

Министерство образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра гидромашиностроения

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ
ЛОПАСТНЫХ ГИДРОМАШИН

Проектирование проточной части
многоступенчатого центробежного насоса
с использованием САПР ЛС

Методические указания

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2011

УДК 621.226(075.8)

Математические модели рабочих процессов лопастных гидромашин. Проектирование проточной части многоступенчатого центробежного насоса: Метод. указания / Сост.: А.А. Жарковский, А.В. Грачев, С.А. Шумилин, П. В. Пугачев. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 38 с.

Методические указания соответствуют содержанию дисциплины ЕН.В.01.01 «Математические модели рабочих процессов лопастных гидромашин» (национально-региональный компонент) государственного образовательного стандарта по направлению 150800 «Гидравлическая, вакуумная и компрессорная техника»

Рассмотрены математические модели, используемые при выборе основных параметров, проектировании меридианного сечения и лопастных систем рабочего колеса, лопаточного диффузора и обратного направляющего аппарата. Предназначены для студентов специальности 150802 «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» и других смежных специальностей.

Ил.: 23. Библиогр.: 5 назв.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

©Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет, 2011

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при проектировании многоступенчатых питательных насосов получила распространение конструкция ступени в составе: рабочее колесо (РК), лопаточный диффузор (ЛД) канального типа, поворотный канал (ПК) и обратный направляющий аппарат (ОНА) (рис.1).

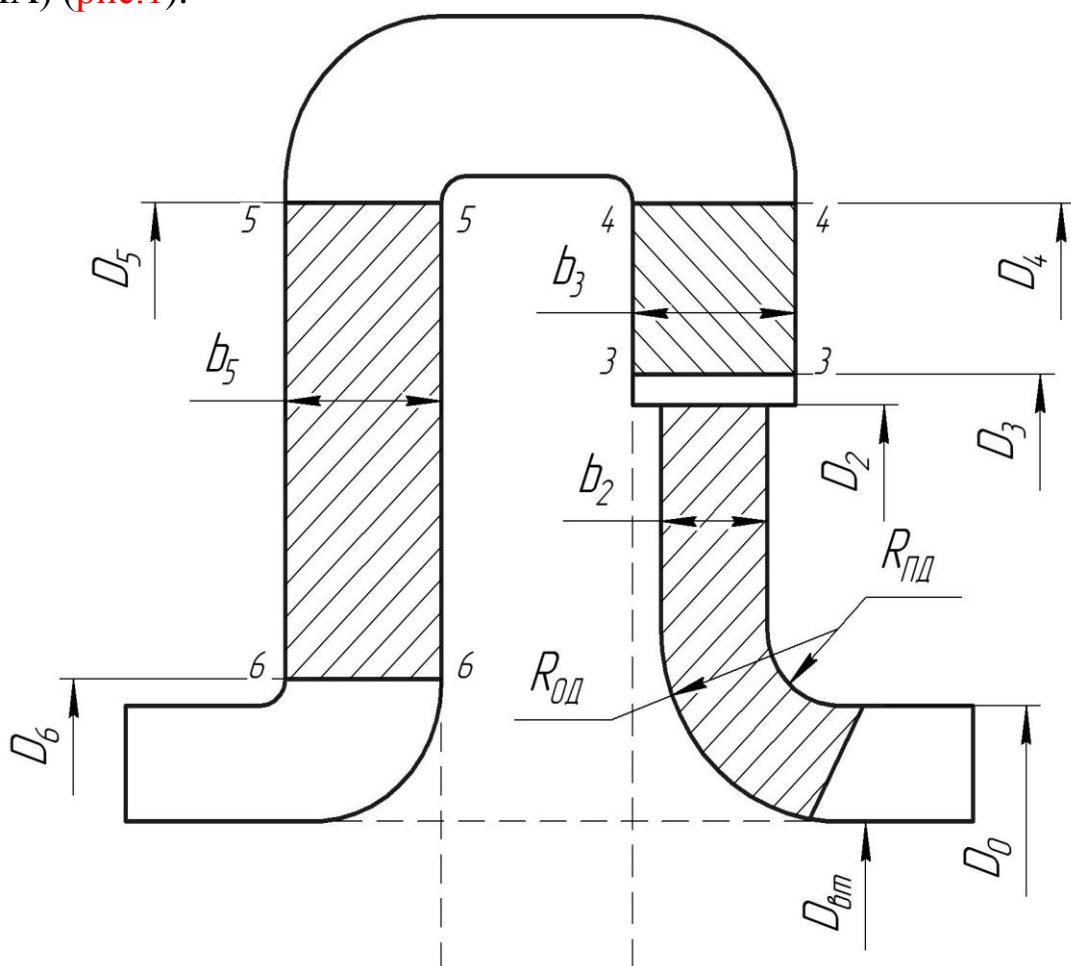


Рис. 1. Меридианное сечение ступени питательного насоса

В отличие от ранее применявшихся конструкций отводов канального типа (рис. 2) данный отвод представляет набор двух решеток — лопаточного диффузора и обратного направляющего аппарата (см. рис. 1, 2б), которые могут быть обработаны с высокой чистотой на фрезерном оборудовании и тем самым уменьшены гидравлические потери в них. Конструкции отводов решеточного типа и методика их расчета не освещены в литературе по центробежным насосам. Данные методические указания призваны восполнить этот пробел.

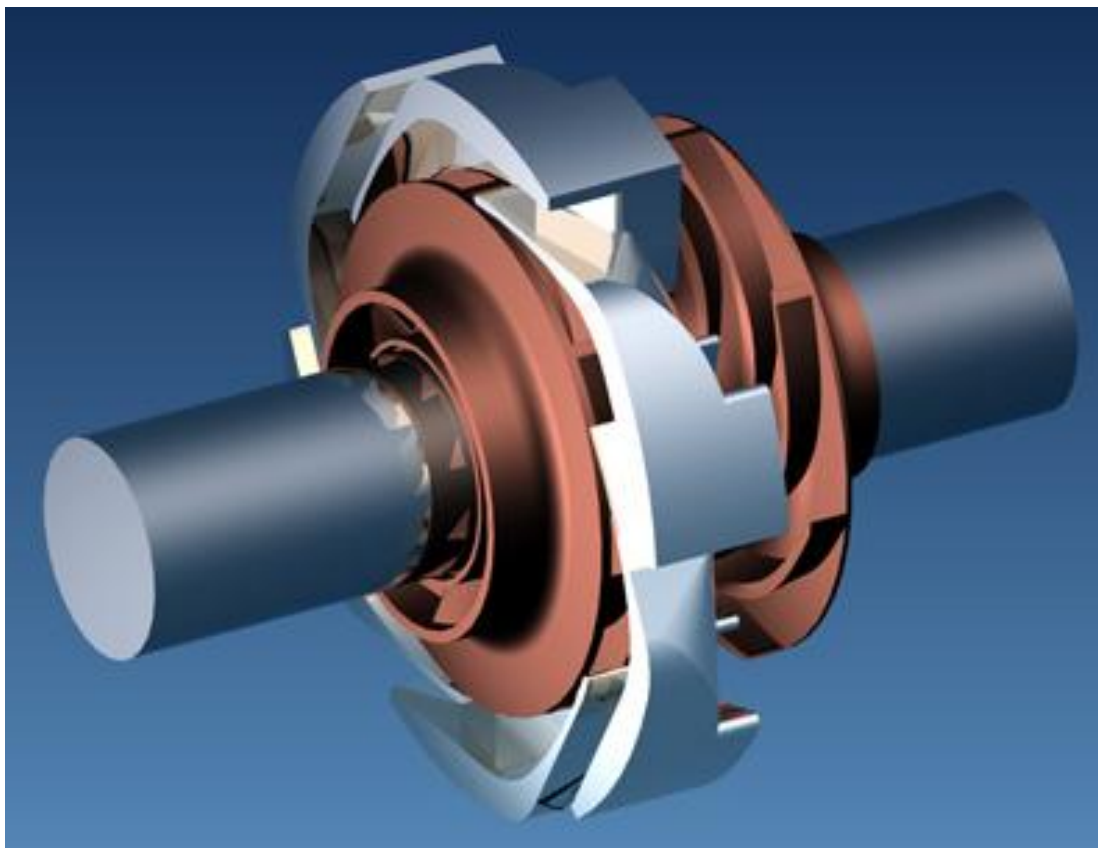


Рис. 2, а. Ротор насоса и отвод канального типа

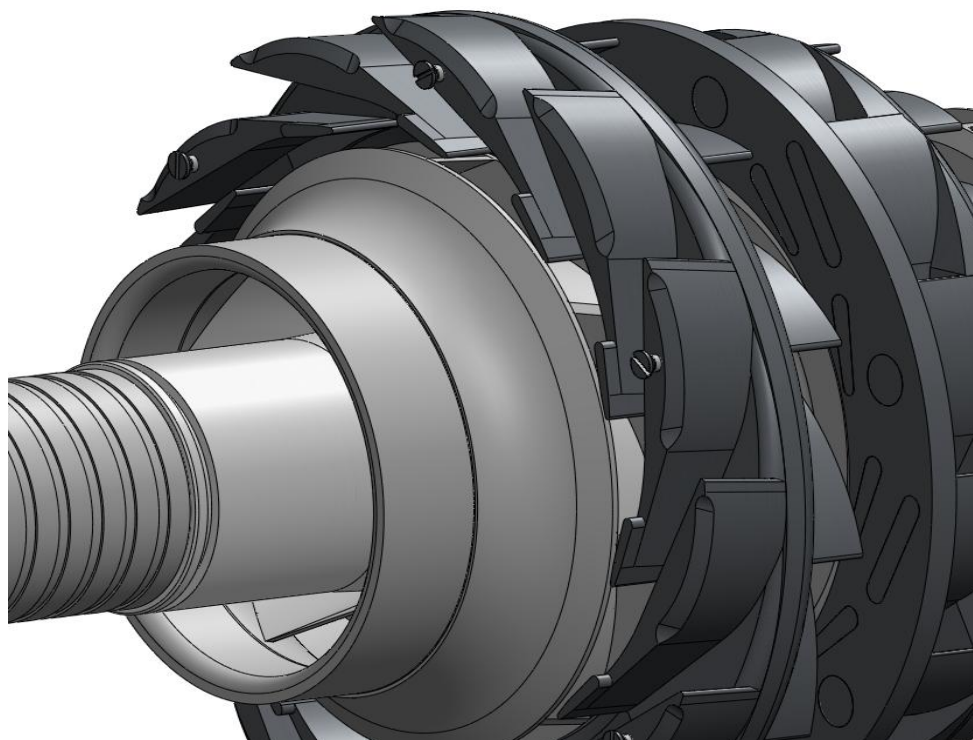


Рис. 2, б. Ротор и отвод лопаточного типа

Проектирование многоступенчатых насосов рассмотрим на примере проектирования многоступенчатых питательных насосов. Характерной особенностью таких насосов является наличие толстого проходного вала с $\bar{d}_{вт} = d_{вт} / D_2 = 0,43 \dots 0,46$ и рабочее колесо с пространственной формой лопастей.

1. Выбор основных параметров ступени

В качестве примера приводится расчет модельной ступени питательного насоса со следующими параметрами номинального режима:

Подача, м ³ /ч (м ³ /с)	Q	300 (0,083)
Напор, м	H	30
Частота вращения, об/мин	N	1500
Температура рабочей среды, °С	t	20
Допускаемый кавитационный запас, м	$\Delta h_{доп}$	7,5
КПД насоса, %	η	80
Потребляемая мощность, кВт	N	30,5

Проектируемая проточная часть имеет быстроходность:

$$n_s = \frac{3,65n\sqrt{Q}}{H^{3/4}} = \frac{3,65 \cdot 1500 \sqrt{0,083}}{30^{3/4}} = 123.$$

Предварительные значения КПД $\eta_{об}$, $\eta_{имех}$, η_r определяем по формулам Ломакина А.А. [1]

Объемный КПД

$$\eta_{об} = \frac{1}{1 + 0,68n_s^{-0,67}} = 0,974.$$

Внутренний механический КПД

$$\eta_{им} = \frac{1}{1 + 820 / n_s^2} = 0,95.$$

Гидравлический КПД

$$\eta_r = 1 - \frac{0,42}{(\lg D_{лпр} - 0,172)^2} = 0,9.$$

Тогда общий КПД ступени составит

$$\eta = \eta_{\text{об}} \eta_{\text{имех}} \eta_{\Gamma} = 0,974 \cdot 0,95 \cdot 0,9 = 0,83.$$

Учитывая объемные потери в заднем уплотнении втулки рабочего колеса (РК) и внешние механические потери, ожидаемое значение КПД насоса можно принять равным 81...81,5%. Таким образом, суммарные расчетные гидравлические потери в проточной части насоса составляют примерно 10%, что должно найти свое подтверждение при проектировании лопастных систем и расчете течения и потерь в них.

