

## 1. Введение

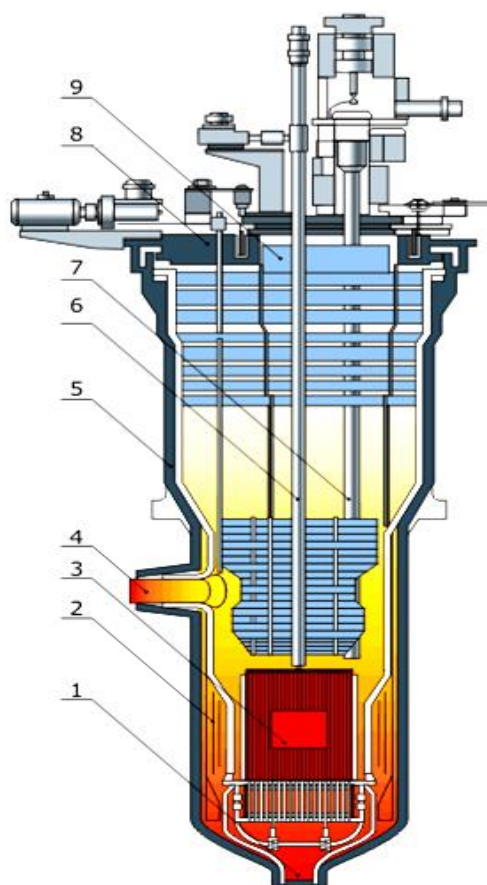
Быстрый опытный реактор БОР-60 является уникальной многоцелевой установкой, на которой проводятся испытания конструкционных, топливных и поглощающих материалов, используемых и предполагаемых к использованию в различных типах ядерных реакторов, в том числе термоядерных реакторов. Для быстрых реакторов дополнительно проводятся испытания отдельных узлов оборудования первого и второго контуров.

Проводимые испытания реакторных материалов охватывают практически весь спектр существующих и разрабатываемых типов реакторов от быстрых (БН-800, БН-1800, «БРЕСТ», СВБР) и тепловых (АЭС-2006, ВВЭР-1500, ГТ-МГР, ВТГР) до термоядерных (ИТЭР) и реакторов специального назначения.

Основные технические характеристики реактора БОР-60 [14]:

<u>Физические характеристики</u>	
Максимальная тепловая мощность	60 МВт
Электрическая мощность	12 МВт
Топливо:	UO <sub>2</sub> - PuO <sub>2</sub>
обогащение по <sup>235</sup> U	45 ÷ 90 %
Теплоноситель:	натрий
расход через реактор	1100 м <sup>3</sup> /час
давление	5,5 МПа
температура на входе в реактор	до 330 °С
температура на выходе из реактора	до 530 °С

На рисунке 1.1 представлена схема реакторной установки БОР-60.

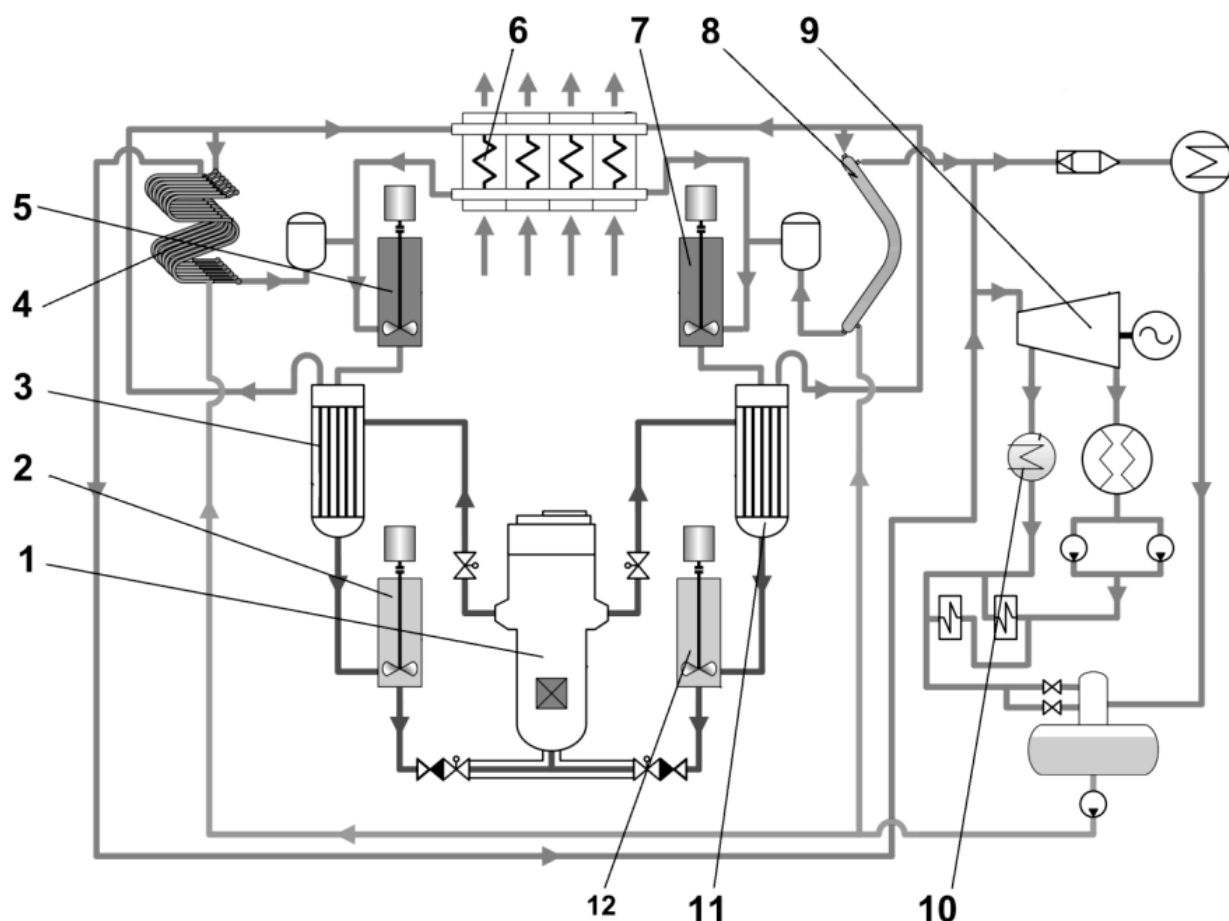


1– входной патрубок; 2 – тепловая и нейтронная защита корпуса реактора; 3 – активная зона; 4 - выходной патрубок; 5 – корпус; 6 – управляющий стержень; 7 – перегрузочный канал; 8, 9 – большая и малая защитные поворотные пробки.

Рис.1.1. Схема реактора BOR-60 [5]

На рисунке 1.2 представлена принципиальная технологическая схема реактора BOR-60.

					КП-ИЯЭиТФ-14.05.02-(С17-АЭ)-17-2020-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6



1— реактор; 2, 5, 7, 11— насосы первого и второго контура; 3, 10 — промежуточный теплообменник; 4,8 — парогенераторы; 6 — воздушный теплообменник; 9 — турбина; 12 — ТФУ.

Рис.1.2. Принципиальная технологическая схема реактора БОР-60.

Независимо от типа используемых реакторов и схемных особенностей ядерных установок одним из обязательных для ЯЭУ видов оборудования являются насосы.

При создании насосов для АЭС руководствуются общей теорией центробежных и осевых насосов, теорией подшипниковых опор, опытом создания и эксплуатации насосов различного типа и назначения.

При создании насосов для АЭС руководствуются общей теорией центробежных и осевых насосов, теорией подшипниковых опор, опытом создания и эксплуатации насосов различного типа и назначения.

Различие в конфигурации первого контура определяет основные конструкционные особенности реакторов на быстрых нейтронах. Для петлевого варианта характерны наличие собственных корпусов у каждого из трех элементов и связь между ними с помощью трубопроводов.

В настоящее время в построенных и проектируемых установках с быстрыми реакторами в основных контурах используются механические центробежные насосы.

Во вспомогательных контурах, а также в стендовых установках применяются также электромагнитные насосы. Они позволяют обеспечить герметизацию циркуляционного тракта без применения каких-либо вращающихся частей.

Механические насосы для перекачки натрия должны иметь надежно герметизированную от окружающей атмосферы внутреннюю полость. Устройства для герметизации должны надежно удерживать нейтральный газ под небольшим давлением.

Поскольку в качестве привода насоса наиболее целесообразно применять электродвигатели нормального исполнения, для герметизации рабочей полости насос должен иметь устройство, позволяющее без нарушения герметичности вывести вал насоса в окружающую атмосферу для соединения с валом привода. В качестве такого устройства применяется торцевое уплотнение. Можно выполнить насос без торцевого уплотнения по схеме с герметичным электродвигателем, но при этом возникают довольно сложные проблемы защиты двигателя от попадания паров натрия, усложняется конструкция электродвигателя, можно использовать только асинхронные двигатели (без коллекторов и щеток). Поэтому схема насоса с торцевым уплотнением является более рациональной.

Механические насосы с торцевым уплотнением вала могут быть выполнены погружными с одним или двумя гидростатическими подшипниками и с протечками через щелевое уплотнение вала.

В погружных насосах противокавитационный подпор на колесе создается за счет суммы гидростатического давления столба натрия над колесом и давления газа в полости насоса.

В насосах со щелевым уплотнением вала подпор на колесе равен перепаду давления на щелевом уплотнении. Рассмотрим в данной работе насос реактора БОР-60 ЦНН-1.

