход через колесо Ок, учитывающий утечки через уплотнения колеса и в системе разгрузки ротора от осевых сил. Обычно лопасть профилируется по трем или пяти линиям тока. Если задается N = 2, то это соответствует трем линиям тока е, с, а с номерами 0, 1, 2 (рис. 1.1). Значение N = 4 соответствует пяти линиям тока *e*, *d*, *c*, *b*, *a* с номерами 0, 1, 2, 3, 4. Как следует из уравнения (1.3), отношение $\Delta S / \Delta L$ влияет на расстояние между параллелями на поверхностях тока. Чем больше это отношение, тем больше густота сеток на поверхностях тока и тем выше точность построений. Обычно $\Delta S / \Delta L = 2...4$. Шаги отображения меридианов *di* и параллелей *dj* могут выбираться в интервале 1...100 и на точности построений не сказываются.

В окне **ТЗ и сетка** dS соответствует $\Delta \phi = 1^{\circ}$ и задается в мм, dL также задается в мм. Размеры в мм сетки на цилиндре $\Delta S = dS \cdot di$ и $\Delta L = dL \cdot dj$. Параллели на поверхностях тока в главном окне программы отмечены желтыми точками. Если, например, di = 5, а dj = 10, то на развертке цилиндра отображаются каждые пятый меридиан и десятая параллель, а на линиях тока — каждая десятая параллель.



Рис. 2.2. Данные ТЗ и параметры сеток

Момент скорости и меридианная скорость на входе в рабочее колесо определяются подводящим устройством и задаются по нескольким линиям тока в окнах (rVu)1 и (V'm)1. По умолчанию задаются нулевой момент скорости и меридианные скорости равноскоростного меридианного потока.

После ввода основных параметров, в меню **Файл** следует выбрать команду **Сохранить как** и сохранить файл. В дальнейшем рекомендуется сохранять файл по завершении работы с каждым из окон: **Размеры МС, Площадь МС–параллель** и т.д.

2.3. Построение меридианной проекции рабочего колеса

Меридианная проекция (сечение) рабочего колеса отображается в главном окне программы (рис. 2.1). По команде **Размеры МС** открывается диалоговое окно с аналогичным названием (рис. 2.3), в котором задаются размеры сечения, указанные на рис. 1.1. На форму меридианной проекции наложены некоторые ограничения, которые приходится принимать во внимание при его построении: выходная кромка РК параллельна оси вращения, ведущий (основной) диск перпендикулярен этой оси, $\Delta z \ge 0$ и др. Кроме того, в окне **Размеры МС** нельзя ввести набор случайных размеров, по которым невозможно построить меридианную проекцию.

Размеры	MC	×
198.50	-	R2
26.40	-	B2
26.43	₹	R0e
43.79	₹	ROa
102.00	₹	re
69.00	-	ra
46.39	-	A
23.00	-	Zo

Рис. 2.3. Размеры меридианной проекции рабочего колеса в мм

Для уменьшения относительных скоростей и потерь энергии на повороте потока вдоль линии тока e (рис. 1.1) рекомендуется [7, 17] увеличить площадь сечения меридианного потока в этом месте по сравнению с площадью F_* , соответствующей линейному закону ее изменения:

$$1,2 \le \frac{F_{\pi}}{F_{*}} \le 1,4.$$
 (2.1)

Как показано на рис. 1.1, текущая площадь сечения меридианного потока

$$F = 2\pi R_{\rm II} l_n, \qquad (2.2)$$

а площадь в горловине

$$F_0 = \pi (r_e^2 - r_a^2) \,.$$

ПЭВМ строит графики площади F и относительной площади

$$F/F_0 = f(l)$$

по длине l линии тока. Чтобы получить эти графики, после ввода размеров меридианного сечения в окно **Размеры МС** необходимо из главного окна программы подать команду **Расчет**, а затем по завершении процесса вычислений — команду **Графики**. В появившемся окне **Площадь МС–параллель** ставится флажок **Блокировка** и выбирается номер средней линии тока m = 1. Если лопасть профилиру-

ется по 5 линиям тока, то m = 2. Если поместить курсор в поле графика, нажать и удерживать левую кнопку мыши, то ПЭВМ выведет на экран площадь F и F/F_0 для указанной курсором параллели с номером j (рис. 2.4). Если график площадей не удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям, то следует вернуться в окно **Размеры МС** и изменить соответствующие размеры. В главном окне программы на меридианной проекции колеса строится входная кромка для средней поверхности лопасти. Поэтому если в этом окне выбирать опции **Средняя поверхность**, **Лицевая сторона**, **Тыльная сторона**, то положение меридианных сечений лопасти будет изменяться, а положение входной кромки останется неизменным.



Рис. 2.4. График площади меридианного сечения по длине средней линии тока

2.4. Графики нормальных толщин лопасти

Далее задаются графики нормальных толщин лопасти вдоль каждой линии тока. Согласно данными [17], приведенными также в работе [4], в зависимости от наружного диаметра D_2 рабочих

колес, отлитых из углеродистых и нержавеющих сталей, максимальную толщину лопастей σ_{max} можно выбирать:

300 D_2 , MM 100 200 500 800 4...5 6 7 σ_{max} , MM 4 7...8 10...14 В соответствии с этими данными график относительных толщин $\overline{\sigma} = \sigma / \sigma_{max}$ может иметь вид, показанный на рис. 2.5. Выбрав σ_{max} и θ (например, $\theta = 125^{\circ}$, $\sigma_{max} = 8$ мм), рассчитываем 10 значений σиμ:

k 10 9 6 5 0 8 7 4 3 2 1 4.8 6.3 7.3 7.8 8.0 7.8 7.3 6.3 5.3 4.3 3.3 σ, MM 125,0 112,5 100,0 87,5 75,0 62,5 50,0 37,5 25,0 12,5 0 μ,°



Рис. 2.5. График нормальных толщин лопасти в относительных величинах



Рис. 2.6. Эллиптическая входная кромка (размеры в мм)

03.10.2009 (v32)

На практике применяются лопасти с различными законами изменения нормальных толщин. В частности, используются лопасти с эллиптической входной кромкой (рис. 2.6). В этом случае ее толщины рассчитываются по уравнению эллипса

$$\sigma = 2y = \left(\sigma_0 \sqrt{L_0^2 - x^2}\right) / L_0, \qquad (2.3)$$
$$x = (1 - \mu / \mu_0) L_0.$$

где

Выберем σ_0 , L_0 , μ_0 , зададимся рядом значений $0 \le \mu \le \mu_0$ и найдем по этим уравнениям σ , как показано в примере на рис. 2.6.

Затем значения толщин вводятся в ПЭВМ. Для этого из главного окна программы подают команду **Толщина лопасти** и открывают диалоговое окно с аналогичным названием (рис. 2.7). По умолчанию ПЭВМ задает три одинаковых графика вдоль всех линий тока. Этот график толщин представляет собой прямую, проходящую через точки входной и выходной кромок. В соответствующих полях окна **Толщина лопасти** проектировщик задает номер линии тока *m*, номер *k* текущей точки на графике и ее координаты: нормальную толщину σ (SIG) и угол μ (MU):

$$\mathbf{u} = \mathbf{\theta} - \mathbf{\phi},\tag{2.4}$$

который отсчитывается от входной кромки лопасти в сторону выходной. Так что нулевому меридиану $\phi = 0$ соответствует $\mu = \theta$. Числа вводятся кнопками, или прокруткой колесика мыши, или набираются в полях величин *m*, *k* и т.д. с последующим нажатием клавиши Enter. Значение угла ф можно определить, если подвести курсор к соответствующему меридиану и затем нажать левую кнопку мыши (рис. 2.7). Номера точек увеличиваются от входной кромки к выходной, причем точка на входной кромке имеет нулевой номер. Две соседние точки графика соединяются прямой линией. Точки добавляются кнопкой Добавить. Новая точка вставляется посередине между текущей точкой красного цвета и следующей за ней. По команде Удалить текущая точка удаляется из графика. Рекомендуется вначале задать число k точек на графике и k-1 раз нажать кнопку Добавить, затем выбирать k = 0, 1, 2, ... и назначать соответствующие SIG и MU. Для упрощения построений график толщин лопасти для линии тока номер *т* можно скопировать на остальные линии тока, нажав кнопки Копировать по входу и Копировать по выходу. Работа с окном завершается командой **Применить**. В первом приближении рекомендуется задать *толщины входной и выходной кромок и максимум толщины лопасти* вдоль всех линий тока, спрофилировать лопасть на развертке цилиндра, а затем построить уточненные графики толщин лопасти, как показано на рис. 2.7. Плавность графика нормальных толщин лопасти удобно контролировать, если окно **Толщина лопасти** развернуть во весь экран. В случае нбеобходимости график корректируется.

Следует иметь ввиду, что при построении лицевой и тыльной сторон лопасти от ее средней линии в обе стороны откладывается половина толщины лопасти.