Требуемое значение кавитационного коэффициента быстроходности $C_{\text{кр}}$ определяется по формуле

$$C_{\text{кр}} = \frac{5,62n\sqrt{Q}}{\Delta h_{\text{кр}}^{3/4}},$$

где $\Delta h_{\text{кр}}$ — критический кавитационный запас

$$\Delta h_{\text{кр}} = \frac{\Delta h_{\text{доп}}}{A} = \frac{7,5}{1,5} = 5 \text{ м},$$

где $A = 1,5$ — коэффициент кавитационного запаса.

$$C_{\text{кр}} = \frac{5,62 \cdot 1500 \cdot \sqrt{0,083}}{5^{3/4}} = 726.$$

2. Рабочее колесо

2.1. Определение исходных данных для расчета колеса

Диаметр РК D_2 будет определен из основного уравнения гидромашин с использованием коэффициента окружной скорости K_{u2} :

$$D_2 = \frac{60}{\pi n} \sqrt{\frac{gH}{K_{u2}\eta_{\Gamma}}} = 0,330 \text{ м},$$

$$K_{u2} = 1,87^{-0,28} = 0,486.$$

При работе с программным комплексом САПР ЛС необходимо все исходные данные приводить к приведенным параметрам: так, чтобы напор H и диаметр РК D_2 насоса составляли $H' = 1$ м, $D'_2 = 1$ м. При этом масштабы скорости и длины составляют \sqrt{H} и D_2 , где H и D_2 — натуральные параметры; масштаб давления P и нагрузки ΔP

— $\rho g H$ (кг/м²), силы и момента — $(\rho g / 1000) H D_2^2$ (кг) и $(\rho g / 1000) H D_2^3$ (кг·м).

При переходе к безразмерным параметрам приведенные расход Q_1' и частота вращения n_1' ротора агрегата, задаваемые пользователем, определяются по формулам:

$$Q_1' = \frac{Q_k}{D_2^2 \sqrt{H}} = \frac{0,0852}{0,33^2 \cdot \sqrt{30}} = 0,143,$$

$$n_1' = \frac{n D_2}{\sqrt{H}} = \frac{1500 \cdot 0,33}{\sqrt{30}} = 90,37,$$

где n — натурная частота вращения.

Так как расход через РК больше расхода проходящего через ступень на величину утечек в переднем уплотнении РК, то при расчете РК более корректно задавать расход через РК:

$$Q_k = \frac{Q}{\eta_{об}} = \frac{0,083}{0,974} = 0,0852,$$

где Q — натуральный расход.

2.2. Определение основных размеров колеса

1. Диаметр втулки РК $d_{вт}$ выбирается исходя из прочностных соображений и требования обеспечения жесткости вала: прогиб вала не должен превышать величины зазора в уплотнениях, также должен быть обеспечен запас по критической частоте вращения ротора насоса.

Для многоступенчатых питательных насосов относительное значение диаметра втулки РК обычно принимается в пределах $\bar{d}_{вт} = 0,4 \dots 0,46$ в зависимости от протяженности его ротора.

Для вертикальных конденсатных насосов относительное значение диаметра втулки РК может быть уменьшено до $\bar{d}_{вт} = 0,32 \dots 0,38$.

В одноступенчатых насосах типа Д в зависимости от конструктивного исполнения $\bar{d}_{вт} = 0,32 \dots 0,38$.

Следует отметить, что увеличение $d_{вт}$ РК приводит к увеличению гидравлических потерь.

Принимаем диаметр втулки $d_{вт} = 0,142$ м ($\bar{d}_{вт} = 0,43$).

2. Безразмерное значение диаметра горловины \bar{D}_r в первом приближении можно определить по формуле

$$\bar{D}_r = 0,00173 n_s + 0,393 = 0,606,$$

тогда диаметр горловины составит

$$D_r = 0,606 \cdot 330 = 200 \text{ мм.}$$

По первым результатам расчета обтекания, этот размер может быть откорректирован, с тем, чтобы угол лопасти на входе в периферийном сечении (покрывающий диск) составлял $\beta_1 = 17 \dots 20^\circ$ при наличии положительного угла атаки $\Delta\beta_1 \approx 2 \dots 3^\circ$.

3. Безразмерное значение ширины канала на выходе можно определить по одной из следующих формул:

$$\bar{b}_2 = \frac{n_s}{1200}; \bar{b}_2 = 0,07 \left(\frac{n_s}{100} \right)^{4/3}; \bar{b}_2 = -0,015 + 0,0009315 n_s.$$

Данный параметр также может быть откорректирован по результатам расчетов. Увеличение ширины колеса на выходе ведет за собой уменьшение меридианной составляющей скорости, и как следствие увеличивается закрутка за РК $(rV_u)_2$ (рис. 3).

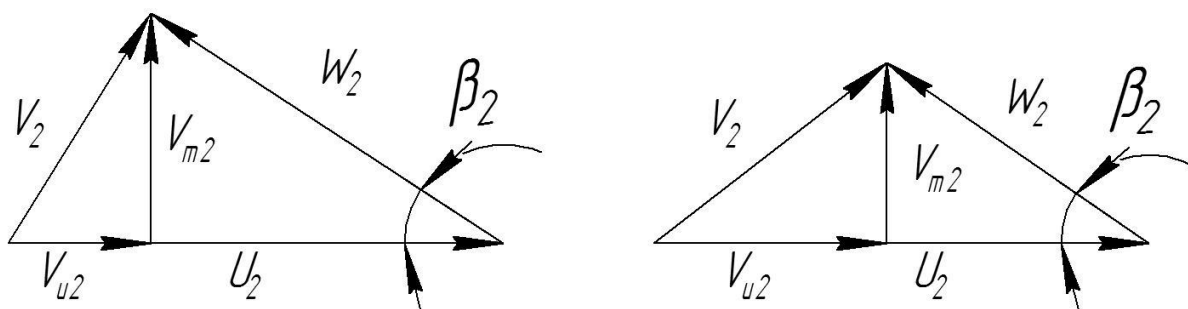


Рис. 3. Треугольники скоростей на выходе из РК при различных величинах b_2

Из конструктивных соображений принимаем $b_2 = 0,29$ мм ($\bar{b}_2 = 0,0879$).

4. Для РК со втулкой, плавность перехода от входа к выходу может быть обеспечена скруглением ограничивающих дисков одним радиусом.

Радиусы скругления принимаются либо по насосу — аналогу, либо после предварительной прорисовки меридианного сечения.

Принимаем радиус покрывающего диска $R_{\text{пд}} = 20$ мм ($\bar{R}_{\text{пд}} = 0,0606$), радиус основного диска $R_{\text{од}} = 48$ мм ($\bar{R}_{\text{од}} = 0,1455$).

На рис. 4 представлено меридианное сечение канала РК.

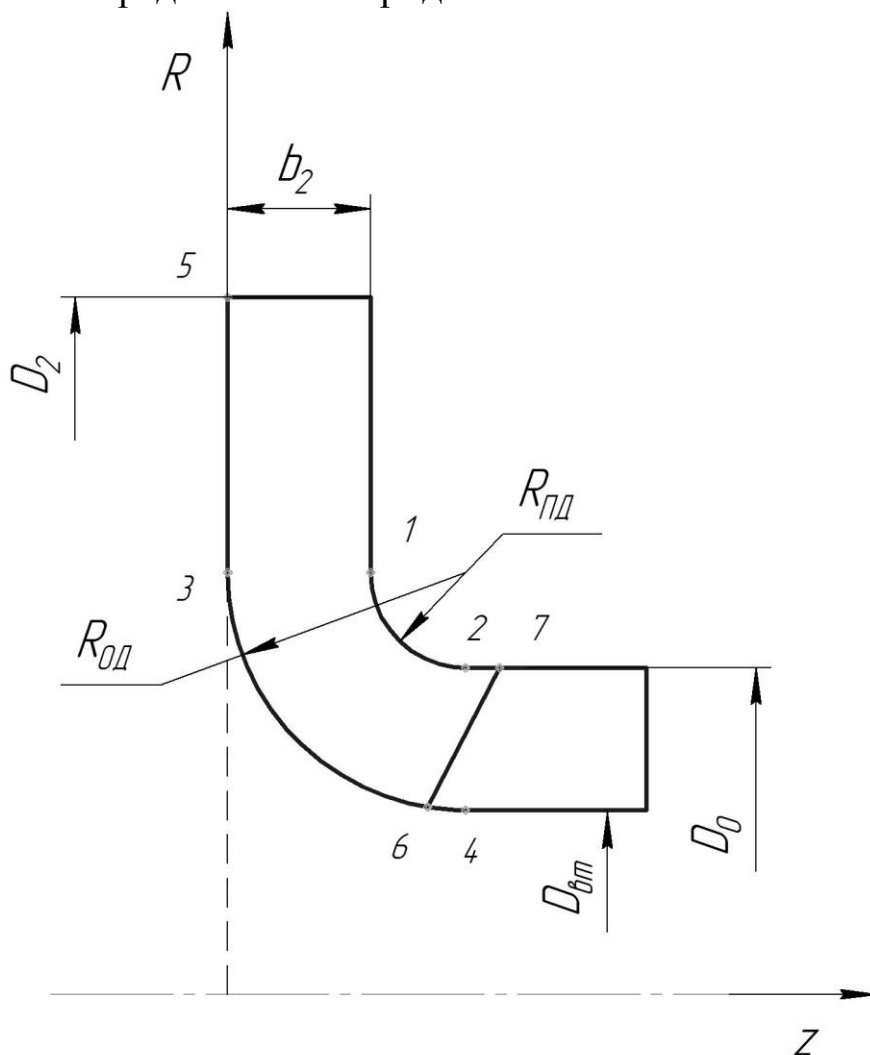


Рис. 4. Меридианное сечение канала РК

2.3. Основные параметры лопастной системы рабочего колеса

Профилирование лопастной системы (ЛС) РК является наиболее ответственной и сложной задачей при проектировании насоса. Лопастная система определяется рядом параметров:

- углом лопасти на входе, β_1 ;
- углом лопасти на выходе, β_2 ;
- углом охвата лопасти, φ ;

- положением всасывающей и напорной кромок в меридианном сечении;
- законом изменения углов наклона лопасти;
- законом изменения толщин лопасти.

Проектировать ЛС РК будем с использованием комплекса программ ЦКТИ САПР ЛС путем последовательного выполнения прямых расчетов гидравлических показателей ЛС в целях обеспечения требуемого распределения характеристик потока. Для проведения расчетов необходимо задаться предварительными значениями основных параметров ЛС РК.

Углы лопасти на входе по трем контрольным сечениям (ПД, СрЛ, ОД) в первом приближении можно принять интуитивно, например, следующими: на периферии — 18° , в среднем сечении — 22° и у втулки — 28° или определить после построения треугольников скоростей на входе. По результатам первых расчетов необходимо откорректировать значения углов на входе (обязательно наличие положительного угла атаки по всем линиям тока).

Выходной угол лопасти обычно берут в пределах $\beta_2 = 20 \dots 30^\circ$, где большие значения угла соответствуют тихоходным колесам, средние — колесам средней быстроходности и меньшие — быстроходным.

Для обеспечения крутой формы характеристики углы лопасти на выходе, были приняты по всем линиям тока 21° .

Углы охвата в первом приближении принимаем $\varphi = 100^\circ$ по всем ЛТ.

Положение всасывающей кромки оказывает сильное влияние на законы изменения углов наклона лопасти по ее длине. Поэтому ее положение обязательно будет откорректировано по результатам первых расчетов.

В первом приближении координату r всасывающей кромки на основном диске (точка 6 на рис. 4) принимаем $r = d_{\text{вт}} / 2 = 71$ мм или в относительных величинах $\bar{r} = 0,215$.

Координату z всасывающей кромки у покрывающего диска (точка 7 на рис. 4) принимаем равной $z = 56$ мм или в относительных величинах $\bar{z} = 0,17$.

Коэффициенты кривизны профиля для первых расчетов принимаем равными нулю.

Толщину лопастей обычно принимают переменной - тоньше по концам, с утолщением посередине. Толщину на этом участке следует согласовать с толщиной дисков колеса, принимаемой по соображениям технологии производства и прочности. Для уменьшения стеснения потока толщину входной кромки лопасти берут примерно в два раза тоньше, чем толщину выходной кромки лопасти, однако по технологическим соображениям не меньше, чем 2 мм.

В программном комплексе САПР ЛС [5] лопасть проектируется следующим образом. Задаются углы скелетной линии лопасти на входе и выходе из РК. Задается угол охвата лопасти. Варьируя коэффициентами K_{20} , K_{40} , K_{50} , K_{60} можно управлять темпом изменения угла вдоль скелетной линии и тем самым изменять форму лопасти.

2.4. Подготовка исходных данных для РК

Для проведения расчета обтекания необходимо создать файл исходных данных (текстовый файл с расширением .dat), который включает в себя режимные параметры, геометрию ограничивающих дисков и лопастей РК, параметры расчета и печати.

При создании файла исходных данных крайне важно соблюдать формат вводимых чисел. Для всех дробных чисел используется формат F10.5. Это означает, что число занимает 10 позиций, из которых пять позиций – дробная часть числа, целая часть занимает 4 позиции и одну позицию занимает десятичная точка. Допускается заменять ведущие и ведомые нули пробелами, т.е. записи "0015.65400" и " 15.654 " равнозначны, но если записать "15.654 " или " 15.654", то это вызовет ошибку при чтении файла. При вводе массива чисел в каждой строке располагают по 7 чисел. Для целых чисел используется формат I2, т.е. целое число должно занимать две позиции. Если целое число меньше десяти (занимает только одну позицию), то оно дополняется ведущим пробелом: вместо "3" следует записать " 3".