Основные характеристики натриевого насоса первого контура реактора БОР-60 [6]:

Таблица 1- Характеристики первого контура

Параметр	БОР-60 (СССР)
Тип насоса	Механический со свободной поверхностью натрия и подушкой инертного газа
Число агрегатов	2
Подача, м <sup>3</sup> /ч	830
Напор, м	60

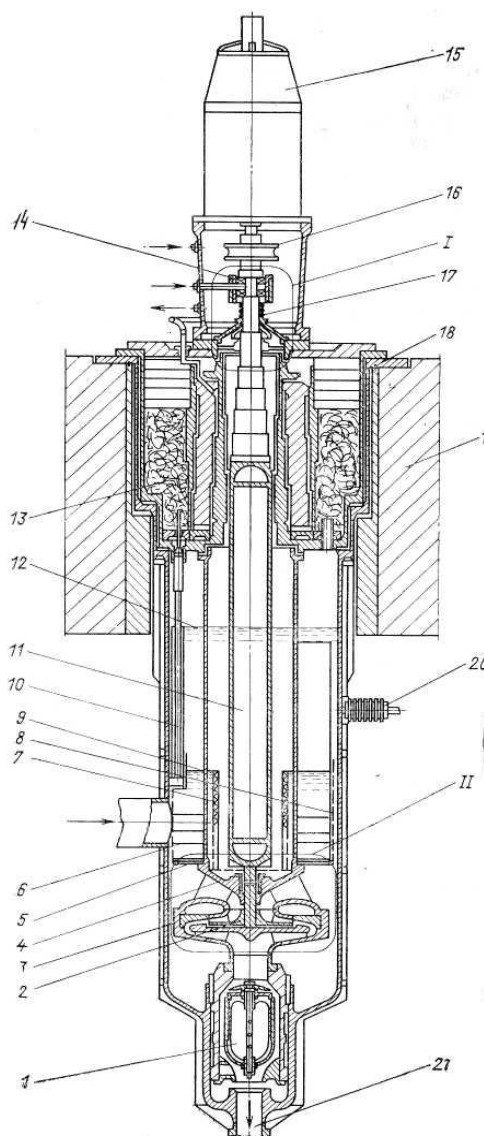
Параметр	БОР-60 (СССР)
Температура перекачиваемой жидкости, °С	500
Частота вращения (номинальная), об/мин	1500
Мощность приводного электродвигателя, КВт	220
Регулирование частоты вращения	«Система Леонардо»
Диапазон регулирования частоты вращения, %	20-100
КПД агрегата, %	71
Давление газовой подушки, МПа	0,05
Марка стали	08X18H9
Тип уплотнения	Механическое по валу
Масса агрегата, т	31

Зарубежным аналогом насоса ЦНН-1 является насос реактора Rapsodie (Франция) [3, стр 225]. Насосы французского производства, для создания циркуляции в первом контуре, центробежные, одноступенчатые, заглубленного типа. Главное отличие – перевернутое рабочее колесо, которое позволяет всасывать натрий сверху.

Вал насоса 11 вращается в двух подшипниках: нижнем (узел II) — ГСП, верхнем (узел I) — двойном роликовом радиально-осевом. В качестве привода применен асинхронный электродвигатель 15 в герметичном исполнении. Пройдя рабочее колесо 2, натрий попадает в направляющий аппарат 3 и далее в напорный патрубок. В насос первого контура встроен обратный клапан, который представляет собой поплавков с запирающим диском.

В самом ГСП имеются дроссели диаметром 7 мм. Чтобы избежать засорения дросселей, в обтекатель встроен сетчатый фильтр. Поверхность подшипника наплавлена колмоном. Уплотнение вала двойное торцовое, с масляным гидрозатвором. Охлаждается уплотнение маслом, циркулирующим в замкнутом объеме с помощью лабиринтного насоса, установленного на валу насоса. Масло охлаждается водой в холодильнике, вынесенном из корпуса насоса. Неподвижное кольцо пары трения стальное со стеллитовой наплавкой, подвижное кольцо графитовое. Ремонт верхних узлов осуществляется без разгерметизации контура. Для этой цели служит ремонтное уплотнение (узел I), состоящее из диска, герметично насаженного на вал, и запрессованного в него резинового кольца. Конструкция верхнего подшипникового узла позволяет при ремонте демонтировать подшипник и уплотнение единым блоком.

На рисунке 1.3 представлен зарубежный аналог насоса реактора БОР-60 - Насос реактора Rapsodie (Франция).

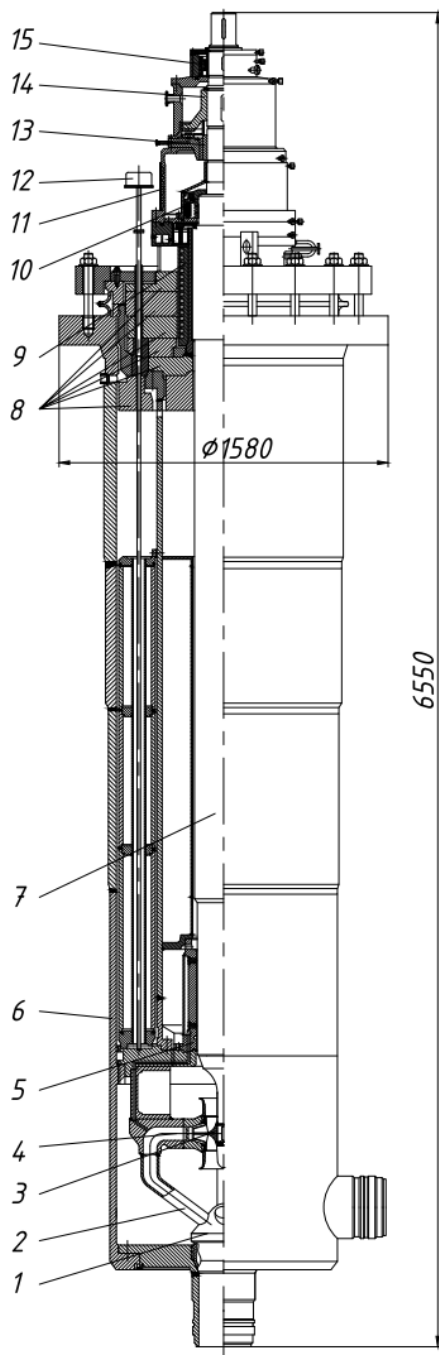


1-обратный клапан; 2-рабочее колесо; 3-направляющий аппарат; 4-улитка;  
 5-успокоительное кольцо; 6-горизонтальные успокоители; 7-внутренний антивихровой  
 цилиндр; 8-вертикальный успокоительный цилиндр; 9,12-минимальный и максимальный  
 уровни натрия соответственно; 10-уровнемер; 11-вал; 13,19-биологическая защита;  
 14-роликовый подшипник; 15-электродвигатель; 16-механическая муфта; 17-уплотнение  
 вала; 18-уплотняющее кольцо; 20-подвод газа для разогрева насоса; 21-напорный  
 патрубок

Рис. 1.3. Схема насоса реактора Rapsodie

## 2. Описание конструкции насоса

Насос реактора БОР-60 выполнен по схеме погружного заглубленного насоса колодезного типа с нижним гидростатическим подшипником, работающим на натрии от напора собственного рабочего колеса (рис. 2.1).



1 – напорный коллектор; 2 – напорный патрубок; 3 – рабочее колесо; 4 - направляющий аппарат; 5 – гидростатодинамический подшипник; 6 - бак; 7 - вал; 8 – биологическая защита; 9 – холодильник вала; 10 – стояночное уплотнение; 11 - холодильник; 12 - уровнемер; 13 – подшипниковый узел; 14 – пята вала; 15 – уплотнение вала по газу.

Рис. 2.1. Общий вид насосного агрегата

					КП-ИЯЭиТФ-14.05.02-(С17-АЭ)-17-2020-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

Верхний радиально-осевой подшипниковый узел расположен в газовой полости насоса. Насос состоит из бака, выемной части и приводного электродвигателя. Выемная часть демонтируется из бака без резки основных трубопроводов. Бак представляет собой цилиндрический сосуд с переменной толщиной стенки для обеспечения равномерной жесткости. В нижней части бака имеются два патрубка: радиальный (всасывающий) и осевой (нагнетательный), к которым привариваются соответствующие трубопроводы. Выемная часть устанавливается в бак и крепится к нему с помощью фланца. Герметичность разъема обеспечивается «усиковым» сварным швом.