Рис. 2.7. График нормальных толщин лопасти

2.5. ПРОФИЛИРОВАНИЕ ЛОПАСТИ

Лопасть рабочего колеса профилируется на развертке цилиндра по правилам, изложенным в работах [7, 17]. В описываемой программе в качестве расчетной выбрана средняя поверхность лопасти. Конформное отображение линии пересечения поверхности тока со средней поверхностью лопасти на развертке цилиндра состоит из отрезков прямых $1N_1$ и $2N_2$ и дуги окружности, касающейся этих прямых в точках N_1 и N_2 (рис. 2.8). Прямые пересекаются в точке *K*, причем $N_2K = N_1K$. Форма линии на развертке цилиндра задается: углом охвата θ , координатами L_{N2} , L_K , L_1 и углом $\beta_{2\pi}$. При изменении координаты L_K точка K перемещается вдоль луча $\beta_{2n} = \text{const}$. Угол β_{1n} можно увеличивать или уменьшать изменением θ и L_1 . Кроме того, этот угол изменяется при изменении координаты L_K : точка K перемещается вдоль луча $\beta_{2n} = \text{const}$ и прямая $1N_1K$ поворачивается вокруг точки 1. При изменении координаты L_{N2} вдоль лучей $\beta_{2n} = \text{const}$ и $\beta_{1n} = \text{const}$ перемещаются обе точки касания N_2 и N_1 , что дает возможность изменять кривизну линии N_1N_2 . Напомним, что параметры конформной сетки задаются в окне **ТЗ и сетка**.



Рис. 2.8. Геометрические параметры линии на развертке цилиндра

Профилировать лопасть на развертке цилиндра удобно, если поместить в главное окно программы два окна: Входная кромка и Конформная диаграмма (рис. 2.9). Для этого следует подать соответствующие команды из главного окна программы. Все изменения, вносимые в конформную диаграмму, практически мгновенно отражаются на форме меридианных сечений лопасти, положении входной кромки, углах атаки, коэффициентах стеснения и др. параметрах.



Рис. 2.9. Профилирование лопасти

03.10.2009 (v32)

Лопасть профилируется с соблюдением следующих параметрических ограничений.

1. Для получения достаточно длинного межлопаточного канала в рабочих колесах насосов с $n_s = 40...120$ угол охвата θ лопасти в плане, показанный на рис. 2.9 и 2.10 должен быть

$$\theta = (2, 4...2, 2)\zeta, \qquad (2.5)$$

где шаговый угол в градусах $\zeta = 360/Z$. При меньших углах лопасть получается короткой, возрастает нагрузка на неё, что приводит к снижению КПД и всасывающей способности колеса. При увеличении коэффициента быстроходности наружный диаметр ЦК и длина канала уменьшаются. Поэтому в насосах $n_s \approx 300$ угол охвата лопасти приходится уменьшать до $\theta \approx 1.5\zeta$.



Рис. 2.10. Входная кромка, расположенная в одной (*a*) и разных (*б*) меридианных плоскостях и треугольник скоростей на входе (*в*)

2. Как сообщалось в работе [4], по положению входной кромки рабочие колеса можно разделить на три типа (рис. 2.11). Преимущества и недостатки, области применения и т.д. этих рабочих колес описаны в [4]. Независимо от типа рабочего колеса для уменьшения относительной скорости при входе на лопасть, а следовательно, и потерь энергии в колесе выбираем

$$r_{1e} \approx D_{\Gamma}/2 \tag{2.6}$$



Рис. 2.11. Типы рабочих колес

Второй радиус расположения входной кромки r_{1a} выбирается примерно таким, как указано в табл. 2.1. Обычно входная кромка обращена выпуклостью навстречу потоку (рис. 3.5) или она прямолинейная (рис. 3.4).

Таблица 2.1

Радиусы расположения входной кромки

Линия	Волицо	Тип рабочего колеса						
тока	Радиус	1	2	3				
е	r_{1e}	$D_{\Gamma}/2$	$D_{_{\Gamma}}/2$	$1,05 D_{\Gamma}/2$				
а	r_{1a}	$d_1/2$	$d_1/2 + 0.13 \rho_a$	$0,85 D_{\Gamma}/2$				

3. Во избежание отрыва потока следует выбирать небольшие положительные или отрицательные углы атаки:

$$\delta = \beta_{1\pi} - \beta_1, \qquad (2.7)$$

где угол относительного потока без стеснения лопастями

$$\beta_1 = \arctan[V_{1m} / (U_1 - V_{1u})].$$
(2.8)

причем, меридианная скорость $V_{1m} = Q_{\kappa} / F_1$.

При нулевых или отрицательных углах атаки резко ухудшается всасывающая способность рабочего колеса [11]. Поэтому отрицательные углы атаки можно назначать лишь для рабочих колес с низкой всасывающей способностью. Например, для рабочих колес промежуточных ступеней многоступенчатых насосов. Для рабочих колес с повышенной всасывающей способностью (первые ступени конденсатных и питательных насосов, одноступенчатые авиационные и ракетные насосы и др.) в работе [1, с.31] рекомендуется выбирать положительные углы атаки:

$$\delta_e = 3...5^\circ, \ \delta_c = 7...10^\circ, \ \delta_a = 10...12^\circ.$$
 (2.9)

Следует иметь в виду, что в некоторых работах, например [5, 17], угол атаки рассчитывается по формулам (2.7) и (2.8), в которые подставляется меридианная скорость $V_{1m}^{'} = V_{1m}/\psi_1$ потока со стеснением. Поэтому

$$\beta'_{1} = \operatorname{arctg} \left[V'_{1m} / (U_{1} - V_{1u}) \right],$$
 (2.10)

а соответствующий угол атаки

$$\dot{\boldsymbol{\delta}} = \boldsymbol{\beta}_{1\pi} - \boldsymbol{\beta}_{1}^{'}. \tag{2.11}$$

Можно доказать, что оба угла атаки связаны примерным соотношением

$$\delta' \approx \delta - (1 - \psi_1) \beta'_1. \tag{2.12}$$

Найдем также закон изменения углов β_{1n} вдоль радиуса. Так как $\beta_{1n} = \beta_1 + \delta$, то $tg\beta_{1n} \approx tg\beta_1 + tg\delta$. Умножая обе части этого равенства на r_1 получим $r_1 tg\beta_{1n} = r_1 tg\beta_1 + r_1 tg\delta$. При $V_{1u} = 0$ из уравнения (2.8) следует, что $tg\beta_1 = V_{1m} / \omega r_1$. Поэтому

$$2\pi r_{1} tg\beta_{1\pi} = S_{1} = \frac{2\pi V_{1m}}{\omega} + 2\pi r_{1} tg\delta.$$
 (2.13)

Вдоль входной кромки $V_{1m} \approx \text{const.}$ В соответствии с (2.10) угол атаки возрастает при уменьшении радиуса и $r_1 \text{tg} \delta \approx \text{const.}$ Кроме того, второе слагаемое меньше первого. Следовательно, углы установки лопасти на входе в рабочее колесо изменяются вдоль радиуса примерно так, как у шнека постоянного хода

$$S_1 = 2\pi r_1 tg\beta_{1\pi} = \text{const}. \qquad (2.14)$$

Значения S_1 отображаются в окне **Входная кромка** (рис. 2.9). Как показано в работе [11], рабочие колеса, у которых $S_1 = \text{const}$, при той же всасывающей способности имеют более прочные входные кромки. Однако условие (2.15) не является обязательным.

4. Меридианные сечения лицевой и тыльной сторон лопасти могут быть плавно изогнутыми кривыми (рис. 3.2, 3.4, 3.7, 3.13) или прямыми (рис. 3.5, 3.6, 3.8, 3.10, 3.18, 3.19). В первом случае

лопасти рабочего колеса отливаются или фрезеруются шаровой фрезой, касающейся лопасти в одной точке. Во втором случае лопасть имеет линейчатую поверхность, которая образована движением прямой линии по направляющей. Ее можно фрезеровать цилиндрической или конической фрезой, образующая которой касается лопасти сразу по всей прямой меридианного сечения. Предпочтение следует отдать второму способу изготовления. Острый угол λ между меридианным сечением лопасти и линиями *е* и *а* на дисках рабочего колеса (рис. 1.1) желательно иметь:

$$\lambda \ge 60^{\circ} \,. \tag{2.15}$$

При малых углах λ в местах сопряжения лопастей с дисками литых рабочих колес могут образоваться наплывы металла, и форма лопасти может не соответствовать расчетной. Кроме того, при уменьшении λ уменьшается коэффициент стеснения

$$\Psi = 1 - Z_1 \sigma / 2\pi r \sin \left[\arctan\left(tg \beta_{\pi} \sin \lambda \right) \right], \qquad (2.16)$$

(Для входной кромки $\sigma = \sigma_1$, $r = r_1$, $\beta_{\pi} = \beta_{1\pi}$, $\lambda = \lambda_1$ и $\psi = \psi_1$). Рекомендуется

$$\psi \ge 0.8.$$
 (2.17)

5. Обычно рабочее колесо проектируется так, чтобы получить постоянную циркуляцию по ширине выходной кромки рабочего колеса [16]. При переменной циркуляции появляются вихри, "подвешенные" к выходной кромке, что уменьшает гидравлический КПД колеса. Чтобы избежать появления таких вихрей, участок $2N_2$ лопасти с постоянным углом установки $\beta_{2\pi}$ на всех линиях тока должен иметь достаточную длину (рис. 2.8). Так, например, на рис. 3.2, угол установки лопасти на поверхности тока *a* уменьшается, а на поверхности тока *e* увеличивается к выходу. Поэтому при малой длине участка $2N_2$ угол выхода потока в решетке *a* будет большим, чем в *e*. Соответственно теоретические напоры и циркуляции будут разными. Считают [7, 17], что длина этого участка достаточна при

$$\varphi_{N_2} = (0, 5...0, 7)\zeta \,. \tag{2.18}$$

Если линии e, ..., a на конформной диаграмме слились практически в одну линию уже при $\phi > \phi_{N_2}$, то можно выбрать мень-

ший φ_{N_2} , чем по соотношению (2.18), как показано на рис. 3.5. С этой точки зрения профилирование в соответствии с рис. 3.2 неудачно — угол φ_{N_2} мал. Правильно ли выбран угол φ_{N_2} , можно решить после уточнения циркуляции на выходе из рабочего колеса, как описано ниже. Такой расчет показал, что для рассматриваемого колеса разница циркуляций на крайних линиях тока не превышает 3% (таблица теоретических напоров на рис. 3.2).