На **рис. 5** представлен пример файла исходных данных для расчета обтекания. Для быстрого создания файла исходных данных удобно использовать в качестве шаблона файл какого-нибудь другого расчета.

1 1 0 1 0 1 2 1 1								1 строка
2 2 2 2 2 1 2 0 0 1 1								2 строка
0 1 1 0								3 строка
76521 7								4 строка
.143	90.37	0.9						5 строка
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	6 строка
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7 строка
1.0								8 строка
0 0 1								9 строка
0.0	0.0	0.0	0.0					10 строка
.606	.0879	0.0						11 строка
1.0	.7	.55						12 строка
.3636	.1485							13 строка
.3605	.215	.1455						14 строка
.5	.215	.17						15 строка
0.00000								16 строка
0.54070	0.53110	0.52530	0.51950	0.51380	0.50930	0.51250		17 строка
0.93580	0.95370	0.97900	0.99950	1.01660	1.02140	1.02670		18 строка
9								19 строка
0.69470	0.72780	0.74980	0.76230	0.76460	0.75750	0.74390		20 строка
3 4								21 строка
21.0	21.0	21.0						22 строка
18.0	22.0	28.0						23 строка
0.0	0.0	0.0						24 строка
0.0	0.0	0.0						25 строка
.0	.0	.0						26 строка
0.0	0.0	0.0						27 строка
100.0	100.0	100.0						28 строка
.0	.0	.0						29 строка
0.00756	0.00864	0.00951	0.01026	0.01080	0.01134	0.01200		30 строка
0.01224	0.01224	0.01224	0.01225	0.01125	0.01226	0.01226		31 строка
0.01235	0.01250	0.01268	0.01291	0.01323	0.01358	0.01361		32 строка
0.00864	0.00994	0.01113	0.01210	0.01296	0.01350	0.01383		33 строка
0.01404	0.01393	0.01372	0.01329	0.01296	0.01260	0.01224		34 строка
0.01188	0.01152	0.01116	0.01080	0.01044	0.01008	0.00972		35 строка
21								36 строка
0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0		37 строка
7.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0		38 строка
40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0		39 строка

Рис. 5. Пример файла исходных данных

Рассмотрим основные часто изменяемые параметры в этом файле применительно к проектируемому РК (более подробную информацию о всех параметрах можно найти в пособии [2,3]).

В четвертую строку записаны следующие данные: количество линий тока (7), количество точек на ограничивающих дисках (65), количество сечений в области РК (21), число лопастей РК (07).

В пятую строку записываются: приведенный расход (0,143), приведенная частота вращения (90,37), предварительное значение гидравлического КПД проточной части ступени (0,9).

В седьмой строке задаются значения закрутки на входе в РК по всем линиям тока. В нашем случае закрутка на входе отсутствует.

В десятой строке задаются углы наклона всасывающей и напорной кромок к их хордам: DFN0 (0) DFN1 (0) DFW0 (0) DFW1(0) (рис. 6).

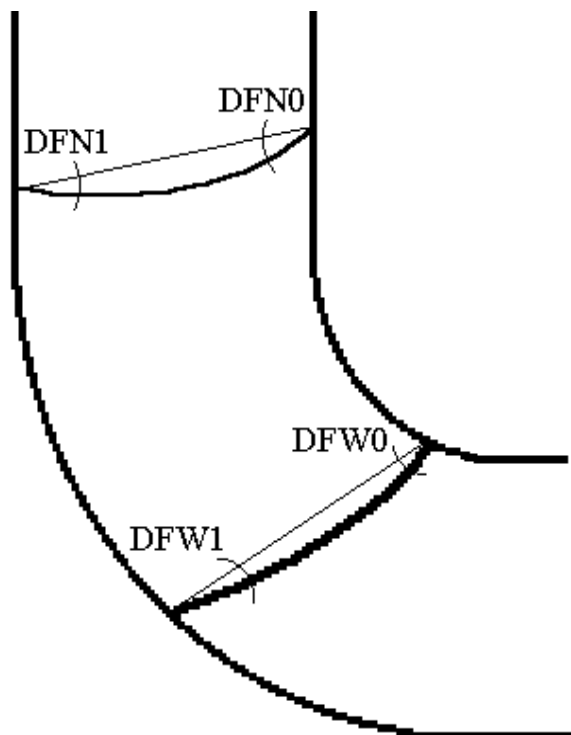


Рис. 6. Форма кромок

Напорная кромка в центробежных насосах практически всегда прямая, необходимость задавать ее криволинейной может возникнуть при проектировании РК большой быстроходности ($n_s > 300$).

Всасывающую кромку с целью обеспечения высоких энергетических и кавитационных качеств обычно задают криволинейной, желательно, чтобы она подходила к покрывающему диску под углом не менее 60° иначе возможно ее быстрое разрушение в этом месте. В первом приближении принимаем ее также прямолинейной.

Строка 11: диаметр горловины (0,606), ширина РК на выходе (0,0879), угол конусности горловины (0).

В 13 строке задаются параметры покрывающего диска: координата R точки перехода диска в закругление (0,3636) (точка 1 на рис. 4), координата Z точки перехода закругления в горловину (0,1485) (точка 2 на рис. 4).

В 14 строке задаются параметры основного диска: координата R точки перехода диска в закругление (0,3605) (точка 3 на рис. 4), радиус втулки (0,215), координата Z точки перехода закругления во втулку (0,1455) (точка 4 на рис. 4). Данные значения подобраны так, чтобы скругление осуществлялось одним радиусом.

В 15 строке задаются параметры кромок: координата R напорной кромки на основном диске (0,5) (точка 5 на рис. 4), координата R всасывающей кромки на основном диске (0,215) (точка 6 на рис. 4), координата Z всасывающей кромки на покрывающем диске (0,17) (точка 7 на рис. 4).

В строке 21 задается количество контрольных линий тока (3) и номер средней линии тока (4).

В строках 22–29 параметры задаются для контрольных линий тока (1, 4 и 7).

Строка 22 — углы наклона профилей на напорной кромке (21–21–21), строка 23 — углы наклона профилей на всасывающей кромке (18–22–28).

В строках 24–27 записываются коэффициенты K_{20} , K_{40} , K_{50} , K_{60} . В первом приближении значения коэффициентов приняты равными 0.

Строка 28 — углы охвата (100–100–100).

Строка 29 — угловая координата всасывающей кромки (в центробежных насосах обычно принимается равной 0 (кромка находится в меридианной плоскости)).

В строках 30–32 задаются толщины профиля в периферийном сечении (ПД) в направлении от напорной кромки к всасывающей.

В строках 33–35 задаются толщины профиля во втулочном сечении (ОД) также в направлении от напорной кромки к всасывающей.

Строка 36 — количество сечений выдаваемых программой для построения теоретического чертежа (21).

Остальные строки — координаты по углу охвата выдаваемых сечений (в нашем случае от 0 до 100).

В данном примере рассмотрен упрощенный вариант задания геометрии центробежной гидромашины, при необходимости есть возможность задавать проточную часть и кромки координатами точек, при этом изменяется структура файла. При изменении определенных ключей в первых строках файла и изменяется количество строк в нем (подробнее см. в пособии [2,3]).

2.5. Выполнение расчета и анализ полученных результатов

Запускаем программу start.bat. Вводим имя файла исходных данных (если файл назывался, например, “ns123.dat”, то вводить необходимо “ns123”), затем делаем 4 нажатия клавиши “Enter”. Про-

грамма выполнит расчет обтекания с заданными в файле исходных данных меридианными скоростями. Далее вводим опять “ns123” и делаем 7 нажатий клавиши “Enter”. Программа решит осесимметричную задачу. Еще раз вводим “ns123” и нажимаем 1 раз “Enter”. Программа покажет погрешность определения осесимметричного потока, на поверхностях которого выполнялся расчет обтекания и задаст вопрос: выполнить ли замену данных скоростей на новые. Если погрешность <1%, то отвечать можно “н” (нет), если погрешность >1%, то нужно ответить “у” (да) и проделать всю процедуру сначала.

Замечание. Файл исходных данных должен находиться в каталоге с основными программами.

В результате расчета получен файл результата расчета (“ns123.res”).

Для просмотра файла результатов расчета удобно пользоваться режимом просмотра в программе “Total commander”. Для построения графиков – открыть файл результатов “*.res” с помощью программы Microsoft Excel в кодировке “Кириллица doc”, в качестве разделителей использовать пробел!

Проанализируем полученные результаты.

Находим в файле результатов расчета таблицу “Результаты обтекания лопасти, насосный режим” (рис. 7).

	ЛТ 1	ЛТ 2	ЛТ 3	ЛТ 4	ЛТ 5	ЛТ 6	ЛТ 7
RCU ВХ	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
RCU ВЫХ	1.235	1.230	1.227	1.227	1.230	1.235	1.235
УСЛ КПД	83.905	84.276	84.491	84.490	84.258	83.970	83.941
Н ПР	1.837	1.664	1.478	1.321	1.192	1.095	1.022
Н ПР2	1.969	1.743	1.560	1.411	1.293	1.207	1.140
СИГМА	.136	.130	.132	.136	.142	.149	.154
Н ТЧК	28	28	28	28	28	28	28
Н УД	.000	.000	.000	.000	.000	.006	.078
ВЕТА БЕЗ	18.157	19.777	21.618	23.781	26.276	28.952	31.990
ВЕТА ВХ	17.020	18.890	20.453	22.149	23.954	25.691	27.569
ВЕТА ВЫХ	12.897	12.771	12.676	12.626	12.621	12.635	12.605
УР МАХ	-2.599	-2.607	-2.558	-2.464	-2.339	-2.195	-2.040
Н ТЧК	5	5	12	14	15	15	16
УР МИН	-3.299	-3.168	-3.061	-2.960	-2.868	-2.778	-2.678
Н ТЧК	28	28	28	28	28	28	28
УД МАХ	2.442	2.301	2.168	2.158	2.140	2.127	2.111
Н ТЧК	38	38	60	60	60	60	60
УД МИН	.636	.540	.467	.393	.317	.232	.161
Н ТЧК	49	49	49	48	48	47	47
Н ТЧК.УР1	3	3	3	3	3	3	3
Н ТЧК.УР2	62	62	62	62	62	62	62

Рис. 7. Таблица основных результатов расчета

Обращаем внимание на две последние строки: точки схода потока с лопасти находятся на напорной кромке (4/61, 3/62, 2/63, 1/64). В противном случае есть вероятность, что поток отрывается от лопасти, не доходя до напорной кромки.

По строке №2 можно оценить полученный напор РК.

Запишем основное уравнение гидромашин:

$$\frac{H}{\eta_r} = \frac{\omega}{g} RV_{u_{\text{ВЫХ}}} - RV_{u_{\text{ВХ}}} .$$

Так как расчет выполнялся на приведенные параметры, то данное уравнение запишется в виде:

$$\frac{1}{\eta_r} = \frac{\omega'_1}{g} RV_{u'_{\text{ВЫХ}}} - RV_{u'_{\text{ВХ}}} ,$$

где $\omega'_1 = \frac{\pi n'_1}{30} = 9,46$.

Выразим необходимое значение закрутки на выходе для обеспечения заданного напора:

$$RV_{u'_{\text{ВЫХ}}} = \frac{1}{\eta_r} \cdot \frac{g}{\omega'_1} = 1,152 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Среднее значение закрутки на выходе по результатам расчета составляет 1,231 м²/с, что превышает заданное значение 1,152 м²/с на 6,9%.

Еще проще данный факт определяется по строке №3 “УСЛ КПД”. Т.к. в файле исходных данных было заложено значение $\eta_r = 0,9$, то точное совпадение расчетного напора и заданного будет при среднем значении условного КПД = 0,9. Большие значения условного КПД будут свидетельствовать о недостатке закрутки на выходе из РК, меньшие — о ее избытке.

Обратим внимание на строки 6 и 7. Максимальное динамическое разрежение возникает в точках № 28 и изменяется от 0,136 до 0,154 от периферии к втулке соответственно.

Расчетом необходимо получить значения максимального динамического разрежения $\sigma \leq \frac{\Delta h_{\text{кр}}}{H} = 0,167$. Данное условие выполнено.

Следует отметить, что точки с максимальным динамическим разрежением должны находиться на стороне разрежения лопасти (№

точек < 28), желателно именно 28-й точки (непосредственно всасывающая кромка).

Периферийные сечения являются определяющими кавитационные качества РК и обычно имеют большие значения максимального динамического разрежения.

Профильные потери можно оценить по 5 строке “Н ПР2” результаты представлены в процентах. В нашем случае они изменяются от от 2,0% до 1,1%.

Ударные потери, представленные в строке №8 “Н УД”, отсутствуют.

Помимо ударных и профильных потерь, определенных расчетным путем, имеются и вторичные потери, обусловленные перетеканием жидкости поперек лопастного канала от стороны давления к стороне разрежения (от рабочей к тыльной поверхности лопасти) и трением жидкости об ограничивающие диски. По данным Г.Ю. Степанова [4] этот вид гидравлических потерь пропорционален профильным потерям и зависит от соотношения ширины и высоты лопастного канала.