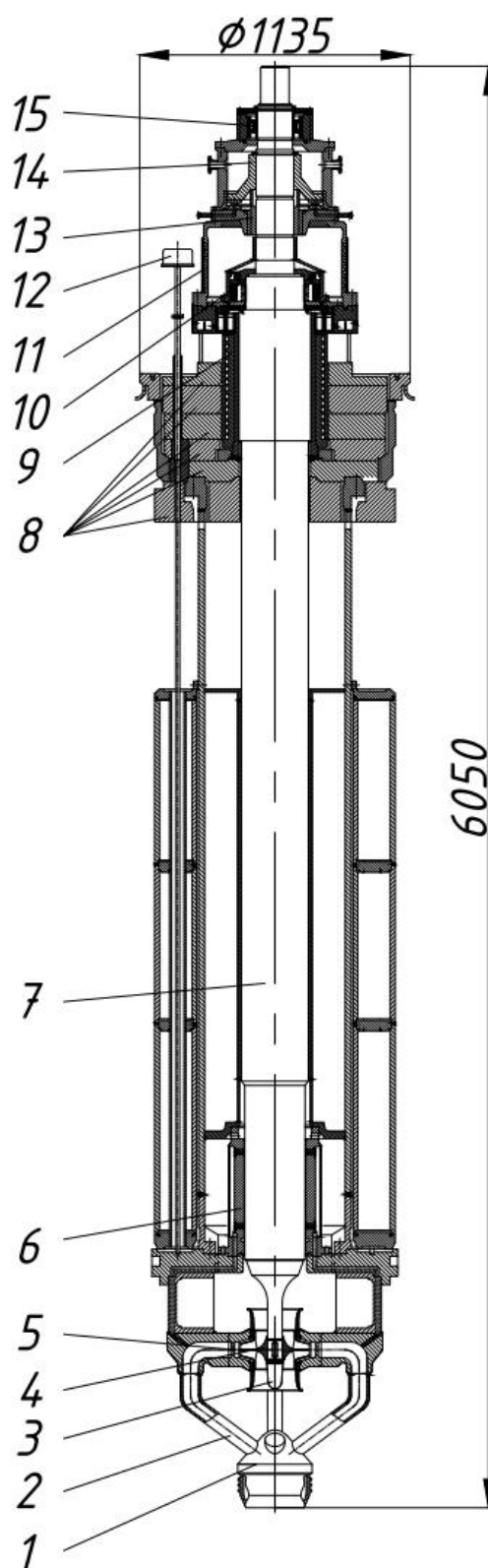
Выемная часть (рис. 2.2) содержит проточную часть с рабочим колесом, канальным направляющим аппаратом открытого типа со сборно-кольцевым отводом и всасывающим колоколом. Натрий от сборного коллектора отводится четырьмя трубами диаметром 100 мм, объединяющимися в напорный патрубок по оси насоса.

Всасывание осуществляется непосредственно из бака, причем перед самым входом на рабочее колесо установлен профилированный коллектор, дающий равномерное распределение скоростей, несмотря на боковой вход потока в бак. Протечки из подшипника через переливные окна с малым сопротивлением сливаются на всасывание. Поскольку насос заглубленный, то во время работы уровень в нем снижается в соответствии с гидравлическим сопротивлением подводящей трассы.

Допустимое колебание уровня в насосе 2 м. В целях исключения захвата газа на всасывании к выемной части насоса по наружному диаметру сборного коллектора приварена юбка высотой 0,7 м, благодаря чему обеспечивается нормальная работа насоса в различных переходных режимах, когда увеличивается сопротивление всасывающего трубопровода и уровень в насосе падает ниже рабочего колеса. В выемной сборке установлены кольцевые вытеснители, предназначенные для уменьшения объема натрия в контуре. Бак насоса служит одновременно и компенсатором объема.

					КП–ИЯЭиТФ–14.05.02-(С17-АЭ)–17–2020-ПЗ	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



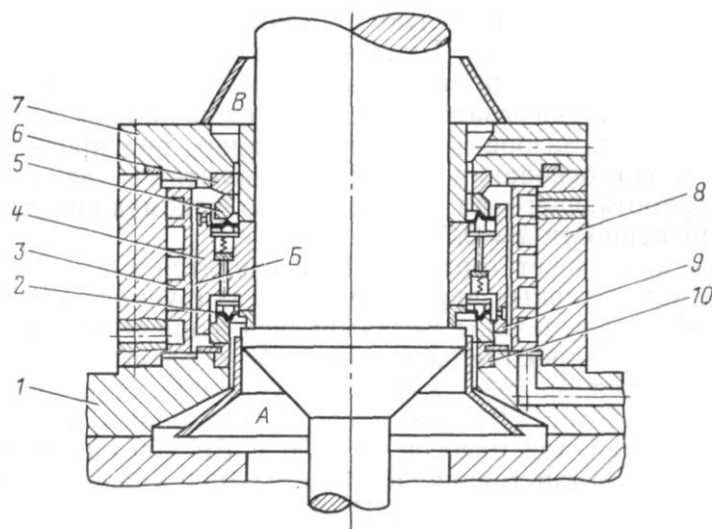


- 1 – напорный коллектор; 2 – напорный патрубок; 3 – обтекатель; 4 – рабочее колесо;  
 5 – направляющий аппарат; 6 – гидростатодинамический подшипник; 7 – вал;  
 8 – биологическая защита; 9 – холодильник вала; 10 – стояночное уплотнение вала;  
 11 – холодильник; 12 – уровнемер; 13 – подшипник радиальный; 14 – пята вала;  
 15 – уплотнение вала по газу

Рис. 2.2. Выемная часть насоса ЦНН-1М

					КП-ИЯЭиТФ-14.05.02-(С17-АЭ)-17-2020-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

Торцевое уплотнение вала по газу (рис. 2.3) обеспечивает герметичность насоса относительно внешней среды.



- А - газовая полость; Б - масляная полость; В – атмосфера;  
 1, 7 - нижний и верхний несущие фланцы; 2 - диафрагма; 3 - холодильник;  
 4 - вращающийся опорный диск; 5, 9 - верхнее и нижнее подвижные кольца;  
 6, 10 - верхнее и нижнее неподвижные кольца; 8 - корпус

Рис. 2.3. Уплотнение вала по газу [2]

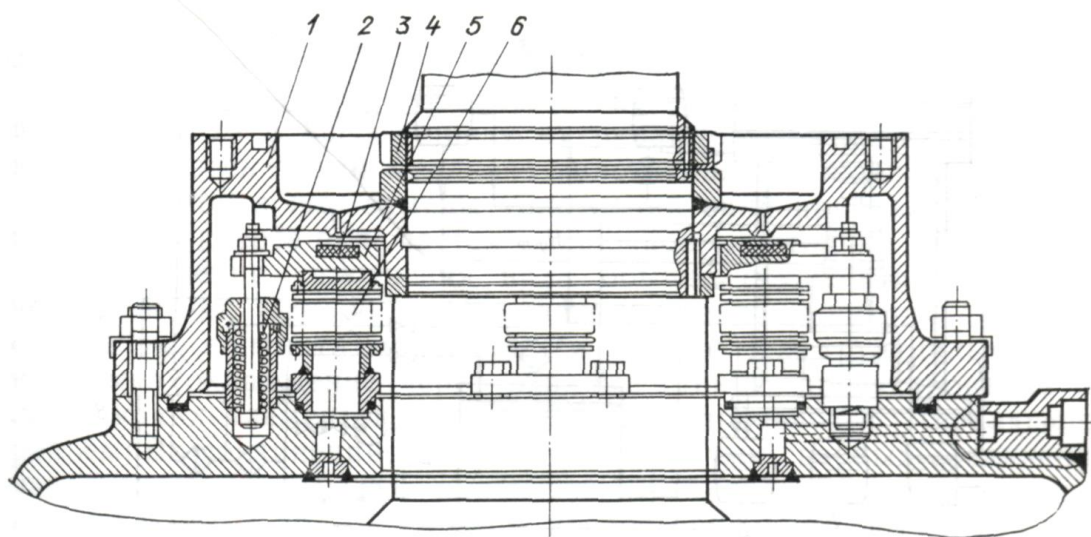
Верхний подшипниковый узел состоит из несущего корпуса, системы смазки, включающей в себя масляный насос и масляную ванну со встроенным в нее холодильником, и радиально-осевого сдвоенного шарикоподшипника.

Система смазки подшипника замкнута внутри масляной ванны. Масло из ванны подается винтовой втулкой, посаженной на вал. Нижний радиальный подшипник — гидростатический, камерный с взаимнообратным щелевым дросселированием. Рабочие поверхности подшипника наплавлены стеллитом ВЗК. Материал пар трения: графит 2П-1000 (неподвижное кольцо)— азотированная сталь 38ХМЮА (кольцо, вращающееся с валом). Сталь азотирована на глубину от 0.4 до 0.6 мм с твердостью верхнего слоя HRC = 56.

Поверхность графитовых колец, кроме плоскости контакта, омеднена с последующим лужением в целях исключения утечки масла через поры графита. Удельная нагрузка на пару трения составляет 0,25 МПа. Промежуточная камера между парами трения заполняется маслом, образующим масляный затвор, препятствующий выходу газа из корпуса насоса. Суммарные протечки масла через обе трущиеся поверхности не превышают 30 см<sup>3</sup>/ч.

					КП-ИЯЭиТФ-14.05.02-(С17-АЭ)-17-2020-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

Вал насоса — полый, сварен из двух частей: верхней из стали 10X13, нижней из стали X18H9. Стояночное уплотнение (рис. 2.4) расположено ниже верхнего подшипникового узла и в случае ремонта последнего, а также ремонта уплотнения герметизирует газовые полости насоса от окружающей среды. Эти уплотнения являются обязательными для жидкометаллических насосов и очень редко встречаются в конструкциях ГЦН для воды.



1-корпус; 2-пружина; 3-фторопластовое кольцо; 4-гайка; 5-фланец; 6-сильфон

Рис. 2.4. Схема стояночного уплотнения натриевого насоса [2,3]

Уплотняющим элементом стояночного уплотнения является фторопластовое кольцо, закрепленное на подвижном фланце, и конусная втулка, герметично посаженная на вал. Осевое перемещение фланца при включении стояночного уплотнения осуществляется подачей газа во внутреннюю полость сильфона давлением от 0,6 до 1 МПа.