6. Если быстро увеличивать или уменьшать угол β_{π} на входном участке лопасти (рис. 2.8), то вследствие резкого отклонения потока лопастью он может оторваться от её входного участка или на этом участке появится пик разряжения. Первое увеличивает потери энергии в рабочем колесе, второе ухудшает его всасывающую способность. Поэтому входной участок рекомендуется [17] выполнять с постоянным углом $\beta_{\pi} = \beta_{1\pi}$, выбирая

$$\mu_{N_{\star}} \ge (0, 2...0, 3)\theta. \tag{2.19}$$

7. При построении нормали равноскоростного потока предполагалось следующее. Если провести дугу окружности, перпендикулярную крайним линиям тока e и a, то она будет перпендикулярна и всем промежуточным линиям тока (рис. 1.1 δ). Однако в области поворота потока из осевого направления в радиальное нормаль может быть не дугой окружности, а S-образной кривой с точкой перегиба, как показано на рис. 2.12, заимствованном из работы [6]. Это приводит к волнистости поверхности лопасти, погрешностям построения меридианных сечений, расчетов и т.д. (рис. 2.13).



Рис. 2.12. S-образные нормали в области поворота потока:

——— — линия тока; — — — — нормаль

Плавность поверхности можно контролировать по линиям тока в меридианной проекции (рис. 2.13*a*) и по плану линий пересечения средней поверхности лопасти с поверхностями тока (рис. 2.13*b*). Для этого следует задать нулевую толщину лопасти, щелкнуть правой кнопкой мыши в окне **План РК** и в открывшемся контекстном меню выбрать опцию **Все линии**. Чтобы избежать волнистости, необходимо увеличивать радиус ρ_a , пока волнистость не исчезнет. Некоторое уменьшение площади меридианной проекции на повороте можно компенсировать увеличением радиуса ρ_a .



 $----- \rho_a = 25$ мм; $---- \rho_a = 35$ мм

Для удобства диалоговые окна **Толщина лопасти**, **W**, **rVu** и др. снабжены опцией **Блокировка**. Если снять флажок этой опции, то при изменении номера m на конформной диаграмме автоматически изменяется номер m и в диалоговых окнах.

По окончании профилирования лопасти на развертке цилиндра следует вернуться в окно **Толщина лопасти** и уточнить графики ее толщин. Для увеличения производительности ПЭВМ при работе с окном конформной диаграммы рекомендуется закрыть окно **Общий вид**.

2.6. Оценка качества профилирования

Вначале оценивается плавность лицевой и тыльной сторон лопасти. Сечения лопасти радиальными плоскостями $\phi = const$ назовем меридианными сечениями. Поверхности лопасти плавные, если меридианные сечения ее лицевой и тыльной сторон — слабоизогнутые линии с постепенным изменением кривизны от выходной до входной кромки и от линии тока а до е. Кроме того, расстояние между двумя соседними меридианными сечениями должно изменяться монотонно вдоль любой линии тока, например, рис. 2.9, 3.5. Если поверхности лопасти получились неплавные, необходимо изменить конформную диаграмму и (или) графики толшин лопасти. Мерилианные сечения отображаются в главном окне программы профилирования (рис. 2.1) и после экспорта данных — в окне программы AutoCAD (рис. 2.24). Далее оцениваются графики изменения относительной скорости W и момента скорости rVu вдоль линий тока (рис. 2.14). Эти величины подсчитываются по схеме решетки с бесконечно большим числом лопастей, когда в любой точке рабочего колеса угол относительного потока и меридианная скорость со стеснением потока:

$$\beta = \beta_{\pi}, V'_m = Q_{\kappa} / F \psi, \qquad (2.20)$$

где площадь *F* определяется по формуле (2.2). Поэтому относительная скорость

$$W = V'_m / \sin\beta_{\pi}, \qquad (2.21)$$

а момент скорости

$$rVu = r(\omega r - V'_m / \mathrm{tg}\beta_{\mathrm{II}}) \,. \tag{2.22}$$

(В диалоговых окнах программы V_m и V_m — меридианные скорости без стеснения и со стеснением, соответственно).

Желательно монотонное изменение относительной скорости. Момент скорости должен постепенно увеличиваться от входа к выходу из рабочего колеса. Его уменьшение на некотором участке лопасти свидетельствует о работе данного участка в турбинном режиме, что приводит к дополнительным потерям энергии в рабочем колесе. В этом случае следует провести анализ графиков толщины лопасти, коэффициента стеснения, меридианных скоростей, конформной диаграммы, выяснить причину и устранить турбинный эффект. С этой целью предусмотрена возможность вывода на экран сразу нескольких окон с графиками *W*, *rVu* и т.д., как показано на рис. 2.14. Для этого следует из главного окна программы подать команду **Графики** и в открывшемся окне **Площадь МСпараллель** из списка выбрать *W*. Снова нажать кнопку **Графики**, выбрать *rVu* и т.д.



Рис. 2.14. Графики геометрических и кинематических параметров рабочего колеса

Затем, щелкая левой кнопкой мыши по пиктограммам окон на панели задач, развернуть их и расположить в главном окне, как удобно. Если на любом из графиков установить курсор на какойлибо меридиан, нажать и задержать левую кнопку мыши, то меридиан «покраснеет», отобразится его номер и соответствующее значение величины. В отличие от всех остальных графиков на оси абсцисс графика **Площадь МС-параллель** отображаются номера параллелей (рис. 2.4).

По команде **План РК** на экран выводится план спроектированного рабочего колеса. Щелчком правой кнопки на этом плане открывается контекстное меню, в котором можно выбрать **Все линии**. При этом отображаются линии пересечения всех поверхностей тока с лопастью. Если подать команду **Общий вид,** то открывается окно, показанное на рис. 2.15.



Рис. 2.15. Общий вид рабочего колеса:

I — поворот вида; 2 — масштаб вида; 3 — полный вид; 4 — выбор окном;
 5 — перемещение вида; 6 — изометрия; 7 — вид сбоку; 8 — вид спереди;
 9 — создать изображение заново

2.7. Сохранение и экспорт данных

По поданной из главного окна программы команде **Результаты** открывается диалоговое окно с аналогичным названием (рис. 2.16). Таблицы данных выводятся в формате HTML. Это позволяет просматривать результаты расчетов с помощью любого браузера, например Microsoft Internet Explorer, или загружать данные для дальнейшей обработки в специальные программы, например, Microsoft Excel. Кроме того, полученные данные экспортируются в программы для расчета теоретического напора и в AutoCAD для создания рабочих чертежей.

Вкладка **Параметры РК и потока** содержит таблицу геометрических параметров рабочего колеса и кинематических параметров потока в точках пересечения трех линий тока 0, 1, 2 или пяти 0, 1, 2, 3, 4 с меридианными сечениями $\varphi = 0$, 5°, 10°,... расчетной средней поверхности лопасти. Система цилиндрических координат показана на рис. 1.1, а фрагмент таблицы — на рис. 2.16.

Вторая вкладка **Цилиндрические координаты и толщины** содержит таблицу цилиндрических координат меридианных сечений средней поверхности лопасти, сечений ее лицевой и тыльной сторон, а также нормальных толщин (рис. 2.17). Как видно из плана

К⊃ Результаты								_ 🗆	
Декартовы координаты, мм Данные для расчета теоретического напора									
Параметры Р	К и потока	а Цилі	индричес	жие коор	динаты и	толщины	і Эксп	орт данні	УK
									<u>d</u>
Линия тока О	ļ								e
FI	градус	0	5	10	15		120	125	ļ
r	мм	198,50	190,63	183,06	175,80		102,00	102,00	1
z	мм	26,40	27,19	27,95	28,69		63,19	66,26	1
LAMB	градус	84,25	84,38	84,49	84,58		47,03	47,03	ļ
<u>Вл</u>	градус	25,00	25,00	25,00	25,00		19,02	19,02	1
SIG	мм	4,80	5,40	6,00	6,50		3,70	3,30	1
SIGm	мм	5,29	5,95	6,61	7,17		3,82	3,40	1
F	мм2	32826	32457	32040	31554		17728	17728	1
PSI		0,936	0,925	0,913	0,902		0,835	0,853	ļ
V'm	м/с	5,24	5,30	5,37	5,45		9,70	9,70	1
Vm	м/с	5,60	5,73	5,88	6,04		11,62	11,38	1
w	м/с	13,25	13,56	13,91	14,30		35,66	34,92	1
rVu	м2/с	9,93	9,02	8,17	7,38		-0,19	-0,11	1
Линия тока 1									ļ
<u>FI</u>	градус	0	5	10	15		120	125	J.
<u>s</u>								<u>ت</u>	Ì