Поточные углы на входе “ВЕТА ВХ” представлены в строке №10. Их значения должны быть меньше углов лопасти в соответствующих сечениях. В нашем примере отсутствует положительный угол атаки:

поточные углы: $18,2 - 23,8 - 32,0^\circ$;

углы лопасти: $18 - 22 - 28^\circ$,

следовательно, необходимо либо увеличить углы лопасти на входе, либо диаметр горловины.

Обращаем внимание на четвертую строку снизу. В ней представлены значения минимальных относительных скоростей вокруг лопасти. Все значения должны быть положительными. Отрицательные значения свидетельствуют об образовании зон отрыва пограничного слоя от лопасти. Желательно даже иметь запас по относительным скоростям, с тем, чтобы вихреобразование не происходило на режимах работы насоса, близких к номинальному.

В рассматриваемом примере запас по относительным скоростям во втулочном сечении очень мал, необходимо обратить внимание на законы изменения углов наклона профилей.

Ищем в файле результатов расчета таблицу “Углы наклона профилей” (рис. 8).

УГЛЫ НАКЛОНА ПРОФИЛЕЙ:							
I	ЛТ 1	ЛТ 2	ЛТ 3	ЛТ 4	ЛТ 5	ЛТ 6	ЛТ 7
1	18.000000	19.111111	20.444444	22.000002	23.777800	25.777779	28.000004
2	18.12189	19.30408	20.70685	22.33616	24.19519	26.28933	28.62342
3	18.45050	19.82536	21.41852	23.25136	25.33596	27.69295	30.34101
4	18.93962	20.60728	22.49575	24.64860	27.09112	29.86926	33.02566
5	19.54891	21.59116	23.86708	26.44661	29.37132	32.72252	36.57754
6	20.23819	22.71341	25.44842	28.54069	32.04884	36.09695	40.80468
7	20.96432	23.89700	27.12559	30.77247	34.90955	39.70434	45.31601
8	21.68042	25.04828	28.74674	32.91507	37.62904	43.08958	49.48006
9	22.33731	26.06134	30.13050	34.68780	39.79968	45.68230	52.52345
10	22.88724	26.83057	31.09382	35.80925	41.02286	46.94801	53.76469
11	23.28933	27.26932	31.49452	36.07607	41.03695	46.57517	52.85896
12	23.51542	27.32921	31.27169	35.43154	39.81535	44.59854	49.93185
13	23.55472	27.01206	30.46482	33.98637	37.57859	41.39049	45.54692
14	23.41592	26.36961	29.20130	31.97934	34.71141	37.51973	40.49954
15	23.12609	25.49112	27.65915	29.69994	31.63168	33.55161	35.52863
16	22.72687	24.48456	26.02365	27.41410	28.68211	29.90185	31.12137
17	22.26933	23.45895	24.45586	25.32275	26.08695	26.80083	27.49612
18	21.80924	22.51326	23.08056	23.55779	23.96655	24.33920	24.69447
19	21.40411	21.73398	21.99143	22.20237	22.37901	22.53709	22.68541
20	21.11302	21.20081	21.26781	21.32171	21.36616	21.40545	21.44194
21	21.00000	21.00000	21.00000	21.00000	21.00000	21.00000	21.00000

Рис. 8. Закон изменения углов наклона профилей вдоль различных ЛТ

Опытный пользователь сможет сделать для себя выводы по табличным значениям углов наклона профилей. Для начинающих рекомендуется построить зависимости изменения углов наклона профилей от углов охвата (таблица также присутствует в файле результатов расчета) по 3-5 линиям тока. Для построения зависимостей (рис. 9) удобно использовать *Microsoft Excel*.

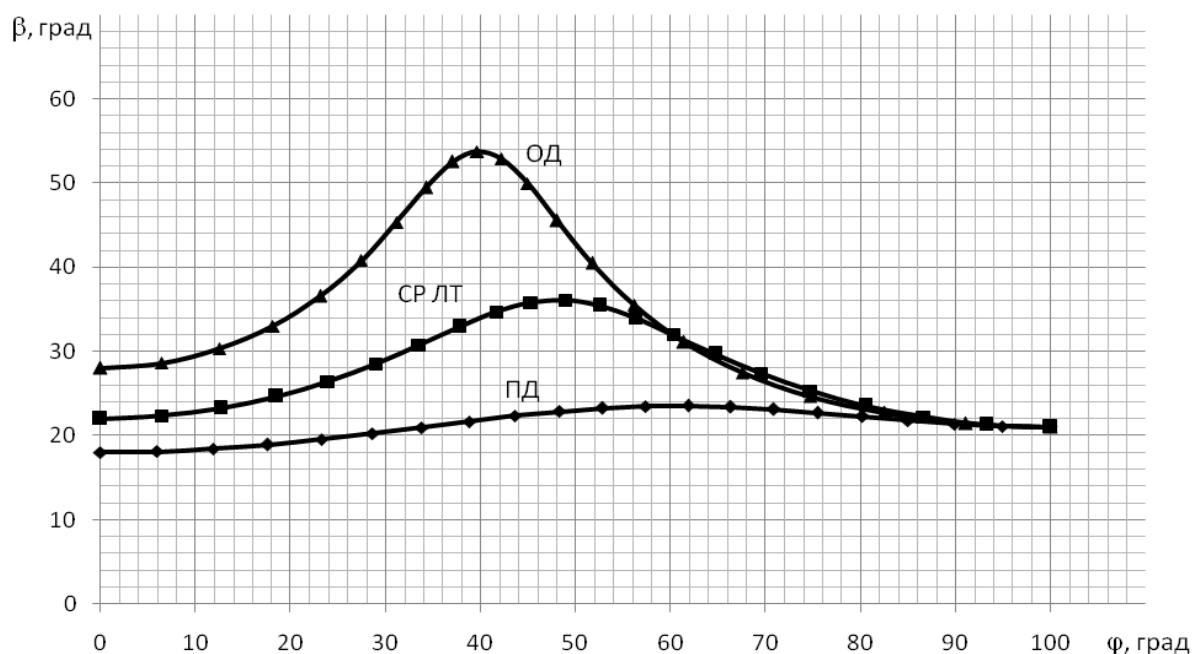


Рис. 9. Зависимость углов наклона профилей от угла охвата на различных ЛТ

Как видно из рис. 8 и 9, углы наклона профилей во втулочном сечении изменяются от 28° через 53,8° до 21°. Такой закон изменения углов наклона недопустим. Рекомендованное максимальное отличие углов наклона по линии тока 10÷15°, иначе есть вероятность отрыва пограничного слоя от лопасти и возникновения дополнительных потерь, также это может привести к ухудшению формы напорной характеристики на режимах меньших подач. Для уменьшения диффузорности втулочного и среднего сечений нужно переместить положение всасывающей кромки во втулочном сечении ближе к напорной кромке. Еще один вариант – увеличение углов охвата в данных сечениях.

По таблице “Значения D(RCU)/DS” (рис. 10) пользователь может оценить, как происходит прирост закрутки по длине лопасти. Идеальный вариант с точки зрения прочности – равномерное изменение закрутки по длине.

ЗНАЧЕНИЯ D(RCU)/DS:							
I	ЛТ 1	ЛТ 2	ЛТ 3	ЛТ 4	ЛТ 5	ЛТ 6	ЛТ 7
1	-2.77093	-1.70576	-.57919	-.16993	.13690	.27232	.36644
2	-1.15947	.14937	1.01616	1.48902	1.74371	1.81133	1.89689
3	.99671	2.25529	2.98478	3.39174	3.41756	3.34416	3.35680
4	2.36195	3.42970	4.21610	4.25345	4.14953	4.05764	4.08442
5	3.50358	4.61659	4.83727	4.64332	4.55433	4.46579	4.47678
6	5.24694	5.55539	5.29284	5.09723	4.93979	4.77733	4.71819
7	6.27061	5.91045	5.69202	5.39947	5.12075	4.87453	4.76814
8	6.64146	6.30310	5.93019	5.45806	5.09570	4.79987	4.65674
9	7.37600	6.85225	6.26209	5.64603	5.16264	4.78115	4.56444
10	7.65133	7.03601	6.49644	5.90255	5.37549	4.88213	4.53329
11	7.22311	6.86812	6.49236	6.01875	5.48792	4.97020	4.54964
12	6.82110	6.71940	6.44909	6.01803	5.47128	4.98715	4.56335
13	6.69201	6.70933	6.49750	6.06240	5.54330	5.00827	4.53389
14	6.64426	6.69275	6.52665	6.14429	5.67242	5.13519	4.63748
15	6.76768	6.80939	6.65283	6.31279	5.90279	5.44634	4.99514
16	7.02343	7.04765	6.90236	6.60660	6.25447	5.86363	5.47048
17	7.31672	7.30613	7.17073	6.93358	6.65323	6.34962	6.02477
18	7.73160	7.66235	7.52917	7.35795	7.17021	6.97659	6.74832
19	8.26432	8.11183	7.97629	7.88433	7.80877	7.75142	7.64565
20	8.91416	8.65501	8.51444	8.51503	8.57136	8.67377	8.71315
21	9.44881	9.13362	9.01852	9.10992	9.27856	9.50480	9.66099

Рис. 10. Значения D(RCU)/DS по линиям тока

Во втором приближении было решено изменить радиальную координату всасывающей кромки на основном диске и задать 0,23 вместо 0,215. Из-за того, что всасывающая кромка будет проходить выше, поточные углы во втулочном и среднем сечении должны стать меньше.

В результате проведения нескольких расчетов по сравнению с первоначальным вариантом произошли следующие изменения:

- координата всасывающей кромки на основном диске 0,23 вместо 0,215;

- углы наклона профилей на всасывании 19° – 23° – 26° вместо 18° – 22° – 28° .

Рассмотрим основные результаты расчета (рис. 11–12).

Положительные изменения – увеличение запаса по значениям относительных скоростей (как следствие уменьшения диффузорности втулочного и среднего сечений) и наличие положительного угла атаки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБТЕКАНИЯ ЛОПАСТИ, НАСОСНЫЙ РЕЖИМ							
	ЛТ 1	ЛТ 2	ЛТ 3	ЛТ 4	ЛТ 5	ЛТ 6	ЛТ 7
RCU ВХ	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
RCU ВЫХ	1.203	1.210	1.216	1.217	1.217	1.214	1.213
УСЛ КПД	86.170	85.659	85.264	85.155	85.196	85.362	85.436
Н ПР	1.755	1.694	1.598	1.464	1.337	1.224	1.140
Н ПР2	2.014	1.866	1.743	1.628	1.529	1.450	1.379
СИГМА	.140	.144	.148	.152	.156	.157	.154
Н ТЧК	28	28	28	28	28	28	28
Н УД	.000	.000	.000	.002	.098	.394	.711
ВЕТА БЕЗ	18.329	20.558	22.630	24.458	26.051	27.648	29.302
ВЕТА ВХ	15.826	18.395	20.420	21.479	22.035	22.163	22.485
ВЕТА ВЫХ	12.467	12.531	12.558	12.535	12.488	12.420	12.371
УР МАХ	-2.695	-2.671	-2.655	-2.648	-2.645	-2.585	-2.500
Н ТЧК	5	5	5	5	5	15	16
УР МИН	-3.311	-3.209	-3.127	-3.051	-2.982	-2.902	-2.803
Н ТЧК	28	28	28	28	28	28	28
УД МАХ	2.408	2.285	2.196	2.191	2.189	2.190	2.187
Н ТЧК	38	38	60	60	60	60	60
УД МИН	.790	.763	.733	.710	.685	.665	.626
Н ТЧК	50	50	50	50	49	49	48
Н ТЧК.УР1	3	3	3	3	3	3	3
Н ТЧК.УР2	62	62	62	62	62	62	62

Рис. 11. Таблица основных результатов расчета

УГЛЫ НАКЛОНА ПРОФИЛЕЙ:							
I	ЛТ 1	ЛТ 2	ЛТ 3	ЛТ 4	ЛТ 5	ЛТ 6	ЛТ 7
1	19.000000	20.444444	21.777778	23.000000	24.111111	25.111112	25.999999
2	19.09155	20.52943	21.87102	23.11706	24.26270	25.30655	26.25015
3	19.33637	20.75381	22.11446	23.42112	24.65651	25.81602	26.90656
4	19.69571	21.07711	22.45970	23.84948	25.21198	26.53939	27.84870
5	20.13509	21.46290	22.86292	24.34476	25.85455	27.38282	28.96242
6	20.62133	21.87655	23.28240	24.85143	26.51002	28.24945	30.12428
7	21.12130	22.28459	23.67811	25.31546	27.10410	29.03810	31.19778
8	21.60189	22.65513	24.01291	25.68651	27.56595	29.64898	32.04166
9	22.03124	22.95944	24.25469	25.92174	27.83514	29.99520	32.52830
10	22.38078	23.17392	24.37906	25.99040	27.86943	30.01635	32.56768
11	22.62785	23.28225	24.37191	25.87761	27.65140	29.69000	32.12747
12	22.75818	23.27710	24.23092	25.58636	27.19110	29.03592	31.24086
13	22.76768	23.16099	23.96577	25.13681	26.52401	28.11163	29.99797
14	22.66316	22.94604	23.59697	24.56330	25.70464	27.00032	28.52426
15	22.46163	22.65276	23.15345	23.90962	24.79799	25.79592	26.95463
16	22.18870	22.30811	22.66972	23.22419	23.87130	24.58979	25.41237
17	21.87635	21.94352	22.18327	22.55608	22.98824	23.46257	23.99817
18	21.56078	21.59312	21.73274	21.95283	22.20645	22.48199	22.78934
19	21.28102	21.29292	21.35735	21.46036	21.57858	21.70601	21.84682
20	21.07878	21.08113	21.09797	21.12531	21.15664	21.19028	21.22723
21	21.000000	21.000000	21.000000	21.000000	21.000000	21.000000	21.000000

Рис. 12. Закон изменения углов наклона профилей вдоль различных ЛТ

Таким образом, спроектированное рабочее колесо соответствует требованиям технического задания.