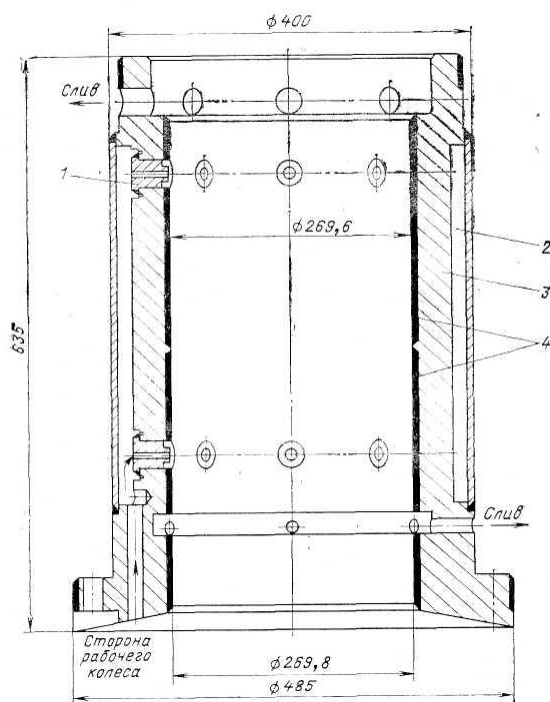
Верхний подшипниковый узел состоит из осевого и радиального подшипников. Осевой подшипник типа Митчела с оптимальным расположением ребра качения, нереверсивный, состоит из подпятника и пяты. Подпятник имеет семь самоустанавливающихся сегментов, поверхность трения которых залита баббитом, а опорой служит ребро качения. Нагрузка на подпятник передается через пята, жестко сидящую на валу насоса. Поверхность трения направляющего подшипника также залита баббитом. Система смазки подшипников, циркуляционная с охлаждением и фильтрацией масла, выполнена в виде маслблока на общей фундаментной плите с расположенными на

ней циркуляционным баком с фильтром тонкой очистки, маслососами, холодильником, фильтром грубой очистки, арматурой и трубопроводам.

Насосы первого контура центробежные, одноступенчатые, заглубленного типа, установлены на «холодной» ветке циркуляционного контура петлевой компоновки. Вал насоса вращается в двух подшипниках: нижнем-ГСП, верхнем - двойном роликовом радиально-осевом. В качестве привода применен асинхронный электродвигатель в герметичном исполнении. Всасывание натрия организовано сверху благодаря перевернутому рабочему колесу. Пройдя рабочее колесо, натрий попадает в направляющий аппарат и далее в напорный патрубок. В насос первого контура встроен обратный клапан, который представляет собой поплавок с запирающим диском. Уплотнение вала - двойное торцевое, с масляным гидрозатвором. Ремонт верхних узлов осуществляется без разгерметизации контура. Для этой цели служит стояночное уплотнение, состоящее из диска, герметично насаженного на вал и запрессованного в него резинового кольца.

Насос второго контура представляет собой аналогичную конструкцию, за исключением того, что по условиям работы в нем отсутствуют биологическая защита и обратный клапан.

Рассмотрим гидростатодинамический подшипник насосов реактора БОР-60 (рис. 2.5)



1-дроссель; 2-напорный коллектор; 3-корпус подшипника; 4-рабочая поверхность

Рис. 2.5. Гидростатодинамический подшипник насосов реактора БОР-60[2,3]

					КП-ИЯЭиТФ-14.05.02-(С17-АЭ)-17-2020-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

В этих подшипниках при увеличении частоты вращения вала грузоподъемность возрастает в гораздо большей степени, чем в камерных.

При диаметре отверстия в дросселе 7 мм и частоте вращения вала 1500 об/мин его грузоподъемность равнялась 19,6 кН. Подшипник работал без «сухого» трения и при 250 об/мин. Рабочие поверхности в корпусе были направлены электродом ЦН-6.

В таблице 2 приведены основные данные радиальных подшипников отечественного ГЦН с уплотнением вала.

Таблица 2 - Основные данные радиальных подшипников отечественного ГЦН с уплотнением вала.

Параметр	БОР-60	
	Первый контур	Второй контур
Тип нижнего радиального подшипника	ГСП с взаимобратным щелевым дросселированием	
Рабочая среда	Натрий	
Температура рабочей среды, °С	450	500
Диаметр втулки вала, мм	270	270
Радиальный зазор, мм	0,3	0,3
Число рабочих камер	16	16
Диаметр отверстия в дросселе, мм	-	-
Расход рабочей среды на подшипник, м3/ч	42	40
Перепад давления на подшипнике, МПа	0,51	0,51
Нагрузка на подшипник, кН	7,6	7,6
Рабочий относительный эксцентриситет	0,8	0,8
Материал втулки вала	Сталь Х18Н9 с наплавкой ВЗК	
Материал втулки в корпусе	Сталь Х18Н9 с наплавкой ВЗК и ЦН-6	
Шероховатость рабочих поверхностей	1.25-0,63	

#### Подводящие устройства

Каналы, подводящие поток к лопастному колесу, оказывают значительное влияние на работу ГЦН. Основная задача при расчете подводов сводится к обеспечению минимальных потерь в проточной части патрубков и к снижению неблагоприятного влияния патрубков на работу колеса, т.е. к получению равномерного поля скоростей на входе в колесо.

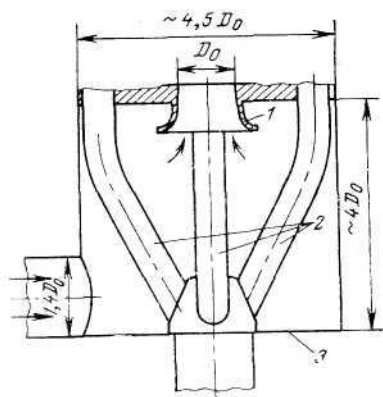
Конструкция подвода должна обеспечить:

- минимальное гидравлическое сопротивление подвода;

					КП-ИЯЭиТФ-14.05.02-(С17-АЭ)-17-2020-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

- осесимметричный поток в выходном сечении подвода;
- минимальную закрутку потока;
- стабильность параметров потока на выходе из подвода.

Подвод для центробежного насоса с коэффициентом быстроходности  $ns=80$  выполнен в виде бака, внутри которого установлены четыре напорных трубопровода (рис. 2.6).



1-всасывающий патрубок; 2-напорные патрубки; 3-бак

Рис. 2.6. Подводящий патрубок ГЦН реактора БОР-60 ( $ns = 80$ )

Насосы для перекачивания жидкого металла снабжены системой электроразогрева для обеспечения предварительного разогрева их корпусов перед заполнением, а также для поддержания необходимой температуры металла внутри насоса. Температура внутри бака натриевых насосов должна быть в пределах 150—200 °С. Полезно иметь нагреватели и на крышке насоса. Эти нагреватели позволяют перед пуском насоса расплавить натрий, застывший в щелях между холодильником и валом насоса при его стоянке.

В качестве привода ГЦН в подавляющем большинстве случаев используется электродвигатель. Насос второго контура в силу особенностей теплотехнической схемы установки должны иметь плавное или ступенчатое регулирование частоты вращения.

Известны следующие приводы ГЦН с регулируемой частотой вращения, применяемые в настоящее время в отечественной и зарубежной практике:

- асинхронный электродвигатель с изменением частоты вращения при помощи электромагнитных муфт, гидромuft и зубчатых редукторов;
- двигатель постоянного тока с регулированием напряжения в цепи якоря;
- асинхронный двигатель с фазным ротором и жидкостным реостатом в цепи ротора;
- двухскоростной асинхронный электродвигатель;

- синхронный короткозамкнутый электродвигатель со статическим преобразователем частоты (вентильный привод);

- асинхронный электродвигатель с фазным ротором, работающим в системе асинхронно-вентильного каскада (АВК).

Наиболее перспективными из перечисленных способов считаются последние три, и именно они применяются в настоящее время на современных установках.

Для смазки шарикоподшипника и для подпитки уплотнения вращающегося вала по газу служит масляная система. Система смазки шарикоподшипника циркуляционная, замкнутая внутри масляной ванны. Масло из ванны подается на подшипник винтовой втулкой и стекает обратно в ванну, где охлаждается встроенным водяным холодильником.

Для подпитки масляного уплотнения вала по газу используется масло из напорного бака. Протечки масла из масляной ванны и уплотнения вала по газу сливаются в герметичный и негерметичный баки протечек.