Рис. 2.16. Фрагмент таблицы параметров рабочего колеса и потока

03.10.2009	(v32)
------------	-------

¹ » Результаты – 🗆 🗙									
Декартовы координаты, мм Данные для расчета теоретического напора									
Параметры РК и потока Цилиндрические координаты и толщины								от данных	
			1				1		
Средняя поверхность									
Линия тока 0	1					t			
FI. градус	0	5	10	15	20	t	120	125	
r, mm	198,50	190,63	183,06	175,80	168,83	I	102,00	102,00	
Z, MM	26,40	27,19	27,95	28,69	29,39	Ī	63,19	66,26	
SIG, MM	4,80	5,40	6,00	6,50	6,90	Ī	3,70	3,30	
Линия тока 1									
FI, градус	0	5	10	15	20		120	125	
с. мм	198,50	190,59	183,01	175,72	168,72	I	87,78	87,35	
Z, MM	13,20	13,59	13,97	14,34	14,70		49,94	53,73	
SIG, MM	4,80	5,40	6,00	6,50	6,90		3,70	3,30	
Линия тока 2									
FL градус	0	5	10	15	20		120	125	
Г, ММ	198,50	¥90,58	182,99	175,69	168,69	I	70,20	69,40	
Z, MM	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		33,62	37,88	
SIG, MM	4,80	5,40	6,00	6,50	6,90		3,70	3,30	
Лицевая сторона									
Линия тока О									
FI, градус	0	5	10	15	20		120	125	
L MM		193,60	186,37	179,38	172,63		102,00	102,00	
Z, MM		26,89	27,62	28,33	29,01		60,58	63,93	
SIG, MM		5,40	6,00	6,50	6,90		3,70	3,30	
Линия тока 1									
FI, градус	0	5	10	15	20		120	125	
<u>г, мм</u>		193,57	186,32	179,30	172,53		88,15	07,50	
Z, MM		13,43	13,80	14,16	14,50		47,53	51,49	
SIG, MM		5,40	6,00	6,50	6,90		3,70	3,30	
Линия тока 2									
FI, градчс	0	5	10	15	20		120	125	
<u>г, мм</u>		193,56	186,30	179,28	172,49		70,85	69,78	
Z, MM		0,00	0,00	0,00	0,00	l	31,20	35,58	
SIG, MM		5,40	6,00	6,50	6,90	l	3,70	3,30	
Тыльная сторона									
Линия тока О								<u> </u>	
S									

Рис. 2.17. Фрагмент таблицы цилиндрических координат меридианных сечений лопасти и ее нормальных толщин

рабочего колеса на рис. 2.24, плоскость $\varphi = 0$ пересекает только среднюю поверхность лопасти в точке $\varphi = 0$, $r = R_2$ и ее тыльную сторону. Поэтому в таблице на рис. 2.17 для лицевой стороны лопасти при $\varphi = 0$ следует опустить r, z и σ и соответственно отредактировать эту таблицу после экспорта в Microsoft Excel. Геометрические размеры выходной кромки определяются радиусом R_2 и двумя углами (рис. 2.24).

Вкладка Декартовы координаты содержит таблицу координат, рассчитанных по формулам (1.4) и (1.5). Выбирая угловое смещение короткой лопасти, можно задавать её положение в межлопаточном канале. Фрагмент таблицы представлен на рис. 2.18.

ко Результ	ки Результаты 💶 🗖 🗶										
Параметры РК и потока Цилиндрические координаты и толщины Экспорт дан									анных		
	Декартс	вы коорд	инаты, м	м		Даннг	ые для рас	счета теог	, остическо	ого напор	a
	<u>.</u>	· · ·									
0.0	ᡱ Смеще	ние, граду	յշ _0	бновить							
			_		•						
	Лицевая	сторона		T	Средняя	поверхн.			Тыльная	сторона	^
Линия	тока О										
FI	x	У	z	FI	x	У	z	FI	x	У	z
0,00				0,00	0,00	198,50	26,40	0,00	0,00	195,85	26,67
5,00	16,87	192,87	26,89	5,00	16,61	189,90	27,19	5,00	16,35	186,94	27,49
10,00	32,36	183,54	27,62	10,00	31,79	180,28	27,95	10,00	31,21	177,03	28,29
15,00	46,43	173,27	28,33	15,00	45,50	169,81	28,69	15,00	44,57	166,35	29,05
20,00	59,04	162,22	29,01	20,00	57,74	158,65	29,39	20,00	56,44	155,07	29,77
25,00	70,22	150,58	29,66	25,00	68,52	146,94	30,06	25,00	66,82	143,29	30,47
30,00	79,91	138,41	30,30	30,00	77,85	134,83	30,71	30,00	75,78	131,25	31,13
35,00	88,19	125,95	30,91	35,00	85,76	122,47	31,33	35,00	83,33	119,00	31,76
40,00	95,12	113,36	31,49	40,00	92,36	110,07	31,92	40,00	89,60	106,79	32,35
45,00	100,81	100,81	32,03	45,00	97,77	97,77	32,47	45,00	94,72	94,72	32,90
50,00	105,35	88,40	32,54	50,00	102,04	85,62	32,98	50,00	98,72	82,84	33,41
55,00	108,73	76,13	33,02	55,00	105,24	73,69	33,45	55,00	101,75	71,25	33,93
60,00	111,07	64,12	33,48	60,00	107,44	62,03	33,96	60,00	103,89	59,98	34,98
65,00	112,43	52,43	33,96	65,00	108,79	50,73	34,96	65,00	105,33	49,11	36,58
70,00	112,97	41,12	34,90	70,00	109,43	39,83	36,46	70,00	106,16	38,64	38,58
75,00	112,80	30,22	36,30	75,00	109,46	29,33	38,34	75,00	106,45	28,52	40,88
80,00	111,94	19,74	38,10	80,00	108,95	19,21	40,48	80,00	106,34	18,75	43,27
85,00	110,53	9,67	40,20	85,00	107,93	9,44	42,84	85,00	105,73	9,25	45,82
90,00	108,57	0,00	42,58	90,00	106,40	0,00	45,42	90,00	104,63 🗥	0,00	48,53
95,00	106,15	-9,29	45,18	95,00	104,41	-9,13	48,16	95,00	103,07	-9,02	51,34
100,00	103,31	-18,22	47,98	100,00	102,00	-17,99	51,04	100,00	101,08	-17,82	54,25
105,00	100,09	-26,82	50,92	105,00	99,19	-26,58	54,01	105,00	98,67	-26,44	57,20
110,00	96,51	-35,13	53,97	110,00	96,01	-34,94	57,05	110,00	95,85	-34,89	60,18
115,00	92,59	-43,17	57,13	115,00	92,44	-43,11	60,11	115,00	92,44	-43,11	63,11
120,00	88,33	-51,00	60,58	120,00	88,33	-51,00	63,19	120,00	88,33	-51,00	65,80
125,00	83,55	-58,50	63,93	125,00	83,55	-58,50	66,26	125,00			
Линия	тока 1										
FI	x	v	z	FI	x	v	z	FI	x	v	z
0,00				0,00	0,00	198,50	13,20	0,00	0,00	195,85	13,32 🗸

Рис. 2.18. Фрагмент таблицы декартовых координат

Вкладка Данные для расчета теоретического напора содержит информацию для расчета теоретического напора тонких гидродинамических решеток рабочего колеса на поверхностях тока равноскоростного меридианного потока в слое переменной толшины [1]. Решетка конформно отображается на цилиндр (рис. 2.19а, б). Каждый профиль решетки заменяется вихревым слоем. Распределение плотности вихрей определяется из условия равенства нулю нормальной составляющей относительной скорости потока в контрольных точках на профиле. Вихри размещаются в середине между этими точками. Для каждого меридианного сечения лопасти ϕ = const вычисляются декартовы координаты DL и EL контрольной точки на конформной диаграмме, радиус RL, длина нормали *BK* и ее приведенная длина $BKL = BK \cdot \psi$. Шаг решетки Т находим из очевидного соотношения (рис. 2.19б): Т

$$\Gamma = (EL)_{\varphi=0} \cdot \varsigma / \theta \tag{2.23}$$



Результаты							_ 🗖	X
Параметры РК и потока Цилиндрические координаты и толщины Экспорт данных								ыχ
Декартовы координаты, мм Данные для расчета теоретического напора								
	1						1	<u></u>
Линия тока 0								
FI, градус	0	5	10	15		120	125]
DL, M	0,1500	0,1430	0,1360	0,1290		0,0052	0,0000	
EL, M	0.3750	0.3600	0.3450	0.3300		0.0150	0.0000]
RL, M	0,1985	0,1906	0,1831	0,1758		0,1020	0,1020	
ВК, м	0,0264	0,0272	0,0280	0,0287		0,0330	0,0330	
BKL, M	0,0247	0,0252	0,0256	0,0259		0,0275	0,0281	
Линия тока 1								
FI, градус	0	5	10	15		120	125	
DL, M	0,1815	0,1745	0,1675	0,1605		0,0075	0,0000	
EL, M	0,3750	0,3600	0,3450	0,3300		0,0150	0,0000	
RL, M	0,1985	0,1906	0,1830	0,1757		0,0878	0,0873	
ВК, м	0,0264	0,0271	0,0279	0,0286		0,0343	0,0335]
BKL, M	0,0247	0,0251	0,0255	0,0258		0,0301	0,0296	
Линия тока 2								
FI, градус	0	5	10	15		120	125	
DL, M	0,2250	0,2180	0,2110	0,2040		0,0107	0,0000	
EL, м	0,3750	0,3600	0,3450	0,3300		0,0150	0,0000	
RL, м	0,1985	0,1906	0,1830	0,1757		0,0702	0,0694	
ВК, м	0,0264	0,0271	0,0279	0,0286		0,0378	0,0370	
BKL, M	0,0248	0,0251	0,0255	0,0258		0,0336	0,0331	<u>×</u>
<u><</u> m)							<u>></u>	J

в

Рис. 2.19. Фрагмент таблицы для расчета теоретического напора

Чтобы сохранить вышеупомянутые четыре таблицы, следует выбрать вкладку Экспорт данных (рис. 2.20). В области Таблицы выбрать из списка нужную таблицу и нажать кнопку Выполнить, расположенную в этой же области. Откроется окно Сохранить как, в котором проектировщик задает имя файла и указывает папку для хранения файла. Для загрузки таблиц в Microsoft Excel (или Microsoft Word) необходимо запустить одно из этих приложений и в меню Файл выбрать пункт Открыть. В диалоговом окне Открытие документа выбрать сохраненный ранее файл. По команде Открыть файл загружается в соответствующее приложение для последующего редактирования. Теоретический напор элементарных решеток на трех или пяти поверхностях тока е, ..., а рассчитывается с помощью двух исполняемых файлов DATHT.exe и HTG2.exe. Эти файлы и ярлык программы HTG2.PIF копируются пользователем в ту папку, где будут размещаться файлы проектируемого насоса. Для создания файла данных запускаем программу DATHT.exe. После запуска открывается окно Программа подготовки данных для расчета рабочего колеса насоса (рис. 2.21). В этом окне цифры, буквы и символы вводятся в позицию курсора. Ввод завершается командой Enter.