Варьированием коэффициентов K_{20} , K_{40} , K_{50} , K_{60} можно влиять на законы изменения углов наклона лопасти. Рекомендуемые значения коэффициентов K_{20} , K_{40} (-1...1), K_{50} , K_{60} (-3...3). На **рис. 13** представлены зависимости углов наклона лопасти в периферийном сечении от углов охвата исходного варианта (K_{20} , K_{40} , K_{50} , $K_{60} = 0$) и варианта (K_{20} , K_{40} , $K_{50} = 0$, $K_{60} = -2$).

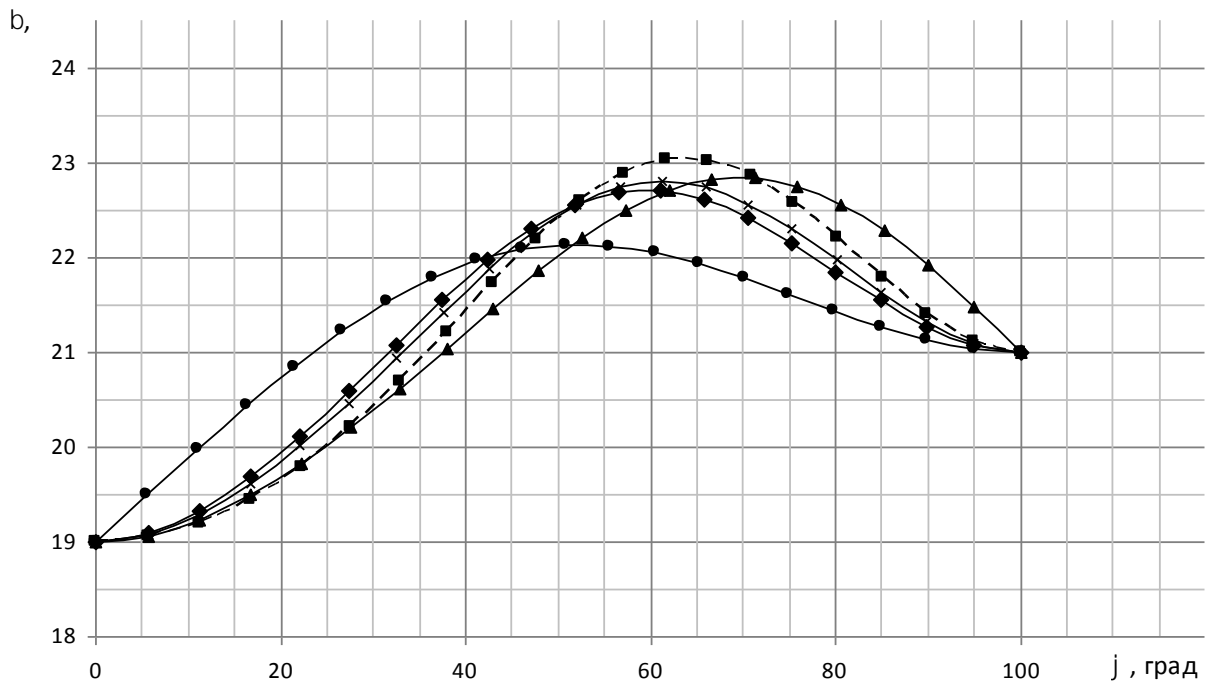


Рис. 13. Влияние коэффициентов K_{20} , K_{40} , K_{50} , K_{60} на закон изменения углов наклона лопасти:

- ◆ - исходный вариант (K_{20} , K_{40} , K_{50} , $K_{60} = 0$);
- ▲ – положительный коэффициент K_{20} на напорной кромке ($K_{20}=0,5$; K_{40} , K_{50} , $K_{60}=0$);
- – отрицательный коэффициент на всасывающей кромке ($K_{40}=-0,5$; K_{20} , K_{50} , $K_{60}=0$);
- × - отрицательный коэффициент K_{50} ($K_{50} = -2,0$; K_{20} , K_{40} , $K_{60}=0$);
- - отрицательный коэффициент K_{60} ($K_{60} = -2,0$; K_{20} , K_{40} , $K_{50}=0$)

Представленные варианты не дали ощутимых различий по величине профильных потерь. При этом вариант с коэффициентом $K_{40} = -0,5$ имеет больший запас по минимальным относительным скоростям.

Ощутимого влияния данных коэффициентов на кавитационные качества РК данного типа (большая втулка $\bar{d}_{\text{вт}} = 0,43$, прямая всасывающая кромка) не обнаружено.

После проведения расчета для номинального режима работы необходимо провести расчеты на режимах $0,8...1,2 Q_{\text{НОМ}}$. Для этого в исходных данных необходимо изменить величину приведенного расхода и повторять цикл расчета до момента, когда погрешность определения осесимметричного потока будет $< 1\%$.

Иллюстрацией результатов расчета должна быть расчетная характеристика РК, на которой представлены зависимости теоретического напора РК, профильных потерь, ударных потерь, суммарных гидравлических потерь и кавитационного запаса РК в зависимости от подачи. Пример характеристики представлен на **рис. 14**.

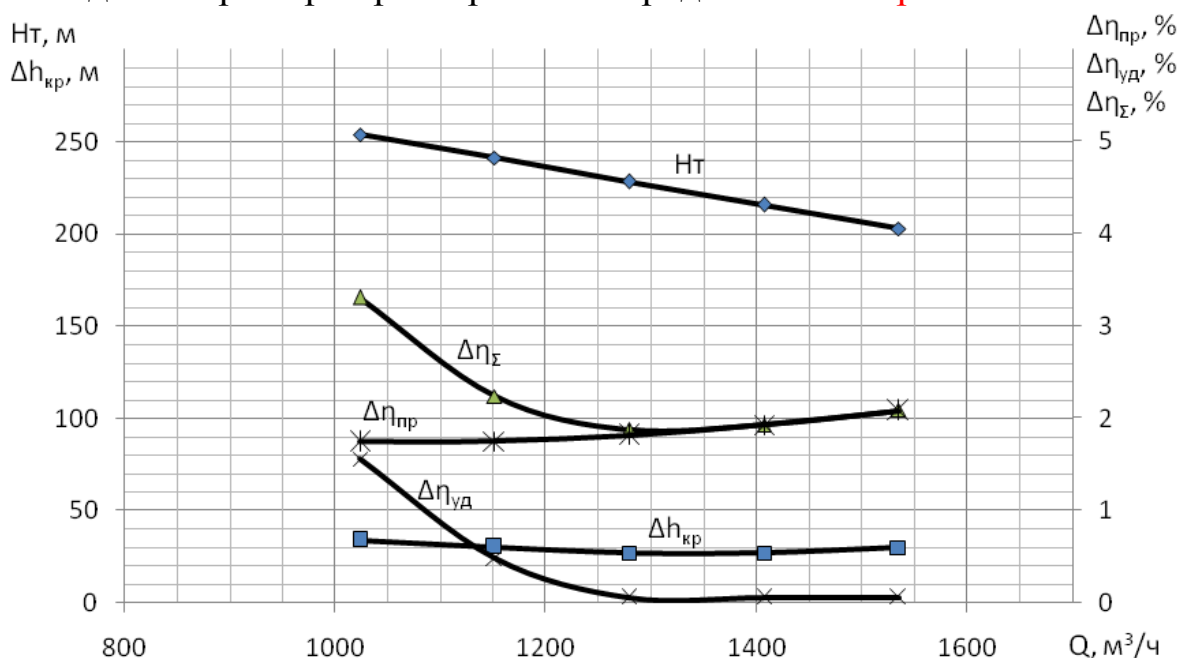


Рис. 14. Пример расчетной характеристики РК

Теоретический напор определяется из основного уравнения гидромашин:

$$H_T = \frac{\omega}{g} \left(RV_{u,\text{ср}}'_{\text{ВЫХ}} - RV_{u,\text{ср}}'_{\text{ВХ}} \right) H,$$

где H – значение напора по ТЗ (напора, по которому определялись n'_1 и Q'_1).

Величина критического кавитационного запаса $\Delta h_{кр}$ определяется по максимальному динамическому разрежению σ по формуле:

$$\Delta h_{кр} = \sigma_{\max} \cdot H.$$

Значения профильных и ударных потерь осредняются по всем линиям тока.

С помощью программы VIZ_SKTI.exe можно просмотреть меридианную проекцию РК и его лопастную систему в плане.

Если после завершения цикла расчета просчитать файл исходных данных по программе gsmma1.exe, то появляется возможность просмотреть эпюры давлений и относительных скоростей вокруг лопасти с помощью программы VIZ_1-5.exe или после некоторой обработки в Microsoft Excel. При этом следует учитывать, что программа выдает приведенное давление $p = \frac{p'}{\gamma \cdot H}$ на профиле (p' - избыточное давление, γ - удельный вес жидкости, H – напор).

В файле результатов расчета также имеются значения густоты решеток и углов наклона вектора абсолютной скорости потока на выходе из РК на различных поверхностях тока.

3. Направляющий аппарат

3.1. Основные параметры

В последнее время даже при небольших углах выхода потока из РК ($\alpha_2 = 8...12^\circ$) используют отводящие устройства (ОУ) в составе: лопаточный диффузор (ЛД), переводной канал (ПК), обратный направляющий аппарат (ОНА) (ЛД+ПК+ОНА). Такие ОУ, в связи с их простой формой, могут быть полностью обработаны с высокой степенью чистоты на обычном фрезерном оборудовании, что позволяет сократить гидравлические потери в них.

Основными геометрическими параметрами при построении лопаточного диффузора направляющего аппарата (НА) являются:

D_3 — диаметр входа в ЛД;

D_4 — диаметр выхода из ЛД;

b_3 — ширина ЛД;

$z_{на}$ — количество лопаток НА;

$\alpha_{диф}$ — угол раскрытия диффузорного участка НА;

$\alpha_{л3}$ — угол наклона входной кромки лопатки НА.

Диаметр входа в НА выбирается в пределах $D_3 = 1,03...1,1 D_2$. Увеличение радиального зазора позволяет снизить пульсации давления, однако при большом отношении D_3 / D_2 увеличиваются гидравлические потери. Исследования величины зазора между РК и отводом, выполненные на кафедре «Гидромашиностроения» СПбГПУ и ОАО «Пролетарский завод» для ступеней питательных насосов (ПН) с направляющим аппаратом канального типа (МКО) при $n_s = 90...100$, показали, что оптимальным является зазор 3%:

$$D_3 = 1,03D_2.$$

Ширина ЛД в многоступенчатых насосах выбирается $b_3 \approx 1,03b_2$.

Диаметр выхода из ЛД выбирается в пределах $D_4 = 1,35...1,45 D_2$ для промежуточных ступеней и $D_4 = 1,45...1,55 D_2$ для концевых ступеней.

Количество лопаток направляющего аппарата (НА) можно варьировать, добиваясь лучших гидравлических показателей. С целью обеспечения удовлетворительных вибрационных показателей насоса, количество лопаток НА не должно быть кратным числу лопастей РК.

Величина проходного сечения $a_{3г}$ определяется из условий обеспечения расчетного значения скорости в горловине отвода $V_{3г}$:

$$V_{3г} = K_c \cdot \sqrt{2gH_i},$$

где $K_c = 1,69 \cdot n_s^{-0,32}$. Тогда ширина на входе в диффузорный канал НА:

$$a_{3г} = \frac{Q}{z_{на} b_3 V_{3г}}.$$

Угол раскрытия канала диффузора обычно принимается $\alpha_{диф} = 10^\circ$, но его можно варьировать и добиваться минимальных гидравлических потерь.

Значение угла установки входной кромки лопатки $\alpha_{л3}$ в НА определяется из условия безударного натекания:

$$\alpha_{л3} \approx \arctg\left(\frac{b_2}{b_3} \operatorname{tg}\alpha_2\right) - \frac{\alpha_{диф}}{2}.$$

Последовательность построения ЛД НА следующая. Сначала строим две концентрические окружности с диаметром D_3 и D_4 . Далее строим окружность диаметром, равным толщине кромки лопатки на

входе. От центра этой окружности проводим линию, перпендикулярную направлению потока (под углом $\alpha_{лз} + \alpha_{диф} / 2 + 90^\circ$). Далее вычерчиваем окружность диаметром a_0 так, чтобы ее центр лежал на этой линии, а сама окружность касалась входной кромки лопатки. Из ее центра проводим линию под углом $\alpha_{лз} + \alpha_{диф} / 2$. Таким образом, получаем среднюю линию канала между лопатками НА. Проводим касательную к верхней части окружности под углом $\alpha_{лз} + \alpha_{диф}$. В результате вышеперечисленных построений получаем одну из стенок прямолинейного диффузорного участка с углом раскрытия $\alpha_{диф}$ и положение входной и выходной кромок. При построении криволинейных стенок, дополняющих профиль лопатки НА, стремятся осуществить плавный переход от криволинейного участка направляющего аппарата к следующему за ним прямолинейному участку диффузора (рис. 15).