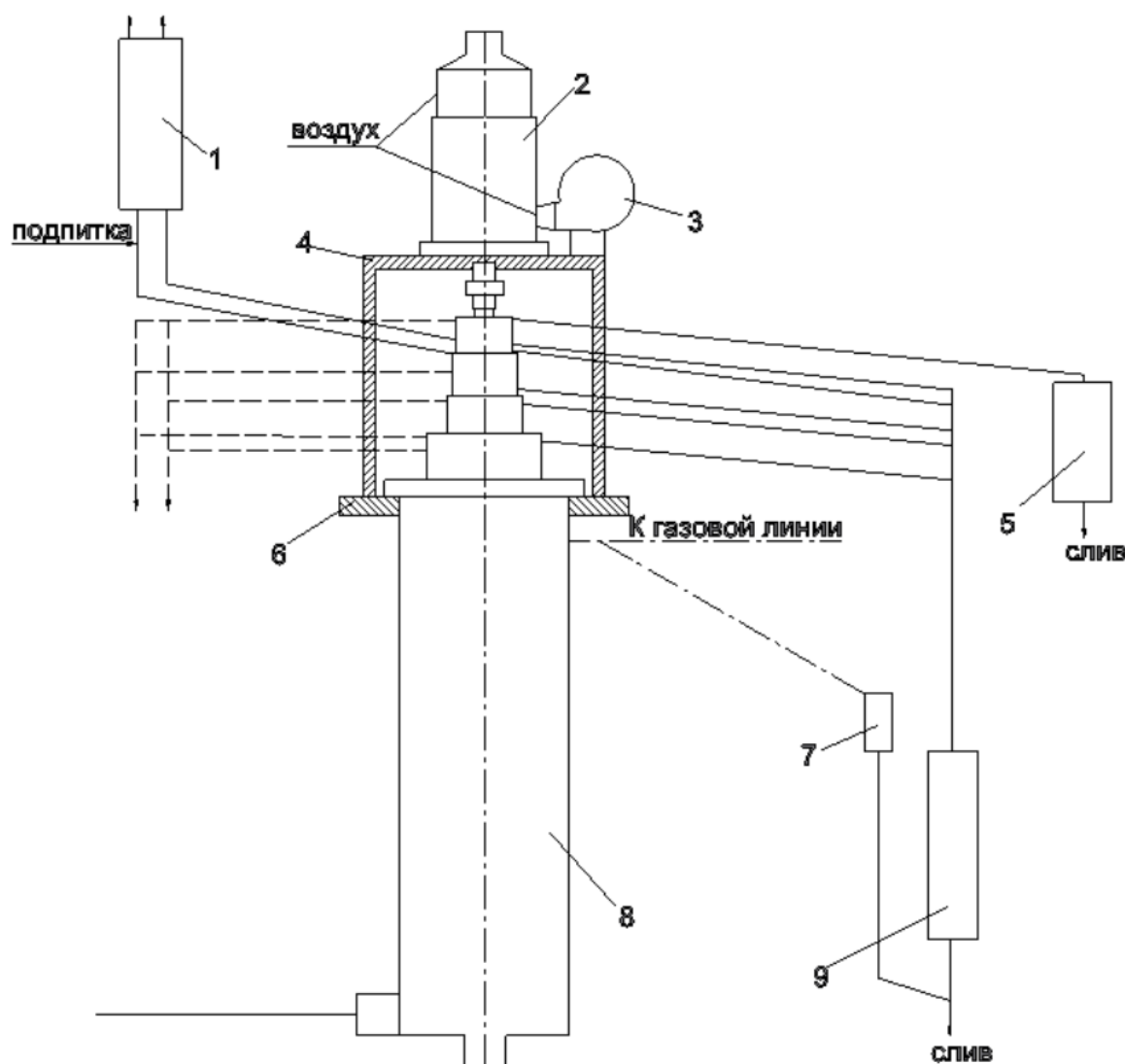
Система охлаждения насоса водяная, служит для снятия тепла с вала, подшипника и уплотнения вала по газу. Охлаждающая вода из общей системы подается в холодильник вала, в холодильник масляной ванны, в холодильник уплотнения вала и возвращается обратно в систему.

Охлаждение электродвигателя воздушное, осуществляется электровентилятором ЭВР-4 мощностью 2,8 кВт. Вентилятор поставляется комплексно с электродвигателем.

Для создания на всасывании насоса противакавитационного подпора и для предотвращения окисления натрия полость насоса над свободным уровнем натрия в баке заполнена инертным газом-аргоном.

Схема насосного агрегата со вспомогательным оборудованием показана на рис. 2.8.

					КП–ИЯЭиТФ–14.05.02-(С17-АЭ)–17–2020-ПЗ	Лист
						19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



1 – бак напорный 50 л; 2 – электродвигатель; 3 – вентилятор электродвигателя; 4 – станина электродвигателя; 5 – бак протек 50 л (негерметичный); 6- плита опорная;  
7 – маслоотделитель; 8 – насос; 9 – бак протечек 150 л (герметичный).

Рис. 2.7. Схема насосного агрегата со вспомогательным оборудованием

В таблице 3 представлены основные характеристики разработанного насоса, а в таблице 3.1 материалы основных деталей.

Таблица 3 - Основные характеристики насоса (по расчёту)

Марка насоса	ЦНН-1М
Подача, м <sup>3</sup> /ч	650
Напор, м	92
Частота вращения (синхр), об/мин	3000
Мощность насосного агрегата, кВт	195
Температура теплоносителя, °С	450



Давление на всасывании, МПа	0,03
Коэффициент полезного действия, %	80,6
Масса насосной установки, т	31

Таблица 3.1 – Материалы основных деталей спроектированного насоса

Рабочее колесо	Вал насоса	Корпус насоса (бак)	Направляющий аппарат	Рама опорная под корпус и проставка под электродвигателем (при наличии)
10X18H12M3Л	X18H9	X18H9	1X18H12M3Л	20X13

### 3. Расчет рабочего колеса с профилирование лопастей и меридианного сечения

#### 3.1 Исходные данные для расчета

Во время выполнения курсового проекта я произвел замену однопоточного колеса оригинального насоса БОР-60, на двухпоточное.

Исходные данные приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Исходные данные

Наименование параметра	Значение
Подача Q,	650
Напор H, м	92
Давление на входе в насос P, МПа	0,03
Температура натрия на входе в насос T, °C	450
Плотность натрия при данной температуре 450 °C ρ, кг/м³	844
Давление насыщенных паров натрия P <sub>нп</sub> , Па	164,4

#### 3.2. Определение располагаемого кавитационного запаса

Располагаемый кавитационный запас определяется по формуле

$$\Delta h_{\text{рас}} = \frac{P_c}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} - \frac{P_{\text{нп}}}{\rho \cdot g}$$

где:  $P_c = P + P_a$  – абсолютное статическое давление на входе в насос, Па

$P_{\text{нп}}$  – давление насыщенных паров, Па

$v$  – скорость среды на входе в насос, м/с

$\frac{P_c}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g}$  - полная удельная энергия потока ( $E_{\text{вх}}$ ) на входе в насос.

Т.к. на начальном этапе значение скоростей неизвестно, то опустим это слагаемое.

Таким образом:

$$\Delta h_{\text{рас}} = \frac{P_c - P_{\text{нп}}}{\rho \cdot g} = \frac{0,13 \cdot 10^6 - 164,4}{844 \cdot 9,81} = 15,7 \text{ м}$$

Тогда  $\Delta h_{\text{рас}} = 15,7$  м. Расчет уточненного значения располагаемого кавитационного запаса будет проведен после расчета геометрии рабочего колеса насоса. В конечном итоге уточнение значения располагаемого кавитационного запаса только лишь увеличит располагаемый кавитационный запас.

#### 3.3 Выбор частоты вращения ротора

Расчет выполняется следующим образом.

3.3.1 Задаемся частотой вращения ротора.

$$n = n_{\text{sin}} \cdot \left(1 - \frac{S}{100}\right) = 3000 \cdot \left(1 - \frac{3,33}{100}\right) = 2900 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

					КП–ИЯЭиТФ–14.05.02-(С17-АЭ)–17–2020-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

где  $s = 3,33\%$  – скольжение.

### 3.3.2 Определяем коэффициент быстроходности.

Рассматриваем вариант двухпоточного рабочего колеса.

$$n_s = \frac{3,65 \cdot n \cdot \sqrt{Q}}{H^{0,75}} = \frac{3,65 \cdot 2900 \cdot \sqrt{\frac{650}{3600 \cdot 2}}}{92^{0,75}} = 107$$

Тип рабочего колеса - центробежное нормальное.

### 3.3.3 Определяем кавитационный коэффициент быстроходности.

Кавитационный коэффициент быстроходности определяем по рис. 3.1 [5, стр. 35].

$$C_{кр} = 771$$

### 3.3.4 Определяем критический кавитационный запас.

$$\Delta h_{кр} = 10 \cdot \left[ \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{C_{кр}} \right]^{\frac{4}{3}} = 10 \cdot \left[ \frac{3000 \cdot \sqrt{\frac{650}{3600 \cdot 2}}}{771} \right]^{\frac{4}{3}} = 11,77 \text{ м}$$

### 3.3.5 Определяем допускаемый кавитационный запас.

$$\Delta h_{доп} = 1,2 \cdot h_{кр} = 14,1 \text{ м}$$

Результаты расчетов приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Результаты расчетов

Наименование параметра	Значение		
Частота вращения ротора синхронная $n_{sin}$ , об/мин	<b>3000</b>	1500	1000
Частота вращения ротора $n$ , об/мин	<b>2900</b>	1450	970
Коэффициент быстроходности $n_s$	<b>107</b>	54	36
Кавитационный коэффициент быстроходности $C_{кр}$	<b>772</b>	686	657
Располагаемый кавитационный запас $\Delta h_{рас}$ , м	<b>15,7</b>	15,7	15,7
Критический кавитационный запас $\Delta h_{кр}$ , м	<b>11,8</b>	5,5	3,4
Допускаемый кавитационный запас $\Delta h_{доп} = 1,2 \Delta h_{кр}$ , м	<b>14,2</b>	6,6	4,0

Кавитация отсутствует при условии  $\Delta h_{рас} > \Delta h_{доп}$ . Для изготовления рабочего колеса с лопастями одинарной кривизны коэффициент быстроходности должен быть  $< 130$ . Это условие выполняется при частоте вращения ротора 3000, 1500, 1000 об/мин. Для дальнейшего проектирования принимаем вариант с наибольшей частотой вращения ротора. Этот вариант будет иметь наименьшие габариты и высокий КПД насоса -  $\eta \approx 81\%$ ;

## 3.4 Определение размеров рабочего колеса с помощью диаграмм

Для выбранного варианта определяются размеры рабочего колеса насоса с помощью диаграмм на рис. 3.3 [5, стр.37]. По диаграмме выбираем коэффициенты в зависимости от коэффициента быстроходности. Согласно данным диаграммы все

					КП–ИЯЭиТФ–14.05.02-(С17-АЭ)–17–2020-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

определяемые параметры являются функцией быстроходности насоса и могут быть рассчитаны по формуле:

$$X = K_X \cdot \frac{\sqrt{H}}{n}$$

где:  $X$  – определяемый параметр;

$K_X$  – соответствующий параметру коэффициент на диаграмме;

$H$  – напор насоса;

$n$  – частота вращения ротора насоса.