🗳 Результаты	<u>_ □ ×</u>
Декартовы координаты, мм Данные для расчета теорет Параметры РК и потока Цилиндрические координаты и толщины	ического напора Экспорт данных
Г Таблицы	
Параметры РК и потока 👤	Выполнить
Сохранить на диске в формате HTML 🗾	
_ Пакетные файлы для AutoCAD ————————————————————————————————————	
Файлы	
Меридианные сечения средней поверхности лопасти Меридианные сечения лицевой стороны лопасти	Выполнить
🗹 Меридианные сечения тыльной стороны лопасти 🗹 Конформиза пизспамма	
Перафики параметров РК и потока	
📔 🗹 Общий вид	
Г Параллели в MC 0.30 🚖	
Радиусы точек на линиях тока в гл	авном окне

Рис. 2.20. Сохранение и экспорт данных

ং D:\DATHT.E	KE				- 🗆 ×
Программа	подготовки да	нных для расче	та рабочего	колеса насоса.	V1.1
Количество	очек N	— Имя файла: IH-J 17	E.dat — Kon	eca Z – Z	
Отпин, значе	HWE UF4. CKOD.	S -312.6 OTD	.3884. ШИЛКЦИЯ	ими скол. G1 -1	. 401
Теоретически	ий напор Н 235	Шаг решети	ки Т 0.1543	Расход Q О.	172
N	DL	EL	RL	BKL	
1	0.0052	0.015	0.102	0.0275	
2	0.0103	0.03	0.102	0.0267	
3	0.0155	0.045	0.1022	0.0266	
4	0.0207	0.06	0.1027	0.0271	
5	0.0259	0.075	0.1036	0.0279	
6	0.0362	0.105	0.1064	0.0303	
11 ?	0.0465	0.135	0.1106	0.0309	
8	0.0573	0.165	0.1164	0.0298	
y .	0.0688	0.195	0.1241	0.0276	
10	0.0811	0.225	0.1332	0.0273	
	0.0942	0.255	0.1437	0.0272	
12	0.108	0.285	0.1557	0.0268	
13	0.122	0.315	0.1688	0.0262	
11 12	0.129	0.33	0.1758	0.0259	
	U.136	U.345	0.1831	0.0256	
拾	0.143	0.36 0.39F	0.1706	0.0252	
	U.15	U.375	U.1785	0.0247	
F1-Полскази	ка F2−Файл F3	-Чтение F4-Запи	сь Е5-Печать	Е6-Очистка ES	С-Выхол

Рис. 2.21. Окно ввода данных для расчета теоретического напора

Курсор можно перемещать клавишами управления курсором. Если при вводе символа допущена ошибка, то она исправляется клавишей **Backspace**.

По команде F2, поданной с клавиатуры, открывается окно Введите имя файла. Вводим имя файла (не более 9 символов) с расширением .dat. Например, для решетки на поверхности тока *e*: TH-e.dat. В позицию Количество точек N вводится не более 17 точек, и окно ввода данных раскрывается полностью. Далее в позицию курсора последовательно вводятся следующие величины (в качестве примера выбрана решетка на поверхности тока *e* для ступени насоса ПЭ–580–200):

• Число лопастей колеса *Z*=7.

• Отрицательное значение угловой скорости вращения рабочего колеса *S*= –312,6 рад/с.

• Отрицательное значение циркуляции скорости $G1 = -1,401 \text{ m}^2/\text{с}$ при входе на решетку. Если жидкость подводится к рабочему колесу с помощью кольцевого или конфузорного подвода, то G1 = 0. Если перед рабочим колесом имеется полуспиральный подвод, то для всех поверхностей тока задается постоянная средняя циркуляция G1 < 0. В случае рабочего колеса промежуточной ступени многоступенчатого центробежного насоса перед колесом имеется в сторону вращения колеса, так что G1 < 0, причем, для разных поверхностей тока циркуляция переменная. Если перед центробежным

колесом установлен шнек, то на входе имеется переменная вдоль радиуса циркуляция *G*1<0. Значения циркуляций определяются при расчете насосов по программам [4, 14] и др., причем

$$G1 = 2\pi \left(rV_u \right)_1. \tag{2.24}$$

В нашем примере $G1 = 2\pi \cdot 0,223 = 1,401 \text{ м}^2/\text{с}$.

• Теоретический напор H = 235 м. Здесь достаточно ввести приближенное значение; оно необходимо для уменьшения числа итераций при работе программы. В рассматриваемом примере выбран средний напор ступени, деленный на приближенный $\eta_r = 0.9$.

• Шаг решетки T = 0,1543 м определяется по формуле (2.23).

• Расход через колесо $Q = 0,172 \text{ м}^3/\text{с}$ с учетом утечки через щелевые уплотнения колеса и в системе разгрузки ротора от осевых сил.

Затем вводится массив данных *DL*, *EL*, *RL*, *DKL*. Эти данные можно скопировать в файл TH-е.dat или вводить вручную. Ниже описывается только ручной ввод. При ручном вводе распечатываем сохраненный выше файл THead.htm и данные заносим в окно **Программа подготовки данных для расчета рабочего колеса насоса** (рис. 2.21). Контрольные точки размещаем произвольно по всей длине лопасти со сгущением вблизи входной и выходной кромок, как показано на рис. 2.196. Точку 1 нельзя выбирать на входной кромке в начале координат ($\phi \neq 0$). Последняя точка 17 выбирается на выходной кромке ($\phi = 0$). По завершении ввода сохраняем данные, подав с клавиатуры команду **F4**.

Для расчета теоретического напора запускаем программу HTG2.exe. На экране появляется окно программы **Расчет рабочего** колеса центробежного насоса (рис. 2.22). В ответ на запрос вводим имя ранее созданного файла данных и нажимаем **Enter**.

Рис. 2.22. Окно ввода имени файла

03.10.2009 (v32)

ল [HTG2.EXE]									IХ
Число лопаток к Отрицательное з Отрицательное з Ожидаемый напор Шаг рещетки кон Расход через ко	олеса Z начение начение Н формного лесо Q	скорости циркуляц отображ	S - ии G1 ения Т	-312.6000 -1.4010 235.0000 0.1543 0.1720					
Массив вертикал 0.0052 0.0103 0.0942 0.1080	ьных коо 0.0155 0.1220	рдинат т 0.0207 0.1290	очек: 0.0259 0.1360	0.0362 0.1430	0.0465 0.1500	0.0573	0.0688	0.0811	
Массив горизонт 0.0150 0.0300 0.2550 0.2850	альных к 0.0450 0.3150	оординат 0.0600 0.3300	точек: 0.0750 0.3450	0.1050 0.3600	0.1350 0.3750	0.1650	0.1950	0.2250	
Массив радиусов 0.1020 0.1020 0.1437 0.1557	точек: 0.1022 0.1688	0.1027 0.1758	0.1036 0.1831	0.1064 0.1906	0.1106 0.1985	0.1164	0.1241	0.1332	
Приведенные тол 0.0275 0.0267 0.0272 0.0268 0.0272 0.0268	щины сло 0.0266 0.0262	я на кон 0.0271 0.0259	формном 0.0279 0.0256	отображе 0.0303 0.0252	нии: 0.0309 0.0247	0.0298	0.0276	0.0273	
Эточненный теор Циркуляция скор	етически ости на	й напор выходе	на выхор	G2=-48	. 780 . 483				Ţ

Рис. 2.23. Результаты расчета теоретического напора

Программа выполняет расчеты и выводит заданные ранее величины, уточненный теоретический напор $H_{\rm T} = 238,78$ м и циркуляцию скорости на выходе из колеса $G_2 = -48,438$ м²/с (рис. 2.23). Эти результаты можно сохранить в виде экранной копии.

Теоретические напоры рассчитываются для каждой из элементарных решеток. Проверяется постоянство теоретических напоров по ширине рабочего колеса на выходе (параграф 2.5, п.5). Кроме того, теоретические напоры сравниваются с таковыми по теории плоских гидродинамических решеток [16]. Обычно расхождение не превышает нескольких процентов.

Если в данные необходимо внести изменения, то снова запускаем программу DATHT.exe, нажимаем клавишу F2, вводим имя файла данных TH-e.dat и редактируем их. Затем расчет повторяем снова.

Пакетные файлы для системы AutoCAD получают следующим образом. В области **Пакетные файлы для AutoCAD** флажками отмечают нужные файлы и нажимают кнопку **Выполнить** (рис.2.20). После этого пакетные файлы с расширением .scr будут сохранены в той же папке, в которой ранее сохранялись таблицы. Для загрузки пакетного файла в AutoCAD нужно запустить это приложение. Затем в командной строке набрать команду **Script** и нажать клавишу Enter или выбрать Tools→Run Script.... Далее в появившемся окне Select Script File выбрать необходимый файл и загрузить его. Файл с расширением .dwg сохраняется в выбранной папке для последующей работы.