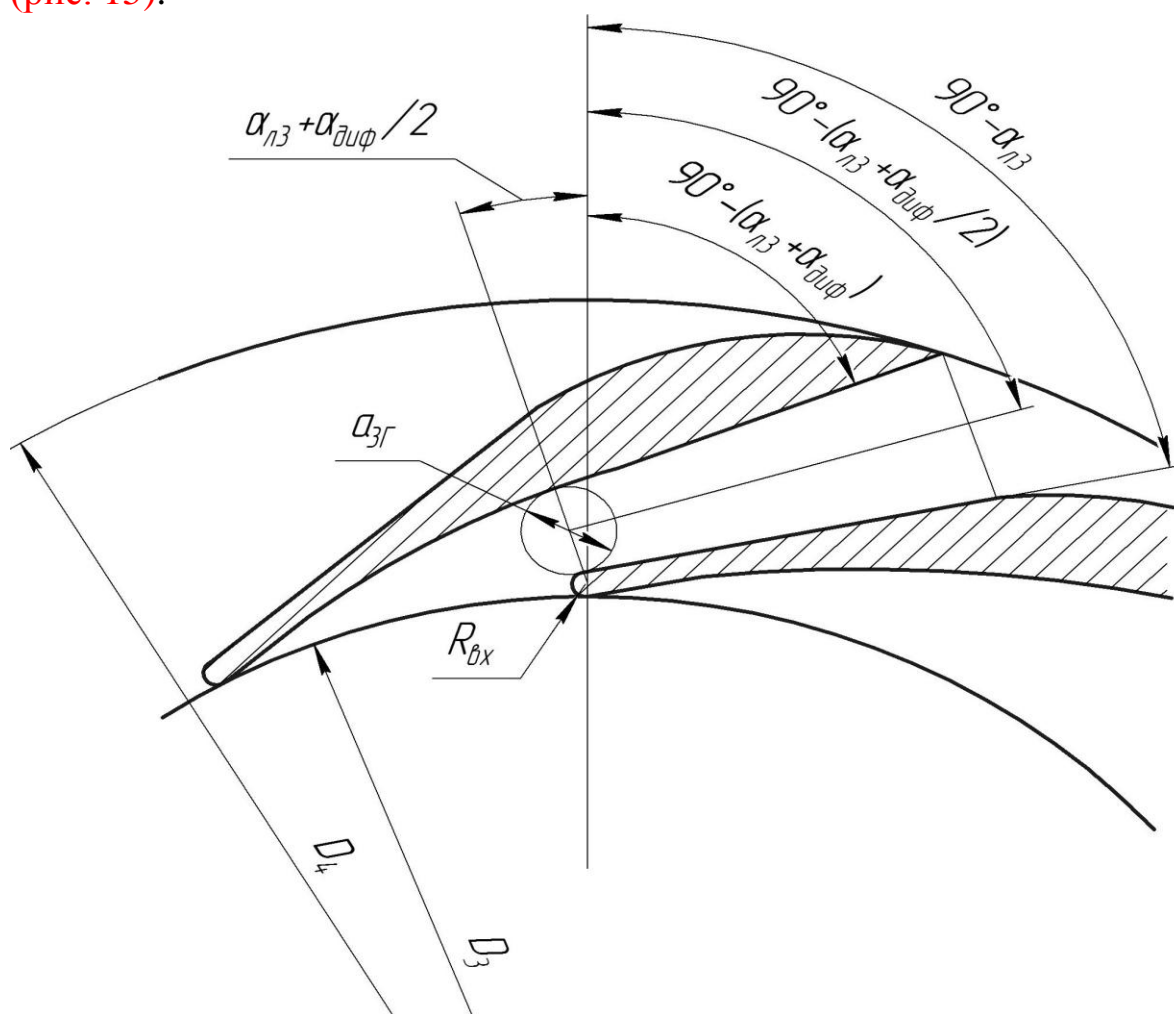


Рис. 15. Лопатки направляющего аппарата

3.2. Методика автоматизированного проектирования направляющего аппарата канального типа

Строим четыре окружности (рис.16).

Наружный и внутренний диаметры НА описываются уравнениями:

$$1) D_3^2 = 4 x^2 + y^2$$

$$2) D_4^2 = 4 x^2 + y^2$$

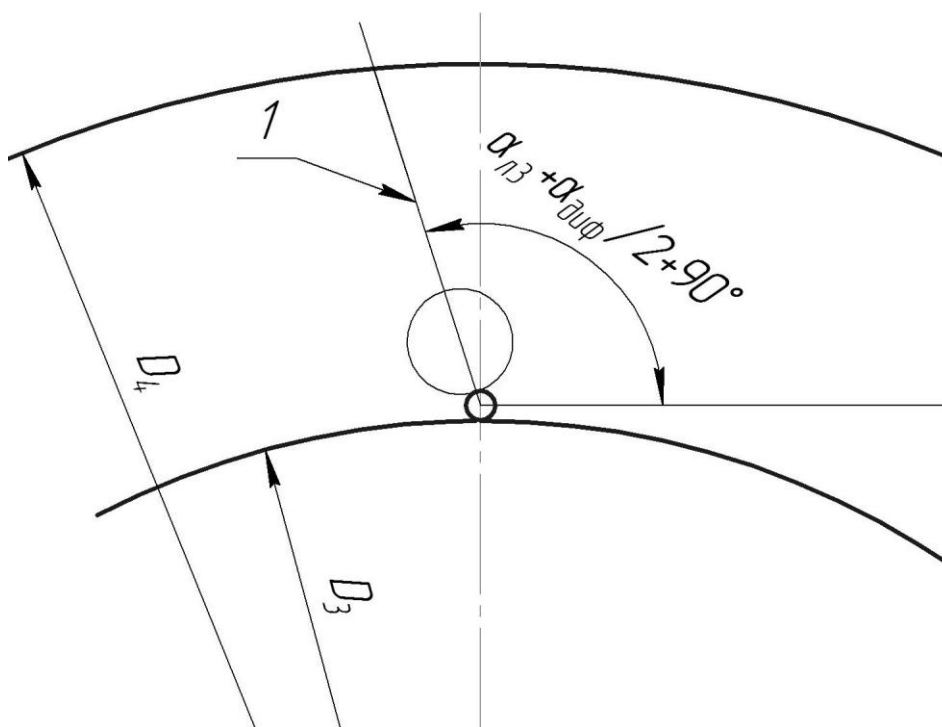


Рис. 16. Построение входного участка НА

Входная кромка:

$$3) r_{л1}^2 = x^2 + \left(y - \frac{D_3}{2} - r_{л1} \right)^2.$$

Тогда координаты центра входной кромки $x_1, y_1 = \left(0; \frac{D_3}{2} + r_{л1} \right)$.

Уравнение прямой (1), на которой лежит центр окружности проходного сечения:

$$y = \operatorname{tg} \left(\alpha_{лз} + 90^\circ + \frac{\alpha_{диф}}{2} \right) x + \left(\frac{D_3}{2} + r_{л1} \right). \quad (1)$$

Уравнение окружности проходного сечения (с диаметром $a_{3Г}$):

$$\frac{a_{3Г}^2}{4} = \left[x + \left(\frac{a_{3Г}}{2} + r_{л1} \right) \sin \left(\alpha_{л3} + \frac{\alpha_{диф}}{2} \right) \right]^2 + \left[y - \frac{D_3}{2} - r_{л1} - \left(\frac{a_{3Г}}{2} + r_{л1} \right) \cos \left(\alpha_{л3} + \frac{\alpha_{диф}}{2} \right) \right]^2.$$

Координаты центра окружности $x_2; y_2$ находятся по формулам:

$$x_2 = \left(\frac{a_{3Г}}{2} + r_{л1} \right) \cos \left(90^\circ + \frac{\alpha_{диф}}{2} + \alpha_{л3} \right);$$

$$y_2 = \left(\frac{a_{3Г}}{2} + r_{л1} \right) \sin \left(90^\circ + \frac{\alpha_{диф}}{2} + \alpha_{л3} \right) + y_1.$$

Построение вогнутой поверхности лопатки.

Прямолинейный участок:

Проводим касательную (2) к окружности проходного сечения под углом $\alpha + \alpha_{диф}$, (рис. 17).

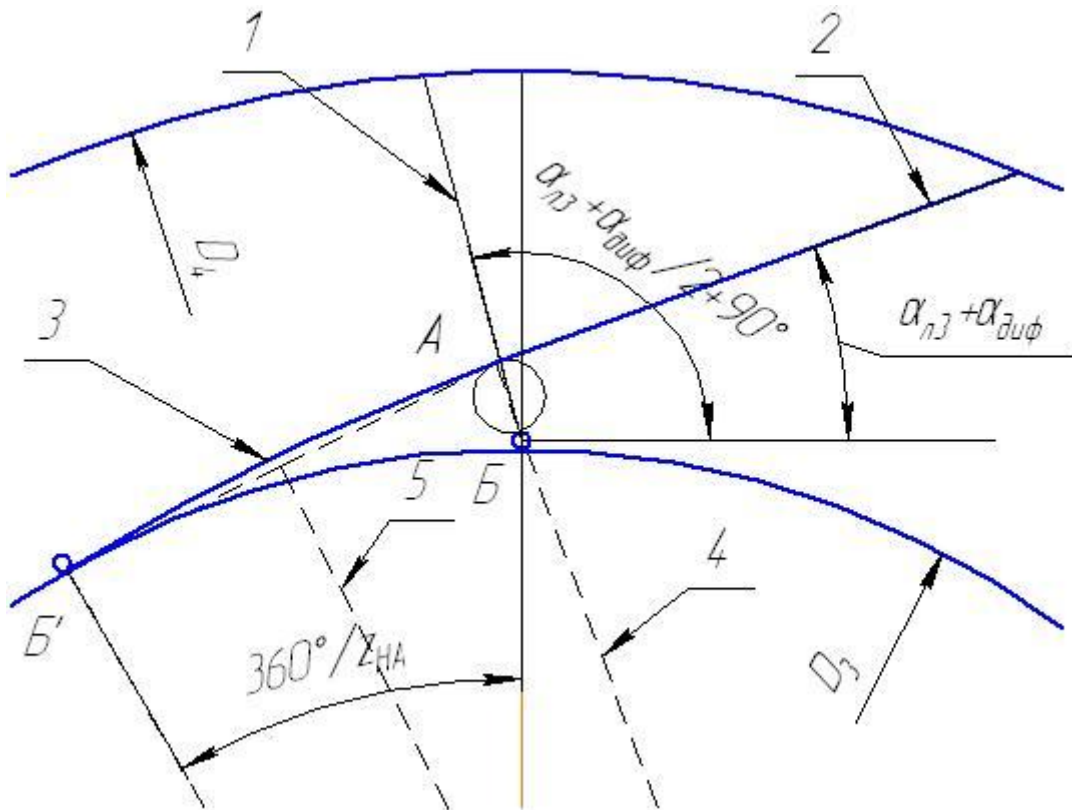


Рис. 17. Построение вогнутой поверхности лопатки

Найдем точку касания $A(x_A; y_A)$:

$$x_A = \left[x_2 + \frac{a_{3Г}}{2} \cdot \cos \alpha_{л3} + 90^\circ + \alpha_{диф} \right];$$

$$y_A = \left[y_2 + \frac{a_{3Г}}{2} \cdot \sin \alpha_{л3} + 90^\circ + \alpha_{диф} \right].$$

Уравнение касательной:

$$y = \operatorname{tg} \alpha_{л3} + \alpha_{диф} x + \operatorname{tg} \alpha_{л3} + \alpha_{диф} x_A + y_A. \quad (2)$$

Криволинейный участок:

Пусть точка Б – точка касания окружности входной кромки и окружности диаметром D_3 имеет координаты $(0; D_3 / 2)$.

Получим точку Б' поворотом точки Б против часовой стрелки на угол $(360^\circ / z_{на})$ относительно центра системы координат.

Тогда точка Б' будет иметь координаты $(-\sin(360^\circ / z_{на}) \cdot D_3 / 2; \cos(360^\circ / z_{на}) \cdot D_3 / 2)$. Соединим точку А и точку Б' дугой (3).