Тогда:

$$D_0 = K_{D_0} \cdot \frac{\sqrt{H}}{n} = 44,6 \cdot \frac{\sqrt{92}}{3000} = 147,7 \text{ мм};$$

$$b_1 = K_{b_1} \cdot \frac{\sqrt{H}}{n} = 13,8 \cdot \frac{\sqrt{92}}{3000} = 45,5 \text{ мм};$$

$$D_2 = K_{D_2} \cdot \frac{\sqrt{H}}{n} = 87,6 \cdot \frac{\sqrt{92}}{3000} = 289,7 \text{ мм};$$

$$b_2 = K_{b_2} \cdot \frac{\sqrt{H}}{n} = 6,1 \cdot \frac{\sqrt{92}}{3000} = 20,1 \text{ мм};$$

Полученные результаты приведены в таблице 6

Таблица 6 - Результаты расчетов по диаграммам

Значение коэффициента	$KD_0 = 44,6$	$Kb_1 = 13,8$	$KD_2 = 87,6$	$Kb_2 = 6,1$
Размер колеса, мм	$D_0 = 147,7$	$b_1 = 45,5$	$D_2 = 289,7$	$b_2 = 20,1$

### 3.5 Расчет геометрии рабочего колеса и параметров потока по программе

#### MathCad

Расчет геометрии рабочего колеса и параметров потока выполнен по программе MathCad. Скриншот экрана с результатами расчета по программе MathCad приведен в приложении А. Результаты расчета геометрии рабочего колеса и параметров потока приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Расчет рабочего колеса

Наименование	Формула	Значение
Частота вращения ротора, об/мин	$n := n_{\text{sin}} \cdot \left(1 - \frac{S}{100}\right)$	2900
Подача ступени, м <sup>3</sup> /с.	$Q_{\text{pot}} := \frac{Q}{3600 \cdot Z_{\text{pot}}}$	0,09
Напор ступени, м	$H_{\text{st}} := \frac{H}{Z_{\text{st}}}$	92

Наименование	Формула	Значение
Коэффициент быстроходности ступени	$ns := \frac{3.65 \cdot n \cdot \sqrt{Q_{pot}}}{H_{st}^{0.75}}$	107
Приведенный диаметр, мм	$D1pr := 4.25 \cdot 10^3 \cdot \left( \frac{Q_{pot}}{n} \right)^{\frac{1}{3}}$	133,7
Гидравлический КПД ступени	$\eta_g := 1 - \frac{0.42}{\left( \frac{1}{\ln(10)} \ln(D1pr) - 0.173 \right)^2}$	0,89
Объемный КПД ступени	$\eta_{ob} := \frac{1}{1 + 0.68ns \frac{-2}{3}}$	0,971
Механический КПД ступени	$\eta_{dt} := \frac{1}{1 + \frac{820}{ns^2}}$	0,933
КПД ступени	$\eta := \eta_g \cdot \eta_{ob} \cdot \eta_d$	0,806
Мощность проточной части, кВт	$N := \frac{\rho \cdot Q \cdot H}{102 \cdot 3600 \cdot \eta}$	170,5
Максимальная мощность проточной части, кВт	$N_{max} := 1.2 \cdot N$	204,6
Диаметр вала из условия прочности, мм; Бкр = 15·10 <sup>6</sup> Па	$dval\_Zst := 10 \cdot \left( \frac{M}{0.2 \cdot 150} \right)^{\frac{1}{3}}$	61,2
Диаметр втулки, мм	$\_dvt\_Zst := 1.25 \cdot dval\_Zst$	76,5
Принимаем диаметр втулки, мм	—	76
Кавитационный коэффициент быстроходности: Для консольного расположения рабочего колеса, либо для проходного вала	—	771
Критический кавитационный запас, м	$\Delta H_{kr} := 10 \cdot \left[ \frac{(n \cdot \sqrt{Q_{pot}})}{Ckr} \right]^{\frac{4}{3}}$	11,77
Допускаемый кавитационный запас, м	$\Delta H_{dop} := 1.2 \cdot \Delta H_{kr}$	14,1

Наименование	Формула	Значение
Скорость на входе в ступень, м/с (Kvo – коэффициент входной скорости) /Kvo = 0,06 – 0,08/ Принимаем Kvo = 0,0603	$V_o := K_{vo} \cdot \left( Q_1 \cdot n^2 \right)^{\frac{1}{3}}$	5,56
Диаметр колеса на входе, мм	$D_o := 1000 \cdot \sqrt{\left( 4 \cdot \frac{Q_1}{\pi \cdot V_o} \right) + \left( \frac{dvt}{1000} \right)^2}$	165
Диаметр лопасти на входе /D1osn_otn = D1/D0 = 0,8 – 1/ Принимаем D1osn_otn = 0,9	$D_1 := D_{1osn\_otn} \cdot D_o$	148,5
Меридианная скорость на входе, м/с /Kvm1 = 0,5 – 1,1/ Принимаем Kvm1 = 0,915	$V_{m1p} := K_{vm1} \cdot V_o$	5,08
Ширина лопасти на входе, мм	$b_1 := 1000 \cdot \frac{Q_1}{(\pi \cdot 0.001 \cdot D_1 \cdot V_{m1p})}$	39,2
Окружная скорость лопасти на входе, м/с	$u_{1D1} := 0.001 \cdot D_1 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}$	22,55
Коэффициент стеснения K1 Принимаем количество лопастей на входе Z1=7, толщину лопасти на входе S1=5мм. Угол установки лопасти на входе β1=20.	$K_1 := \frac{1}{1 - \left[ \frac{(Z_1 \cdot S_1)}{\pi \cdot D_1 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{\beta_1}{180}\right)} \right]}$	1,281
Угол потока на входе, град	$\beta_{1o} := \left( \frac{180}{\pi} \right) \cdot \operatorname{atan} \left[ \frac{(V_{m1p} \cdot K_1)}{u_{1D1}} \right]$	16,1
Угол атаки, град	$\delta_1 := \beta_1 - \left( \frac{180}{\pi} \right) \cdot \operatorname{atan} \left[ \frac{(V_{m1p} \cdot K_1)}{u_{1D1}} \right]$	3,9
Меридианная скорость на входе с учетом стеснения, м/с	$V_{m1} := K_1 \cdot V_{m1p}$	6,51
Подача на ступень с учетом объемных протечек, м3/с	$Q_1 := \frac{Q_{pot}}{\eta_{ob}}$	0,093
Относительная скорость на входе, м/с	$W_{1D1} := \frac{V_{m1}}{\sin\left(\pi \cdot \frac{\beta_1}{180}\right)}$	19,04
Критический кавитационный запас, м m0 = 1,2 n0 = 0,4	$\Delta H_{kr} := m_o \cdot \frac{V_o^2}{2 \cdot g} + n_o \cdot \frac{W_{1oD1}^2}{2 \cdot g}$	13,13

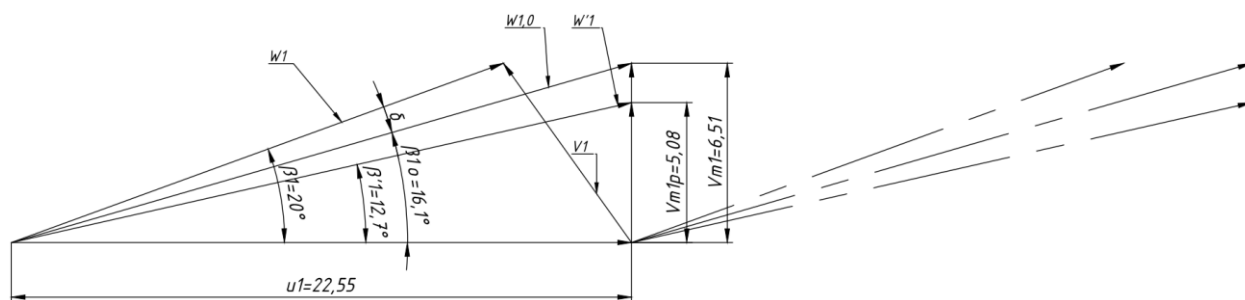
Наименование	Формула	Значение
Кавитационный коэффициент быстроходности	$C_{kr} := \frac{(n \cdot \sqrt{Q_{pot}})}{(0.1 \cdot \Delta H_{kr})^{\frac{3}{4}}}$	710
Меридианная скорость на выходе, м/с /Kvm2 = 0,5 – 1/ Принимаем Kvm2 = 1	$Vm2p := Kvm2 \cdot Vm1p$	5,08
Теоретический напор, м	$Ht := \frac{H_{st}}{\eta_{g-}}$	103,37
Окружная скорость на выходном диаметре (начальное приближение), м/с	$u2 := \sqrt{(2 \cdot g \cdot Ht)}$	45
Диаметр рабочего колеса на выходе (начальное приближение), мм	$D2 := \frac{(1000 \cdot 2 \cdot u2)}{\pi \cdot \frac{n}{30}}$	296,5
Принимаем количество лопастей на выходе, Z1·Z2otn=7. Толщину лопасти на выходе, S2=5мм. Угол установки лопасти на выходе β2=23. Решение системы 4-х уравнений определяет: <ul style="list-style-type: none"> <li>Диаметр рабочего колеса на выходе D2, мм;</li> <li>Окружная скорость на наружном диаметре u2, м/с;</li> <li>Коэффициент затеснения K2;</li> <li>Поправку на конечное число лопастей P.</li> </ul> (Формулы системы записаны по правилам программы MathCad).	$a := 2 \cdot \tan\left(\pi \cdot \frac{\beta2}{180}\right)$ <p>Given</p> $P_{pr} = \frac{2}{(Z1 \cdot Z2otn)} \cdot \frac{\left(0.6 + 0.6 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{\beta2}{180}\right)\right)}{1 - \left(\frac{D1_{pr}}{D2}\right)^2}$ $K2 = \frac{1}{\left[1 - \frac{(Z1 \cdot Z2otn \cdot S2)}{\pi \cdot D2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{\beta2}{180}\right)}\right]}$ $u2 = \left(K2 \cdot \frac{Vm2p}{a}\right) + \sqrt{\left[\left(K2 \cdot \frac{Vm2p}{a}\right)^2 + g \cdot (1 + P) \cdot Ht\right]}$ $D2 = 1000 \cdot \frac{(60 \cdot u2)}{\pi \cdot n}$	P = 0,324 K2 = 1,11 u2= 43,88 D2 = 288,9
Окружная составляющая абсолютной скорости на выходе, м/с	$Vu2 := g \cdot \frac{Ht}{u2}$	23,1
Меридианная скорость на выходе с учетом стеснения, м/с	$Vm2 := K2 \cdot Vm2p$	5,64
Относительная скорость на выходе, м/с	$W2 := \frac{Vm2}{\sin\left(\pi \cdot \frac{\beta2}{180}\right)}$	14,43
Коэффициент торможения относительной скорости в колесе	$Kw := \frac{W1D1}{W2}$	1,32