На рис. 2.24 в качестве примера файлов AutoCAD показаны меридианные сечения лицевой стороны лопасти спроектированного рабочего колеса и его план. Вместе с таблицей координат меридианных сечений лицевой стороны лопасти и ее нормальных толщин (рис. 2.17) эти данные необходимы для изготовления лопастей и обычно приводятся на рабочем чертеже колеса.

При сохранении и экспорте данных соответствующим файлам можно присвоить имена: Graphs, Plan, Midsurface, Frontside, Backside, Confmap, Parameters, CartesCoord, CylindCoord.

Существуют и другие способы задания формы лопасти. Например, на рис. 2.25 заданы сечения обеих сторон лопасти плоскостями, перпендикулярными оси вращения — срезами лицевой и тыльной сторон лопасти [7].



Рис. 2.24. Пример файлов AutoCAD

03.10.2009 (v32)



Рис. 2.25. Конформная диаграмма и срезы лицевой и тыльной сторон лопасти [7]

38

3. ПРИМЕРЫ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ЛОПАСТЕЙ

На рис. 2.9 показано рабочее колесо первой ступени питательного насоса ПЭ–580–200, разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана авторами работы [18]. Колесо спрофилировано с соблюдением вышеизложенных параметрических ограничений. Расчет лопаточного отвода этой ступени приведен в работе [4]. В работе [18] сообщается, что при $n_s = 90$, незападающей в области малых подач напорной характеристике и умеренном коэффициенте приведенного входного диаметра $K_0 = 4$ ступень обладает хорошей всасывающей способностью $C_{\rm III} = C_{\rm III} = C_{3\%} = 1200$ и весьма высокими КПД. Балансовые расчеты [9] показали, что при полном КПД $\eta = 0.82$ механический, объемный и гидравлический КПД составляют: $\eta_{\rm M} = 0.94$, $\eta_{\rm o} = 0.97$ и $\eta_{\rm r} = 0.9$. Энергетическая характеристика насоса, заимствованная из работы [18], представлена на рис. 3.1.

ОАО «Калужский турбинный завод» модернизировал питательный насос ПН–1500–350 для энергоблока ТЭС мощностью 800 МВт, как описано в работе [10]. В связи с этим по программе [4] выполнен расчет проточной полости насоса и поверочное профилирование рабочего колеса первой ступени (рис. 3.2). В работе [20] проведены модельные испытания ступени. Все ступени насоса снабжены одинаковыми рабочими колесами. Форма лопасти восстановлена по чертежу ее меридианных сечений. (Фактическо-



Рис. 3.1. Энергетическая характеристика модельной ступени насоса ПЭ–580–200 согласно работе [18]

му $R_2 = 212,5$ мм соответствует $\phi = 3^\circ$). Анализ профилирования показал следующее. Обращает внимание график Площадь МС, который не имеет увеличения площади меридианной проекции колеса в области поворота потока, рекомендуемого на рис. 2.4. Угол охвата лопасти в плане $\theta = 2, 3\zeta$ соответствует (2.5). Применено рабочее колесо типа 1, что характерно для питательных насосов (рис. 2.11). Так как перед питательным насосом установлен бустерный насос, то от первой ступени не требуется высокой всасывающей способности. Поэтому допустимы небольшие отрицательные углы атаки по уравнению (2.7). Поверхность лопасти линейчатая. Угол $\lambda_{\min} = 56^{\circ}$, а при $\phi = 60^{\circ}$ коэффициент $\psi = 0,77$. Оба значения немного меньше рекомендуемых (2.16) и (2.17). Угол ϕ_{N2} также меньше рекомендуемого (2.18). Однако теоретические напоры по ширине выходной кромки, рассчитанные в соответствии с п. 2.7, по методике [1] отличаются мало. По теории плоских гидродинамических решеток [16] получаем примерно такой же теоретический напор. Лопасть имеет длинные участки с постоянным углом $\mu_{N1} = 0,7\theta$, что соответствует ограничению (2.19). По-видимому, можно улучшить форму лопасти, если уменьшить ее изогнутость, увеличив длину дуги N₁N₂. Полученная авторами работы [20] энергетическая характеристика модели в масштабе 1:2,2 приведена на рис. 3.3. Ступень имеет незападающую при малых подачах характеристику с крутизной 16%, оптимальный КПД 79% и $C_{3\%} = 840$. Испытания модернизированного насоса на Пермской ГРЭС показали его высокую эксплуатационную надежность, а КПД составил 84%.

На рис. 3.4 представлено профилирование лопастей рабочего колеса первой ступени питательного насоса $n_s = 100$ с повышенной всасывающей способностью $C_{3\%} = 1400$, характеристики которого опубликованы в работе [8]. Так как коэффициент приведенного входного диаметра $K_0 = 4,8$ этого колеса больше, чем предыдущего, углы потока β_1 и соответственно углы установки лопасти $\beta_{1,n}$ получились меньшими. Чтобы обеспечить приемлемые углы атаки, пришлось расположить входную кромку в разных меридианных

40



Рис.3.2. Поверочное профилирование рабочего колеса насоса ПН–1500–350



Рис. 3.3. Энергетическая характеристика модельной ступени насоса ПН–1500–350 согласно работе [20]

плоскостях, а точку N_2 сдвинуть к выходу из рабочего колеса. Угол φ_{N_2} по (2.18) и угол охвата лопасти по (2.5) на линии тока m = 0, равный $\theta = 90^\circ$, значительно меньше рекомендуемых. Теоретические напоры, рассчитанные согласно п. 2.7 отличаются мало. Однако гидравлический КПД этой ступени $\eta_r = 0.85$ существенно меньше, чем у ступени насоса ПЭ–580–200. Возможно, это связано с малой длиной лопасти $\theta/\zeta = 90/51, 4 = 1.75$ и большим $K_0 = 4.8$.

На рис. 3.5 профилируется рабочее колесо первой ступени питательного насоса $n_s = 100$ с низким уровнем пульсаций давления. Рабочее колесо имеет двухрядную решетку лопастей $Z_1 + Z_2 = 4 + 4$ и $K_0 = 4,5$. Для увеличения углов λ , уменьшения стеснения на входе в колесо при сравнительно толстых лопастях с эллиптической входной кромкой и получения приемлемых углов атаки пришлось изогнуть меридианные сечения лопасти. Рабочее колесо литое. Толщины лопасти приведены в нижнем правом углу рис. 3.5 и на рис. 2.6. При эллиптической входной кромке ее толщина SIG1 = 0. Соответственно в окне **Входная кромка** PSI1 = 1.

42



Рис. 3.4. Рабочее колесо первой ступени питательного насоса [8]



Рис. 3.5. Рабочее колесо с радиальной входной кромкой

Рис. 3.6 показывает, что располагая входную кромку в разных меридианах, можно уменьшить угол атаки лопасти на линии тока a с 13,1° до 10,8°. Чтобы получить в этих рабочих колесах лопасти с плавной поверхностью, при переходе от линии тока e к a следует увеличивать угол охвата ТЕТА и координату L_1 с закономерными изменениями приращений этих величин и сохранить постоянными LN_2 и L_K , как показано в таблице Конформная диаграмма на рис. 3.5. По сравнению с исходным вариантом с 7-лопастным рабочим колесом пульсации давления на выходе из рабочего колеса по рис. 3.5 уменьшились с 84 до 78 дБ.

Если расположить в разных меридианах не только входную, но и выходную кромки, то удается уменьшить разницу углов атаки по крайним линиям тока и получить лопасть с линейчатой поверхностью, как показано на рис. 3.7. На этом рисунке профилируется то же рабочее колесо, что и на рис. 3.5, однако с линейчатой поверхностью. Последнее существенно упрощает технологию его изготовления. Так как в программе профилирования лопасть может начинаться только в точке $\varphi = 0$, то наружный радиус рабочего колеса вначале следует увеличить до фиктивного R'_2 . Из геометрических соотношений следует, что ширина уменьшится соответственно до

$$b_{2}' = A \Big[1 - (1 - b_{2}/A) (R_{2}'/R_{2}) \Big].$$
(2.25)

Так как $b_2' > 0$, то относительный радиус следует выбирать

$$R'_2/R_2 < 1/(1-b_2/A).$$
 (2.26)

Обычно $R'_2/R_2 > 1,5...2$. Чем больше это отношение, тем меньше отличаются углы $\beta_{2\pi}$ на крайних линиях тока (рис. 3.7). Затем необходимо спрофилировать лопасть на конформной диаграмме, перенести начало отсчёта φ и *j* в точку, соответствующую действительному наружному радиусу R_2 , и отбросить части меридианной проекции и конформной диаграммы, как показано на этом рисунке. Точку N_2 целесообразно выбирать в начале координат, задавая LN2 = 0, или вблизи него. Координату L_K точки *K* выбираем



Рис. 3.6. Рабочее колесо со скошенной входной кромкой

03.10.2009 (v32)



Рис. 3.7. Рабочее колесо со скошенными входной и выходной кромками

так, чтобы входной прямолинейный участок лопасти $1N_1$ имел рекомендуемую длину. Угол γ в сечении лопасти цилиндрической поверхностью радиуса *r* связан с углом скоса в градусах $\Delta \phi$ на конформной диаграмме и в плане рабочего колеса соотношением

$$\Delta \varphi = 57, 3b / R \operatorname{tg} \gamma. \tag{2.27}$$

В частности, на выходе из рабочего колеса

$$\Delta \varphi_2 = 57, 3b_2 / R_2 \operatorname{tg} \gamma_2 , \qquad (2.28)$$

как показано в развертке на рис. 3.7.