Центр дуги найдем как пересечение двух прямых (4) и (5): уравнение прямой перпендикулярной касательной (2), проходящей через точку А

$$y = \operatorname{tg} \alpha_{л3} + 90^\circ + \alpha_{диф} x + \operatorname{tg} \alpha_{л3} + 90^\circ + \alpha_{диф} x_A + y_A. \quad (4)$$

Прямая, перпендикулярная хорде АБ' и проходящая через ее середину

$$y = -\frac{x_A - x_{Б'}}{y_A - y_{Б'}} \cdot x + \left[-\frac{x_A - x_{Б'}}{y_A - y_{Б'}} \cdot \frac{1}{2} x_{Б'} + x_A + \frac{1}{2} (y_{Б'} + y_A) \right]. \quad (5)$$

Пусть $(x_3; y_3)$ – координаты середины отрезка АБ

$$x_3 = (x_{Б'} + x_A) \cdot \frac{1}{2}, \quad y_3 = (y_{Б'} + y_A) \cdot \frac{1}{2},$$

$$k1 = \operatorname{tg} \alpha_{л3} + 90^\circ + \alpha_{диф} \quad \text{и} \quad k2 = -\frac{x_A - x_{Б'}}{y_A - y_{Б'}}.$$

Тогда координаты центра дуги $(x_{ц}; y_{ц})$ находятся из выражений:

$$x_{ц} = \frac{[y_{ц} + x_{ц} \cdot (-k2) - y_A - x_A \cdot (-k1)]}{(k1 - k2)};$$

$$y_{ц} = k1 \cdot x_{ц} + y_A + x_A \cdot (-k1).$$

Выходная кромка:

Центр окружности радиусом r_2 лежит в точке В, которая находится из решения системы уравнений (6) и (7):

Уравнение окружности

$$\left(\frac{D_4}{2} - r_{л2}\right)^2 = x^2 + y^2 \quad (6)$$

Уравнение прямой, параллельной касательной (2)

$$y = \operatorname{tg} \alpha_{л3} + \alpha_{диф} x + \operatorname{tg} \alpha_{л3} + \alpha_{диф} x_A + y_A + \frac{r_{л2}}{\cos \alpha_{л3} + \alpha_{диф}}. \quad (7)$$

Точку В ($x_B; y_B$) находим решив квадратное уравнение:

$$k = \operatorname{tg} \alpha_{л3} + \alpha_{диф}, \quad b = y_A + \frac{r_{л2}}{\cos \alpha_{л3} + \alpha_{диф}} - x_A \operatorname{tg} \alpha_{л3} + \alpha_{диф},$$

тогда

$$D = 2kb^2 - 4k^2 + 1 \left(b^2 - \left(\frac{D_4}{2} - r_{л2} \right)^2 \right);$$

$$x_B = \frac{-2kb + D^{0,5}}{2(k^2 + 1)}; \quad y_B = kx_B + b.$$

Рисуем окружность радиусом $r_{л2}$ (рис. 18):

$$r_{л2}^2 = (x - x_B)^2 + (y - y_B)^2,$$

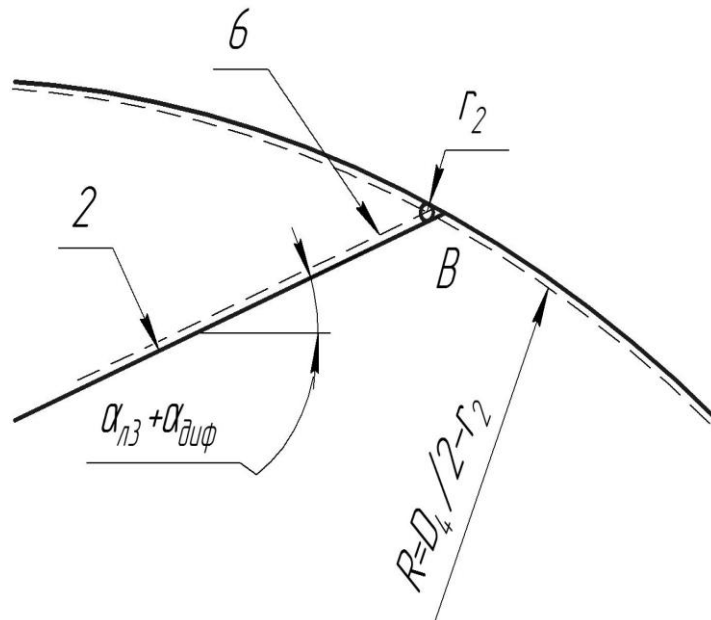


Рис. 18. Выходная кромка

Построение выпуклой стороны лопатки.

Прямолинейный участок тыльной стороны лопатки СД получается поворотом отрезка С'Д' относительно центра на угол $360^\circ / z_{\text{на}}$ (рис. 19).

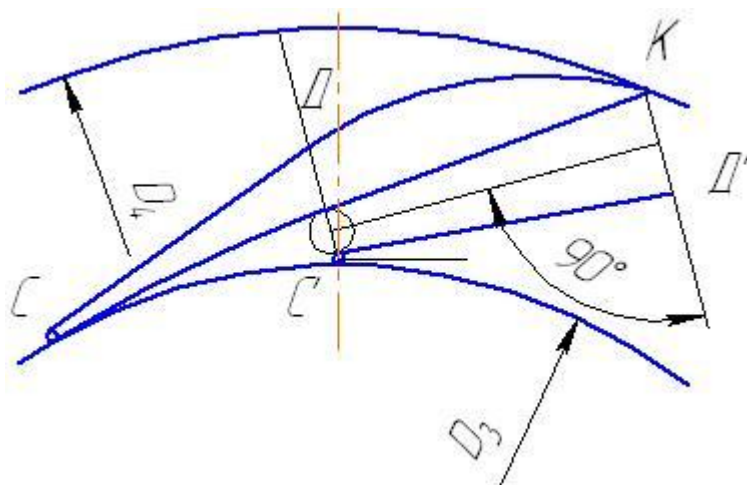


Рис. 19. Построение выпуклой стороны лопатки НА

Координаты точки С' находятся из выражений:

$$x_{C'} = x_1 - r_{л1} \sin \alpha_{л3} ;$$

$$y_{C'} = y_1 + r_{л1} \cos \alpha_{л3} .$$

После поворота точки С' имеем точку С с координатами $x_C; y_C$.

Определим точку Д' (конец прямолинейного участка на тыльной стороне лопатки) пересечением прямой (7) и прямой (8).

Уравнение прямой прямолинейного участка тыльной стороны лопатки

$$y = x \operatorname{tg} \alpha_{л3} + \left(\frac{D_3}{2} + r_{л1} + \frac{r_{л1}}{\cos \alpha_{л3}} \right); \quad (7)$$

$$y = x \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_{л3} + 90^\circ + \alpha_{\text{диф}}}{2} \right) - x_B \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_{л3} + 90^\circ + \alpha_{\text{диф}}}{2} \right) + y_B \quad (8)$$

После решения системы уравнений имеем точку Д' $x_{Д'}; y_{Д'}$:

$$x_{Д'} = \frac{-x_{В} \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_{Л3} + 90^\circ + \alpha_{\text{диф}}}{2} \right) + y_{В} - \left(\frac{D_3}{2} + r_{Л1} + \frac{r_{Л1}}{\cos \alpha_{Л3}} \right)}{\operatorname{tg} \alpha_{Л3} - \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_{Л3} + 90^\circ + \alpha_{\text{диф}}}{2} \right)};$$

$$y_{Д'} = x_{Д'} \operatorname{tg} \alpha_{Л3} + \left(\frac{D_3}{2} + r_{Л1} + \frac{r_{Л1}}{\cos \alpha_{Л3}} \right).$$

После поворота точки Д' имеем точку Д с координатами $x_{Д}; y_{Д}$. Соединяем отрезком точки С и Д и получаем прямолинейную часть выпуклой стороны лопатки.

Найдем точку К касания двух окружностей:

$$D_4^2 = 4x^2 + y^2;$$

$$r_2^2 = (x - x_{В})^2 + (y - y_{В})^2.$$

$$x_{К} = \frac{D_4}{2} \cos \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{y_{В}}{x_{В}} \right) \right);$$

$$y_{К} = \frac{D_4}{2} \cdot \sin \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{y_{В}}{x_{В}} \right) \right).$$

Криволинейный участок ДК получаем одним радиусом, центр которого точку М находим из системы уравнений:

а) прямой, перпендикулярной хорде ДК, проходящей через ее середину:

$$y = -\frac{x_{К} - x_{Д}}{y_{К} - y_{Д}} x + \left(\frac{x_{К} - x_{Д}}{y_{К} - y_{Д}} \cdot \frac{x_{К} + x_{Д}}{2} + \frac{y_{К} + y_{Д}}{2} \right); \quad (9)$$

б) перпендикуляра к отрезку СД, проходящего через точку Д:

$$y = -\frac{x_{Д} - x_{С}}{y_{Д} - y_{С}} x + \left(\frac{x_{Д} - x_{С}}{y_{Д} - y_{С}} x_{Д} + y_{Д} \right). \quad (10)$$

После решения системы уравнений имеем точку М $x_{М}; y_{М}$.

$$x_{М} = \frac{\left(\frac{x_{К} - x_{Д}}{y_{К} - y_{Д}} \cdot \frac{x_{К} + x_{Д}}{2} + \frac{y_{К} + y_{Д}}{2} \right) - \left(\frac{x_{Д} - x_{С}}{y_{Д} - y_{С}} x_{Д} + y_{Д} \right)}{\frac{x_{Д} - x_{С}}{y_{Д} - y_{С}} - \frac{x_{К} - x_{Д}}{y_{К} - y_{Д}}};$$

$$y_M = -\frac{x_D - x_C}{y_D - y_C} x_M + \left(\frac{x_D - x_C}{y_D - y_C} x_D + y_D \right).$$

Соединяем точки Д и К дугой с центром в точке М.

Таким образом, мы получили лопатку НА. Поворачивая ее на угол $360^\circ / z_{\text{на}}$ $z_{\text{на}} - 1$ раз получим круговую решетку лопаток НА.

При реализации данного алгоритма на ПК желательно иметь возможность корректировки радиусов дуг АВ и ДК.

Для визуальной оценки и расчета обтекания решетки НА можно воспользоваться программой NАproject.exe (рис. 20), которая помогает создать файл исходных данных для дальнейшего расчета по программе gsmkw.exe.

Принимаем следующие параметры НА:

$$D_3 = 340 \text{ мм} \quad \bar{D}_3 = 1,0303 ; \quad D_4 = 460 \text{ мм} \quad \bar{D}_4 = 1,394 ;$$

$$b_3 = 30 \text{ мм} \quad \bar{b}_3 = 0,0909 ; \quad z_{\text{на}} = 12;$$

$$\alpha_{\text{диф}} = 10^\circ; \quad \alpha_{\text{л3}} \approx \arctg\left(\frac{29}{30} \text{tg} 14,5^\circ\right) - \frac{10}{2} = 9^\circ.$$

С учетом стеснения потока лопатками НА принимаем угол наклона лопатки направляющего аппарата на входе $\alpha_{\text{л3}} = 10^\circ$.

$$K_c = 1,69 \cdot 123^{-0,32} = 0,362;$$

$$V_{3r} = 0,362 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 30} = 8,78 \text{ м/с};$$

$$a_{3r} = \frac{0,083}{12 \cdot 0,03 \cdot 8,78} = 0,026 \text{ м} = 26 \text{ мм}.$$

Для занесения геометрии НА для расчета обтекания необходимо воспользоваться программой «Проектирование лопаточного аппарата центробежного насоса» (рис. 20).

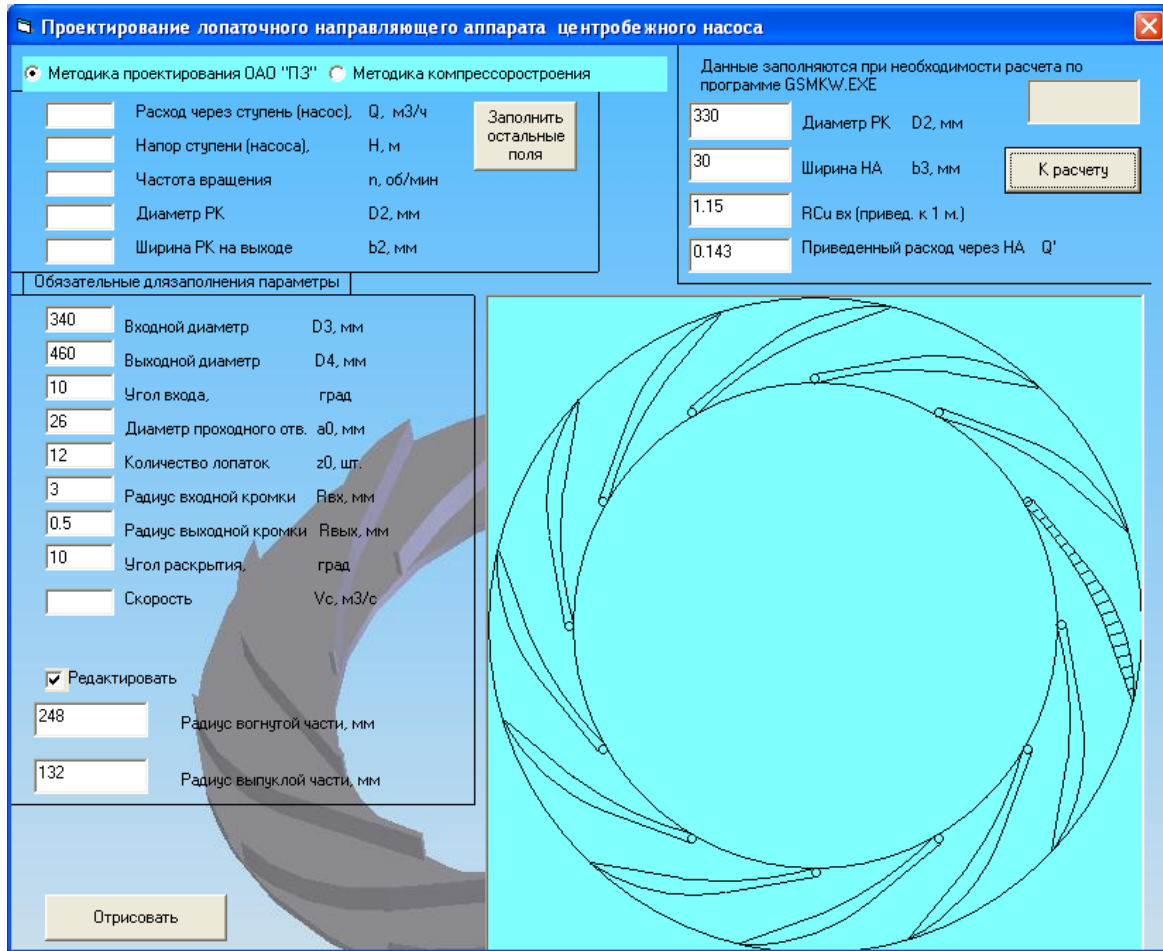


Рис. 20. Программа-оболочка для создания файла исходных данных

После выбора основных параметров НА прорисовываем решетку, нажав на кнопку «Отрисовать». При необходимости корректируем радиусы сопряжений лопаток.