Наименование	Формула	Значение
Ширина колеса на выходе, мм	$b_2 := 1000 \cdot \frac{Q_1}{(\pi \cdot 0.001 \cdot D_2 \cdot V_{m2p})}$	20,1
Угол абсолютной скорости на выходе, град	$\alpha_2 := \left( \frac{180}{\pi} \right) \cdot \operatorname{atan} \left( \frac{V_{m2p}}{V_{u2}} \right)$	12,41
Абсолютная скорость на выходе из колеса, м/с	$V_{2p} := \sqrt{(V_{u2}^2 + V_{m2p}^2)}$	23,7

$$\Delta h_{\text{рас}} = \frac{P_c}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} - \frac{P_{\text{нп}}}{\rho \cdot g} = \frac{0,13 \cdot 10^6}{844 \cdot 9,81} + \frac{5,56^2}{2 \cdot 9,81} - \frac{164,4}{844 \cdot 9,81} = 17,26 \text{ м}$$

Скорректированное значение располагаемого кавитационного запаса ожидаемо увеличилось, так как в первом приближении скорость среды на входе в насос  $V$  принималась равной 0. Приращение произошло за счет слагаемого  $V^2/2g$ , входящего в состав полной удельной энергии потока на входе в насос.

Треугольник скоростей на входе в колесо показан на рисунке 3.1

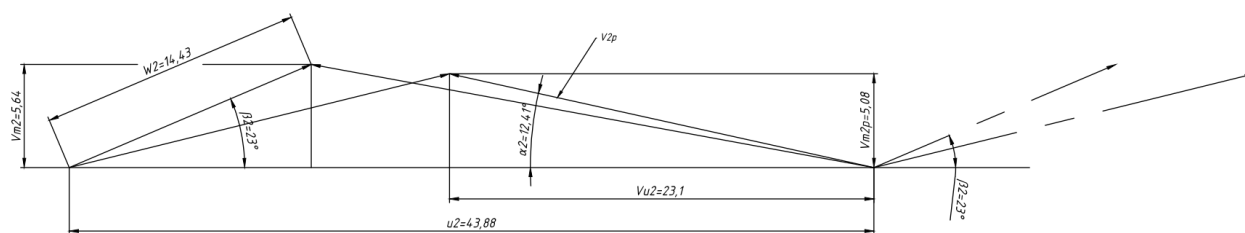


$\beta_1$  – угол лопатки на входе;  $\beta_{1o}$  – угол потока на входе;  $\beta'_1$  – угол потока до поступления на лопасти колеса;  $\delta$  – угол атаки;  $W_1$  – относительная скорость на входе;  $W_{1,0}$  – относительная скорость потока без учета стеснениями лопастями;  $W'_1$  – относительная скорость потока до поступления на лопасти колеса;  $u_1$  – окружная скорость лопасти на входе;  $V_{m1p}$  – меридианная скорость на входе;  $V_{m1}$  – меридианная скорость на входе с учетом стеснения

Рис. 3.1. Треугольник скоростей на входе в колесо

Треугольники скоростей на выходе из рабочего колеса показан на рисунке 3.2.





$\beta_2$  – угол лопатки на выходе;  $\alpha_2$  – угол абсолютной скорости на выходе;  $W_2$  – относительная скорость на выходе;  $u_2$  – окружная скорость лопасти на выходе;  $V_{u2}$  – окружная составляющая абсолютной скорости на выходе;  $V_{2p}$  – абсолютная скорость на выходе из колеса;  $V_{m2p}$  – меридианная скорость на выходе;  $V_{m2}$  – меридианная скорость на выходе с учетом стеснения

Рисунок 3.2. Треугольник скоростей на выходе из колеса

### 3.6 Профилирование меридианного сечения рабочего колеса

Профилирование должно быть осуществлено так, чтобы создать благоприятные условия для безотрывного обтекания контура лопасти потоком, что обеспечивает минимум гидравлических потерь.

Параметры рабочего колеса сведем в таблицу 8.

Таблица 8 – Параметры рабочего колеса

Вход в рабочее колесо $D_0$ , мм	165
Диаметр расположения водных кромок лопаток $D_1$ , мм	148,5
Выход из рабочего колеса $D_2$ , мм	289
Ширина колеса на входе $b_1$ , мм	39,2
Ширина колеса на выходе $b_2$ , мм	20,1
Число лопаток $Z$	7
Толщина лопатки на входе $S_1$ , мм	5
Толщина лопатки на выходе $S_2$ , мм	5
Угол лопатки на входе $\beta_1$ , град	20
Угол лопатки на выходе $\beta_2$ , град	23

Координаты поверхности покрывного диска определены при профилировании канала в пакете Mathcad 2015 и приведен в приложении Б. На рис. 3.3 показано построение меридианного сечения рабочего колеса, на рис. 3.4 приведен эскиз меридианного сечения рабочего колеса (одной половины).

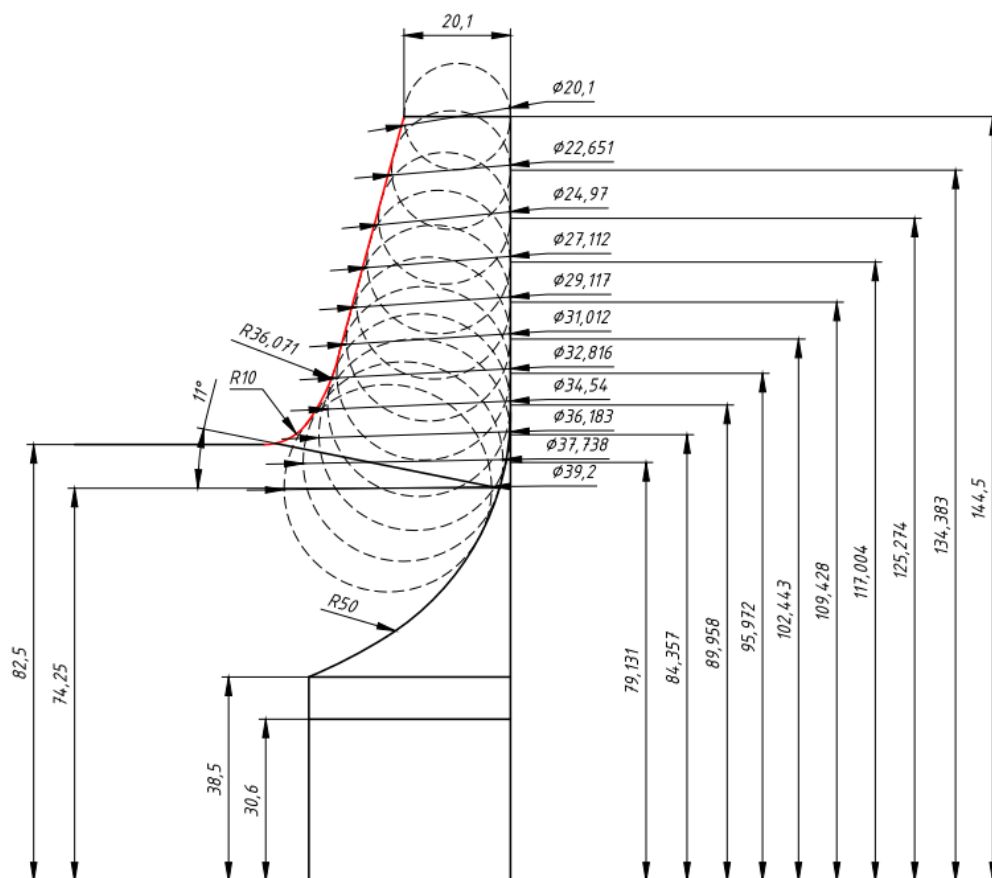


Рис. 3.3. Построение эскиза меридианного сечения колеса.