Для удобства фрезерования или отливки лопастей рабочего колеса и уменьшения стеснения меридианного потока назначают

$$\gamma_2 \ge 60^{\circ} \tag{2.29}$$

и по уравнению (2.28) рассчитывают $\Delta \varphi_2$. При профилировании изменяют $\beta_{1,n}$ и $\beta'_{2,n}$ и получают необходимый $\Delta \varphi_2$. Для точного определения углов в окне **ТЗ и сетка** следует задать di = 1° Затем перейти в окно **Результаты**, выбрать вкладку **Параметры потока** и для $r = R_2$ интерполяцией найти соответствующий φ_2 .

Иногда возникает необходимость в профилировании лопастей с переменной в данном меридианном сечении толщиной. На рис. 3.8 показано рабочее колесо с двурядной решеткой лопастей, у которой $Z_1 + Z_2 = 7 + 7$. План рабочего колеса приведен на рис. 1.3. Одноступенчатый насос с этим колесом рассчитан на следующие параметры: $Q = 0,0278 \text{ м}^3/\text{c}, H = 10 \text{ м}, n = 2100 \text{ об/мин}, n_s = 230$. Дополнительная программа «Толщина лопасти» рассчитывает толщины таким образом, что в любом меридианном сечении длинные и короткие лопасти вблизи основного диска имеют большую толщину, чем около покрывного диска.

Профилирование осецентробежных рабочих колес с развитым в осевом направлении входным участком имеет некоторые особенности. Совместно с ВНИИАЭН (г. Сумы) модернизировалось рабочее колесо нефтяного магистрального насоса HM–2500–230. Проточная полость насоса $n_s = 90$ показана на рис. 3.9. На расчетном режиме $Q/2 = 0,14 \text{ м}^3/\text{с}, n = 1485$ об/мин, H = 61 м. Рабочее колесо отлито из стали 25Л. Полуосевой входной участок и центробежный участки ОСЦК, условной границей которых служит меридиан $\phi = 120^\circ$, профилируются на конформной диаграмме как единая лопастная система. Недостаток профилирования — это малый угол



Рис.3.8. Меридианная проекция, конформная диаграмма и толщины лопасти



Рис. 3.9. Проточная полость насоса НМ–2500–230: 1 — полуспиральный подвод; 2 — спиральный отвод; 3 — центробежный участок колеса; 4 — входной шнековый участок колеса; 5 — щелевое уплотнение

между меридианным сечением и поверхностью тока а, который составляет $\lambda_{\min} = 35^{\circ}$ (рис. 3.10*a*). Это способствует образованию наплывов металла в местах сопряжения лопасти с дисками колеса. Кроме того, уменьшается коэффициент стеснения, который при $\sigma_{1a} = 5,5$ мм составляет $\psi_{1a} = 0,75$. Поэтому в окончательном варианте толщина лопасти во втулочном сечении уменьшена до $\sigma_{1a} = 4$ мм мм, что увеличило коэффициент стеснения до $\psi_{1a} = 0.81$. Эффективным способом уменьшения стеснения является также уменьшение числа лопастей на входном участке до $Z_1 = 3$ и переход к двухрядной решетке лопастей с параллельным расположением лопастей второго ряда. Однако вследствие ограничения, наложенного на осевую длину рабочего колеса $l_z \le 0,125$ мм, в данном случае этот $Z_1 = 3$, способ неприменим. Если то густота решетки $(L_1/T)_e = 0.35$, что представляется недостаточным. Как правило, входную кромку лопасти ОСЦК приходится располагать в разных меридианах. Для упрощения технологии изготовления входной и центробежный участки этого ОСЦК отливались и обрабатывались порознь. Неточности изготовления затрудняют стыковку лопастей обоих участков. Поэтому при сборке лопасти входного участка повернуты относительно лопастей центробежного участка на 1/3 углового шага в сторону вращения.



Рис. 3.10. Меридианные сечения средней поверхности лопасти (a), конформная диаграмма (б), график толщин лопасти (в), и полуосевой входной участок (г) ОСЦК насоса НМ-2500-230 (размеры в мм) Испытания насоса на воде представленные на рис. 3.11 и 3.12, показали, что на оптимальном режиме КПД равен 80%. При оптимальной подаче $Q = 0,138 \text{ м}^3/\text{с}$, втулочном отношении $\overline{d_1} = 0,5$, относительной толщине входных кромок $\overline{\sigma}_{1c} = 0,03$ и коэффициенте приведенного входного диаметра $K_0 = 5$ спрофилированное ОСЦК обладает повышенными кавитационными качествами: $C_{3\%} = 1700$.



Рис.3.11. Энергетическая характеристика насоса HM–2500–230 по данным [13]



Рис.3.12. Кавитационные характеристики насоса HM-2500-230 по данным [13]

На рис. 3.13 приведен ещё один пример профилирования ОСЦК высокооборотного насоса для криогенных жидкостей. Условимся считать, что осевой входной участок колеса заканчивается, а центробежный начинается на меридиане $\phi = 100^{\circ}$. Поверхность лопасти линейчатая. Лопасти рабочего колеса фрезеруются заодно с ведущим диском конической фрезой на станке с ЧПУ (материал колеса — нержавеющая сталь X18H9T). Три длинные лопасти первого ряда продолжаются до выхода из рабочего колеса. Три короткие лопасти второго ряда начинаются на меридиане $\phi = 100^{\circ}$ и также продолжаются до выхода. Число лопастей на выходе рабочего колеса $Z_1 + Z_2 = 6$. Функциональное ограничение $\psi_1 \ge 0.8$, параметрическое ограничение $\lambda_{\min} \ge 60^\circ$, выбранный закон изменения входных углов установки $tg\beta_{1\pi} = S_1/2\pi r_1$ и функциональное ограничение на угол атаки $\delta_a \leq 14^\circ$ почти однозначно определяют вид конформной диаграммы. Увеличение угла λ_{min} требует увеличения расстояния между линиями а и е на конформной диаграмме, что вынуждает выбирать переменный угол $\beta_{2\pi}$. Соответственно выходная кромка лопасти рабочего колеса наклоняется, как показано на рис. 3.13а. Кроме того, следует отметить, что увеличение угла λ на входе в ОСЦК приводит к уменьшению этого угла на выходе. Поэтому приходится идти на компромисс. На входном и выходном участках спроектированного ОСЦК углы λ примерно одинаковы. Технологию изготовления рабочего колеса можно упростить, если осевой входной участок спрофилировать в виде шнека постоянного хода и изготовить его отдельно от центробежного участка. План рабочего колеса, на котором изображена одна длинная лопасть, показан на рис. 3.14.

На рис. 3.15 представлен разрез насоса НГПН–3600–120 для трубопроводного транспорта нефти [19]. Этот шнекоцентробежный насос с рабочим колесом двухстороннего входа и коэффициентом быстроходности $n_s = 110$ при n = 1500 об/мин обладает следующими параметрами: $Q/2 = 0.5 \text{ м}^3/\text{с}$, H = 138 м, $\eta = 87\%$, $C_{3\%} = 4400$. Рабочее колесо имеет двухрядную решетку лопастей $Z_1 + Z_2 = 6 + 6$. Оптимизация проточной полости насоса, и в частности, шнека и центробежного колеса выполнена автором работы [19].





Рис. 3.13. Меридианные сечения средней поверхности лопасти (*a*) и конформная диаграмма (б) ОСЦК насоса для криогенных жидкостей

54

03.10.2009 (v32)



Рис. 3.14. План ОСЦК насоса для криогенных жидкостей



Рис.3.15. Продольный разрез нефтяного подпорного насоса НГПН-3600-120 согласно работе [19]

- 1 полуспиральный подвод; 2 шнек; 3 спиральный отвод; 4 ОСЦК; 5 торцовое уплотнение вала; 6 вал; 7 гидростатический подшипник



Рис.3.16. Поверочное профилирование рабочего колеса насоса НГПН–3600–120, описанного в работе [19]

Поверочное профилирование лопастей этого колеса приведено на рис. 3.16. При профилировании учитывается создаваемый шнеком момент скорости и неравномерность распределения окружных и меридианных скоростей за шнеком. Эти величины рассчитываются по программе [14] и вводятся в окно ТЗ и сетка. Рассчитанные по уравнениям (2.7) и (2.8) углы атаки delB отображаются в окне Входная кромка. Чтобы поток, стекающий с лопастей шнека, натекал с положительными углами на входные кромки лопастей ОСЦК, расположенные в непосредственной близости от выходных кромок шнека, необходимо иметь $\beta_{2m} \leq \beta_{1n}$. Поэтому рассчитанные углы атаки delB полезно сравнить с разницей углов β_{1л}-β_{2ш}. Энергетическая характеристика насоса из работы [19] показана на рис. 3.17. Насос сочетает в себе весьма высокие КПД, всасывающую способность, низкий уровень вибрации и эксплуатационную надежность, превосходящие мировой уровень. Подшипники смазываются перекачиваемой нефтью, маслосистема отсутствует.



Рис. 3.17. Энергетическая характеристика насоса на воде (темные символы) и нефти (светлые символы) по данным [19]

На рис. 3.18 приведен пример профилирования рабочего колеса с малым втулочным отношением. Это рабочее колесо предполагается использовать в первой ступени модернизированного питательного насоса ПН–1500–350. При уменьшении радиуса r_{1a} расположения входной кромки уменьшается окружная скорость. В результате увеличиваются угол относительного потока и угол установки лопасти. Последнее увеличивает угол изгиба лопасти по линии тока *a*, что нежелательно. Кроме того, под посадку на вал рабочее колесо должно иметь отверстие достаточно большого диаметра $r_{\rm B}$. Поэтому входную кромку расположили в области поворота потока.