Выполняем расчет исходного файла по программе «gsmkw.exe».

4. Переходной канал

Переходной канал должен обеспечивать подвод жидкости от НА к ОНА без резких локальных изменений меридианных скоростей, т.е. должно выполняться условие

$$V_{m4-5} = V_{m4},$$

где V_{m4-5} – меридианная скорость в переходном канале

$$V_{m4-5} = \frac{4Q}{\pi (D_{4\max}^2 - D_{4\min}^2)};$$

V_{m4} – меридианная скорость на выходе из НА

$$V_{m4} = \frac{Q}{\pi D_4 b_3}.$$

5. Обратный направляющий аппарат

Относительный диаметр на входе в решеточный обратный направляющий аппарат (ОНА) принимается в пределах: $D_5 / D_4 = 0,95 \dots 1,05$. Угол лопатки ОНА на входе определяется из условия безударного натекания. Течение в безлопаточном кольцевом пространстве при отсутствии трения происходит при постоянном моменте количества движения rV_u . Но так как в действительности трение уменьшает момент количества движения, т.е. увеличивает угол, то лучше угол натекания в обратный канал принимать несколько большим, чем угол α_4 . Угол лопатки ОНА на выходе принимается 90° или несколько большим для обеспечения осевого подвода потока к следующей ступени насоса. Величина проходного сечения канала ОНА должна быть постоянной, или незначительно уменьшаться от входа к выходу. Выходная кромка ОНА обрабатывается для обеспечения плавного схода потока с лопаток.

Решетку лопаток ОНА можно спроектировать с использованием средств комплекса программ САПР ЛС. Сначала выбираются основные параметры ОНА:

$$D_5, b_5, \alpha_{л5}, D_6, b_6, \alpha_{л6}, z_{она}.$$

Затем задается угол охвата лопаток ОНА φ .

Варьируя числом лопастей z , углом охвата φ и законом изменения толщины профиля $\delta(r)$ лопаток можно получать решетки ОНА различной густоты и формы, оценивать их гидравлические качества, закрутку и угол потока на выходе из ОНА и выбирать оптимальный вариант решетки.

Исходные данные по геометрии ОНА, толщинам лопаток и данные для расчета обтекания решетки ОНА для ступени питательного насоса приведены на [рис. 21](#). Пример лопаточной системы ОНА, соответствующий этим данным, приведен на [рис. 22](#).

Расчет ОНА с помощью программного комплекса ЦКТИ осуществляется как заторможенной турбины, поэтому в первой строке первую позицию занимает “0”, а в пятой строке значение $n'_1 = 0$. Расчет

производится в рамках равноскоростного потока, чему соответствует “0” на 7 позиции в первой строке.

В шестой строке задается приведенное значение закрутки перед ОНА. В седьмой строке значения должны быть меньше соответствующих в шестой строке. Значение закрутки за лопатками ОНА определяется по результатам расчета обтекания.

Остальные параметры задаются аналогично исходным данным для расчета РК.

Приведенное значение ширины канала \bar{b}_4 задается во второй позиции 11 строки. Координаты напорной и всасывающей кромок задаются в 15 строке.

Углы лопатки на входе и выходе задаются в 17 и 18 строках соответственно. Углы охвата – в 23 строке.

```

0 1 0 1 0 1 0 1 1      1
2 2 2 2 2 1 2 0 0 1 1 1      2
0 1 0 0      3
7652110      4
0.12053      0.00000      0.935      5
-0.86800      -0.86800      -0.86800      -0.86800      -0.86800      -0.86800      -0.86800      6
-1.20000      -1.20000      -1.20000      -1.20000      -1.20000      -1.20000      -1.20000      7
1.      8
0 0 0      9
0.00000      0.00000      0.00000      10
0.50000      0.08556      0.00000      11
1.35556      0.95000      0.45000      12
0.32000      0.17500      13
0.17000      0.07000      0.09000      14
0.67778      0.27000      0.11000      15
3 4      16
18.0      18.0      18.0      17
90.8      90.8      90.8      18
-3.5      -3.5      -3.5      19
-2.5      -2.5      -2.5      20
0.0      0.0      0.0      21
0.0      0.0      0.0      22
45.00      45.00      45.00      23
0.0      0.0      0.0      24
0.01100      0.01750      0.02600      0.03500      0.04400      0.05200      0.05850      25
0.06500      0.06850      0.07150      0.07200      0.07050      0.06750      0.06350      26
0.05700      0.05000      0.04350      0.03650      0.03050      0.02600      0.02450      27
0.01100      0.01750      0.02600      0.03500      0.04400      0.05200      0.05850      28
0.06500      0.06850      0.07150      0.07200      0.07050      0.06750      0.06350      29
0.05700      0.05000      0.04350      0.03650      0.03050      0.02600      0.02450      30
15      31
0.0      3.0      6.0      9.0      12.0      15.0      18.0      32
21.0      24.0      27.0      30.0      33.0      36.0      40.0      33
45.0      34

```

Рис. 21. Пример файла исходных данных для проектирования ОНА

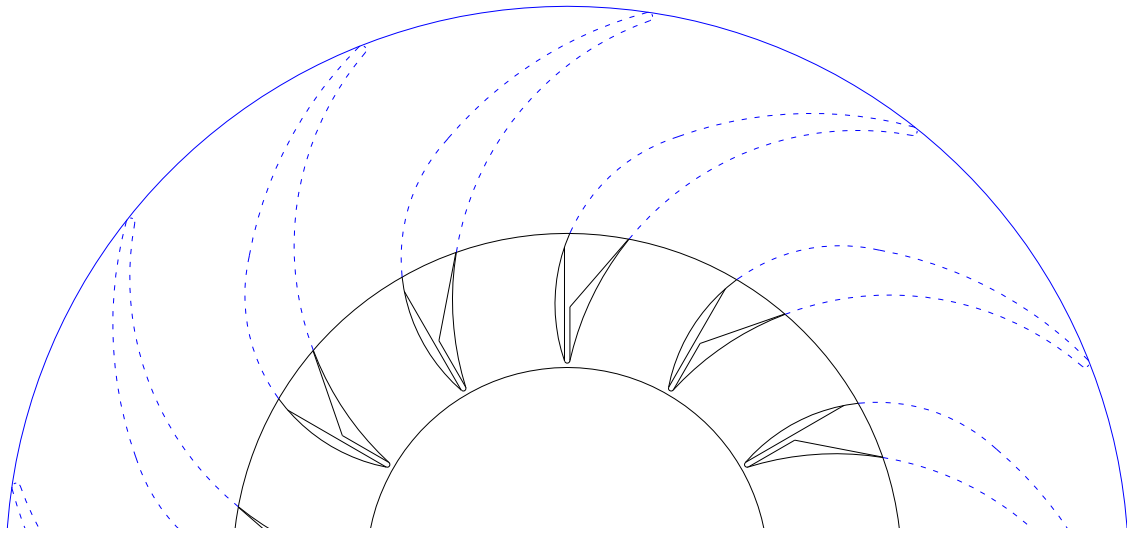


Рис. 22. Пример решетки ОНА

На рис. 23. представлена эпюра относительной скорости вокруг лопатки ОНА.

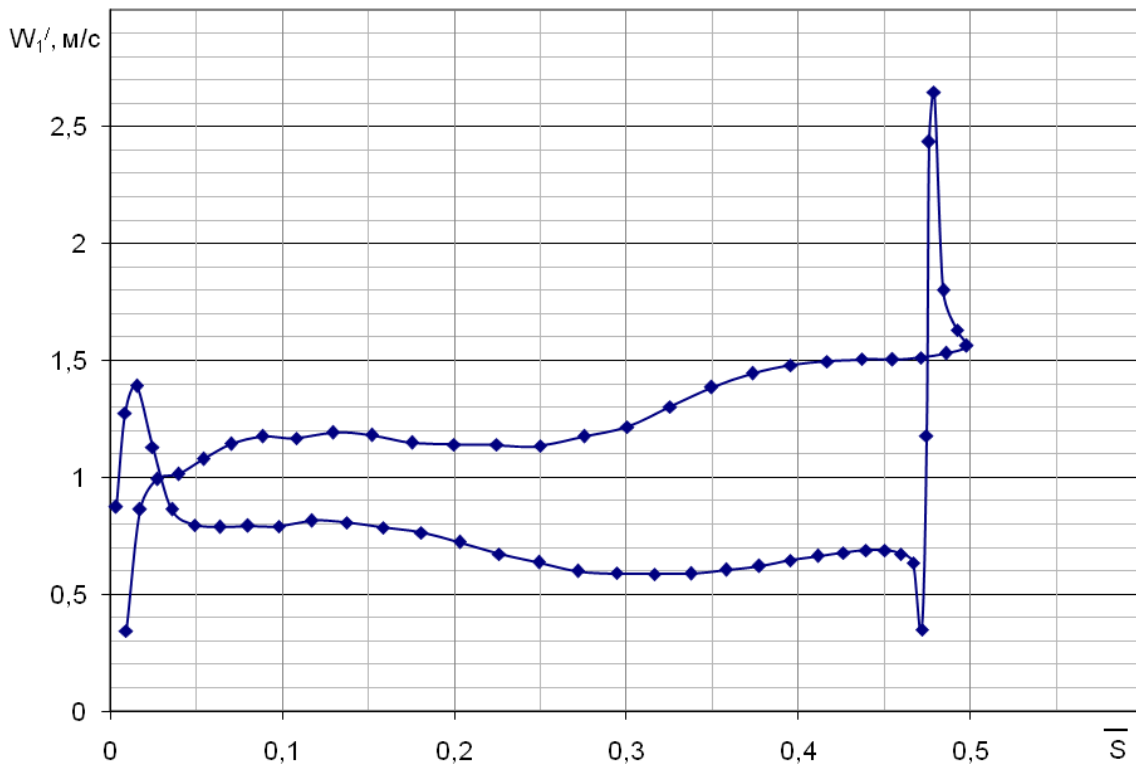


Рис. 23. Эпюра относительной скорости вокруг лопатки ОНА

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ломакин А.А. Центробежные и осевые насосы. – М.-Л.: Машиностроение, 1966. 364 с.
2. Математические модели рабочих процессов лопастных гидромашин. Автоматизированное проектирование и оценка энергокавитационных показателей лопастных систем: Метод. указания./ Сост.: А.А. Жарковский, Ю.П. Морозов, С.А. Шумилин. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. 49 с.
3. Математические модели рабочих процессов лопастных гидромашин. Расчет течения и прогнозных характеристик многоступенчатого центробежного насоса с использованием САПР лопастных систем: Метод. указания / Сост.: А.А. Жарковский, А.В. Грачев, С.А. Шумилин. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 53 с.
4. Степанов А.И. Центробежные и осевые насосы.– М.: Машгиз, 1960. 463 с.
5. Федоров А.В., Струментова Н.С., Шумилин С.А. Автоматизированное проектирование лопастных систем рабочих колес насос – турбин на напоры 90–150 м // Труды ЦКТИ, 1988. Вып. 244. С. 28–35.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Выбор основных параметров ступени	5
2. Рабочее колесо	6
2.1. Определение исходных данных для расчета колеса	6
2.2. Определение основных размеров колеса	7
2.3. Основные параметры лопастной системы рабочего колеса.....	9
2.4. Подготовка исходных данных для РК	11
2.5. Выполнение расчета и анализ полученных результатов	14
3. Направляющий аппарат	23
3.1. Основные параметры	23
3.2. Методика автоматизированного проектирования направляю- щего аппарата канального типа.....	26
4. Переводной канал	33
5. Обратный направляющий аппарат	34
Библиографический список.....	37

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ
ЛОПАСТНЫХ ГИДРОМАШИН

Проектирование проточной части многоступенчатого
центробежного насоса

Методические указания

Составители: Жарковский Александр Аркадьевич
Грачев Александр Владимирович
Шумилин Сергей Александрович
Пугачев Павел Владимирович

Лицензия ЛР №02000593 от 09.07.92

Подписано в печать
Печать офсетная. Усл. печ. л.
Тираж 50

Формат 60x84 1/16.
Уч. - изд. л.
Заказ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Издательско-полиграфический центр СПбГПУ.
Адрес университета и ИПЦ: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29.