Рис. 3.18. Рабочее колесо с малым втулочным отношением

03.10.2009 (v32)

58



Рис. 3.19. Профилирование цилиндрической лопасти

03.10.2009 (v32)

Программа позволяет профилировать методом конформных отображений не только пространственные, но и цилиндрические лопасти. Для цилиндрической лопасти меридианное сечение средней поверхности лопасти должно быть отрезком прямой, параллельной оси вращения, как показано на рис. 3.19. Чтобы проследить за формой входной кромки и положением меридианных сечений лопасти, целесообразно профилировать лопасть по 5-ти линиям тока. Для уменьшения угла атаки лопасти на линии тока *е* входную кромку необходимо наклонить в меридианной проекции. На конформной диаграмме линия *е* располагается ниже линии *а*.

4. ЭКРАННАЯ КОПИЯ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ЛОПАСТЕЙ

При сравнении вариантов спрофилированных лопастей и составлении расчетно-пояснительной записки удобно иметь распечатанные экранные копии профилирования. Все, что находится на рабочем столе, можно скопировать в буфер обмена, подав с клавиатуры команду **Print Screen**. Любое активное окно копируется в буфер обмена по команде **Alt+Print Screen**.

Чтобы получить вышеупомянутую экранную копию, в главном окне программы профилирования открываются и располагаются окна Входная кромка, Конформная диаграмма, Толщина лопасти, Площадь МС, План РК, как показано на рис. 3.2. Затем с клавиатуры подается команда Print Screen и изображение на экране копируется в буфер обмена. Далее запускается программа Word 2003 и по умолчанию открывается файл с именем «Документ 1». В меню Файл выбираем Парметры страницы... В окне с аналогичным названием назначаем: размер бумаги — А4, поля (верхнее, левое, нижнее, правое) — 2см, 1 см, 2 см, 1см, ориентация — альбомная. Подаем команду ОК и закрываем это окно. По команде Ctrl+V содержимое буфера обмена вставляется в «Документ 1». Щелчком правой кнопки мыши на рисунке открываем контекстное меню и далее выбираем Формат рисунка / Положение / Перед текстом / ОК. Щелкаем левой кнопкой мыши по рисунку и удерживая ее перемещаем рисунок к правой границе окна. Далее выбираем Файл / Сохранить как... В окне Сохранение документа присваиваем файлу какое-либо подходящее имя, например, ПН-1500-350 и указываем папку, в которой будет храниться экранная копия. Возвращаемся в главное окно программы профилирования, открываем окно ТЗ и сетка и подаем команду Alt+Print Screen. В результате экранная копия этого активного окна помещается в буфер обмена. Открываем файл ПН-1500-350 и по команде Ctrl+V изображение окна ТЗ и сетка вставляется в верхний левый угол экрана. Снова щелкаем правой кнопкой мыши на последнем рисунке, открывая контекстное меню, в котором выбираем Формат рисунка / Положение / Перед текстом / ОК. В окне ТЗ и сетка выбираем вкладку (rVu)1, копируем открывшееся окно в буфер, вставляем изображение в окно файла ПН-1500-350 и т.д. То же самое делаем со второй вкладкой (V'm)1. Кроме того, копируем окно Размеры МС. В случае необходимости можно изменять размеры окон, располагая их, как удобно. Далее последовательно выделяем фрагменты изображения в окне файла ПН-1500-350, в меню Вид выбираем Настройка изображения и в этом окне — Меню Изображение / Черно-белое. Создаваемая экранная копия становится черно-белой, что необходимо для дальнейшей работы с ней. Выбирая на панели Рисование опции Прямоугольник, Линия, Надпись можно закрыть ненужные части изображения, поместить его в рамку и сделать дополнительные надписи. Для создания экранной копии профилирования лопасти можно также воспользоваться программой HyperSnap-DX. Затем на панели инструментов Рисование выбираем инструмент Выбор объектов и рамкой выделяем все фрагменты создаваемой экранной копии. Щелчком правой кнопки на этой копии открываем контекстное меню, в котором выбираем опцию Группировать.После создания экранной копии она редактируется далее. Для этого можно использовать, например, программы Visio или Photoshop. При этом следует указать оси координат, номера параллелей и меридианов и др. Если необходимо, можно привести результаты расчета теоретического напора, координаты конформной диаграммы, толщины лопасти и др. данные, как показано на рис. 3.4 — 3.7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Байбаков О.В.* Применение ЭВМ в расчетах проточной полости лопастных гидромашин: Учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию / Под ред. И.В. Матвеева. — М.: МВТУ, 1982. — 40 с.

2. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Под ред. Т.М. Башты и С.С. Руднева. — 2-е изд., перераб. — М.: Машиностроение, 1982. — 423 с.

3. Жарковский А.А., Грянко Л.П., Плешанов В.Л. Автоматизированное проектирование рабочего колеса центробежного насоса: Учебное пособие. — СПб.: СПбГТУ, 1997. — 108 с.

4. *Кузнецов А.В., Панаиотти С.С., Савельев А.И.* Автоматизированное проектирование многоступенчатого центробежного насоса: Учебное пособие. — Калуга: КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. —118 с.

5. *Ломакин А.А.* Центробежные и осевые насосы. — М.—Л.: Машиностроение, 1966. — 364 с.

6. *Машин А.Н.* Профилирование проточной части рабочих колес центробежных насосов: Учебное пособие / Под ред. В.С. Квятковского.— М.: Изд-во МЭИ, 1976.—56 с.

7. *Мелащенко В.И., Зуев А.В.* Профилирование лопастей рабочих колес центробежных насосов. — М.: МВТУ, 1980. — 52 с.

8. Мелащенко В.И., Зуев А.В., Савельев А.И. Разработка проточной части и экспериментальные исследования первой ступени питательного турбонасоса // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Материалы Всероссийской науч. техн. конф. 7–9 декабря 2004 г., т. 1. — М.: Издво МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.— С. 259–260.

9. *Модельная* ступень центробежного насоса: Методическое пособие / Под ред. С.С. Панаиотти. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. — 20 с.

10. Модернизация питательных насосов энергоблоков 150 — 1200 МВт на ОАО КТЗ / Кирюхин В.И., Циммерман С.Д., Семенов Ю.М., Анкудинов А.А. // Электрические станции. — 2003, № 6. — С. 42–46. 11. Панаиотти С.С. Основы расчета и автоматизированное проектирование лопастных насосов с высокой всасывающей способностью. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. — 48 с.

12. Панаиотти С.С., Савельев А.И. Автоматизированное проектирование автоматических устройств для уравновешивания осевых сил в лопастных насосах. — Калуга: КФ МГТУ, 1999. — 18 с.

13. Панаиотти С.С., Тазетдинов В.Г. Расчет и проектирование рабочих колес лопастных насосов с высокими параметрами // Труды МГТУ.— 1999.— №574.— С. 88—101.

14. Панаиотти С.С., Савельев А.И. Автоматизированный расчет и проектирование высокооборотного шнекоцентробежного насоса. — Калуга: КФ МГТУ, 2001. — 56 с.

15. *Проскура Г.Ф.* Гидродинамика турбомашин. — Киев: Машгиз, 1954. — 424 с.

16. *Руднев С.С.* Основы теории лопастных решеток. — М.: МВТУ, 1976. — 78 с.

17. Руднев С.С., Матвеев И.В. Методическое пособие по курсовому проектированию лопастных насосов. — М.: МВТУ, 1974. — 72 с.

18. *Руднев С.С., Мелащенко В.И.* Обратные течения на входе в рабочее колесо и их влияние на форму напорной характеристики центробежных секционных насосов // Труды ВНИИГидромаша. — 1968. — Вып. 37. — С. 167–183.

19. Чумаченко Б.Н. Теоретические основы и экспериментальные исследования с целью создания проточных частей лопастных насосов, обеспечивающих сочетание высоких КПД, всасывающей способности и низкого уровня вибраций: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — М.: 2002. — 36 с.

20. Экспериментальные исследования моделей центробежных колес, направляющих аппаратов и предвключенных устройств для питательных насосов энергоблоков ТЭС мощностью 800 МВт / КФ МГТУ; Руководитель В.И. Мелащенко; № ГР 01830018; Инв. № 02850024. — Калуга, 2002. — 72 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Усл	ювные обозначения и идентификаторы	3
Инд	дексы	4
Сок	ращения	4
Вве	дение	5
1.	Конформное отображение	6
2.	Программа «Профилирование лопасти»	10
	2.1. Главное окно программы.	10
	2.2. Техническое задание и параметры сеток	11
	2.3. Построение меридианной проекции рабочего колеса	12
	2.4. Графики нормальных толщин лопасти	14
	2.5. Профилирование лопасти	17
	2.6. Оценка качества профилирования	26
	2.7. Сохранение и экспорт данных	29
3.	Примеры профилирования лопастей	39
4.	Экранная копия профилирования лопастей	61
Спи	сок литературы	63

Д.В. Тимофеев, А.И. Савельев, С.С. Панаиотти

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ ЛОПАСТЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ РАБОЧИХ КОЛЕС

Руководство пользователя

Компьютерная верстка Е.В. Лукачева

Формат 60×84/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печ. л. 4,1. Усл. п. л. 4. Тираж 20 экз.

Отпечатано с готового оригинала-макета в КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана 248000, г. Калуга, ул. Циолковского, 25, тел. 77–45–02