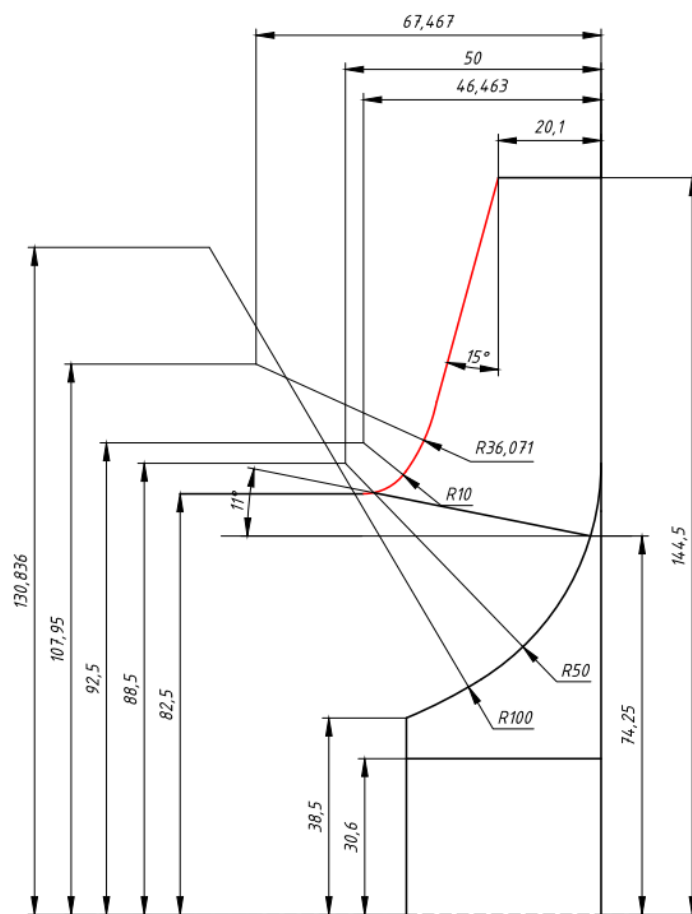


Рис. 3.4. Эскиз меридианного сечения колеса.

### 3.7 Профилирование лопастей рабочего колеса по программе в Mathcad

Профилирование рабочих лопаток проведем и использованием пакета Mathcad 2015 по методике изложенной в [5]. В приложении Б представлен полный расчет. На рисунке 3.5 представлен вид рабочих лопаток, полученный в результате расчета.

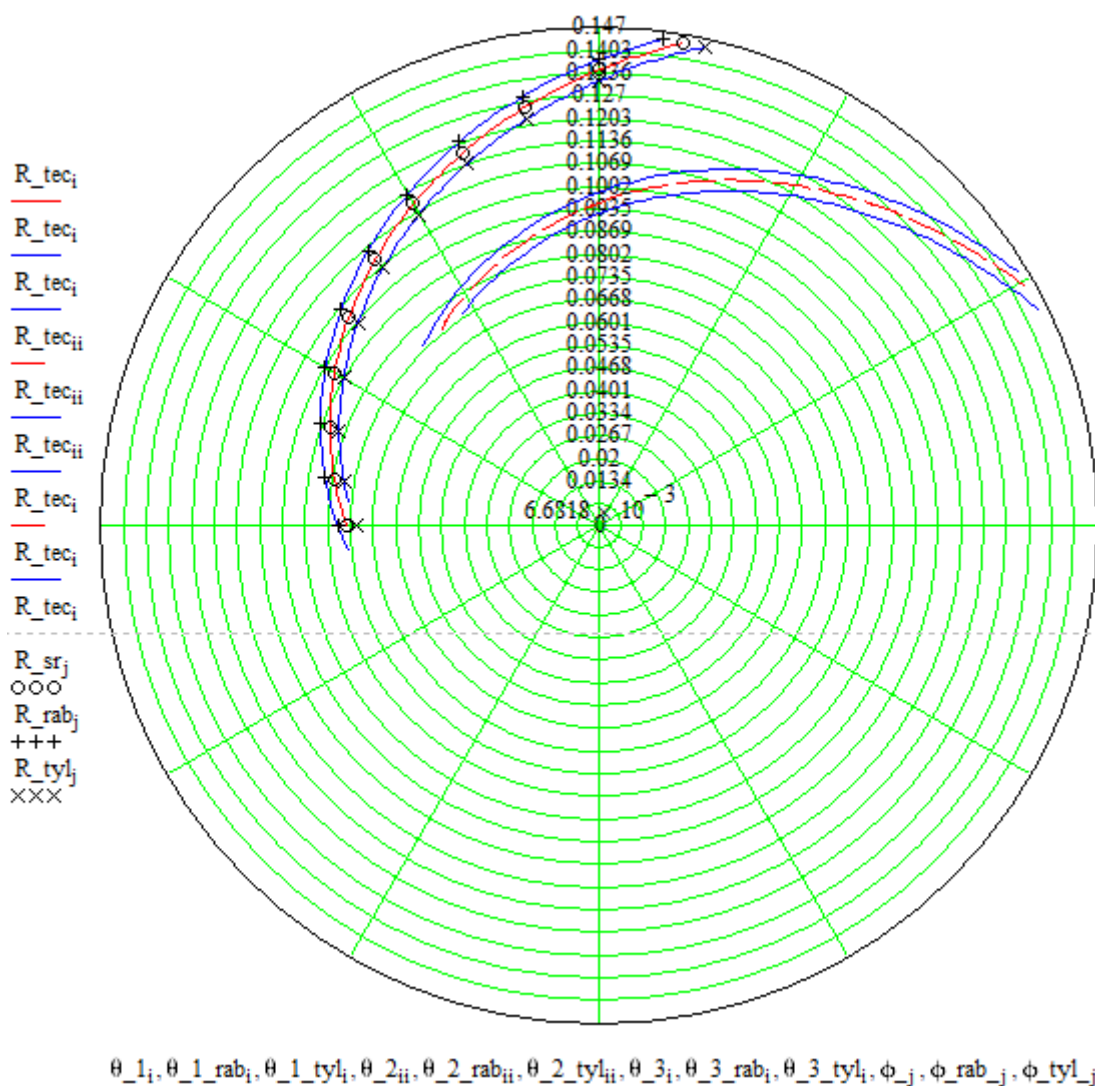


Рис. 3.5. Профили лопаток рабочего колеса

Дополнительно была разработана 3D модель рабочего колеса в программе Компас-3D.

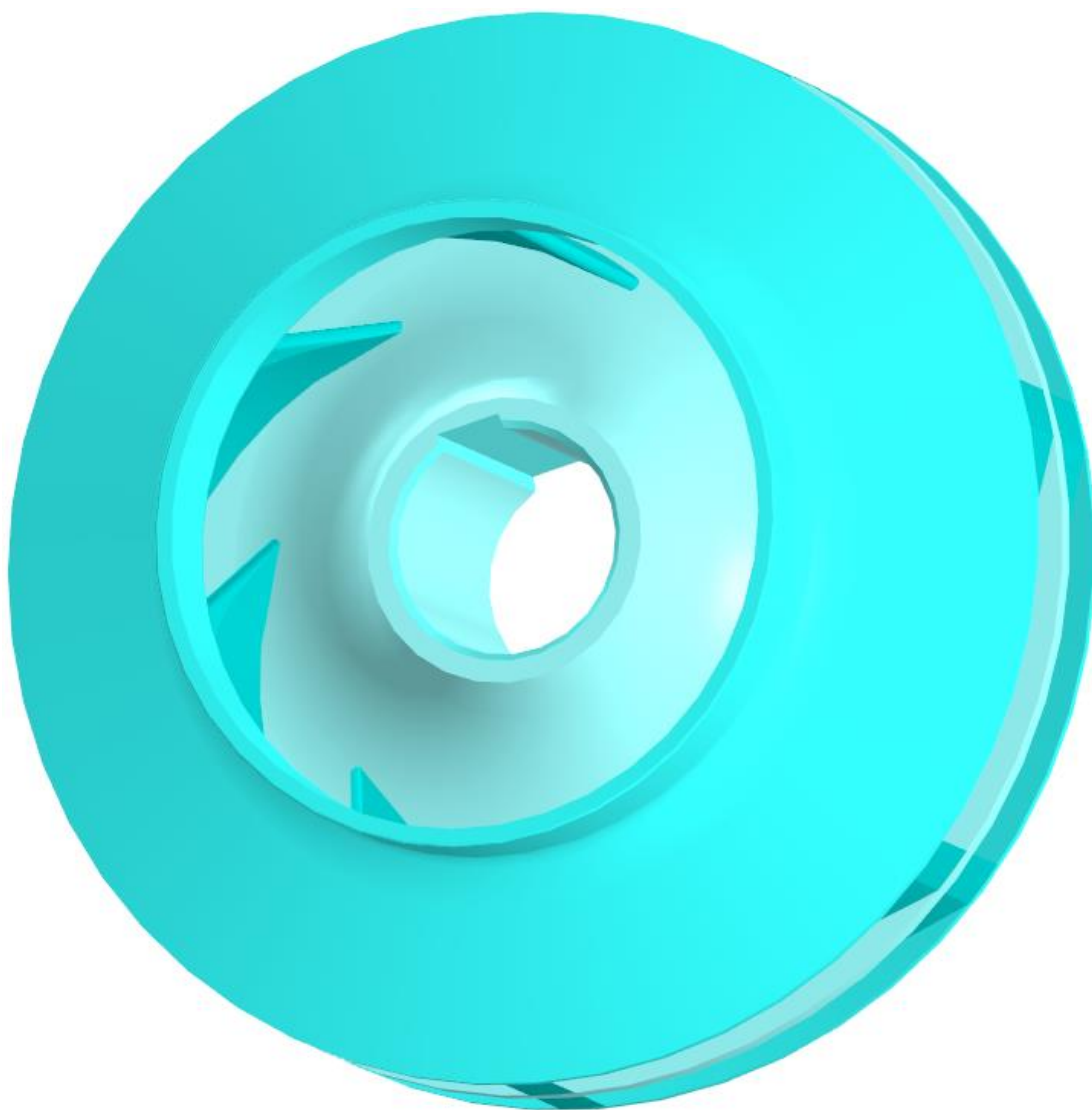


Рис. 3.6. 3D модель рабочего колеса

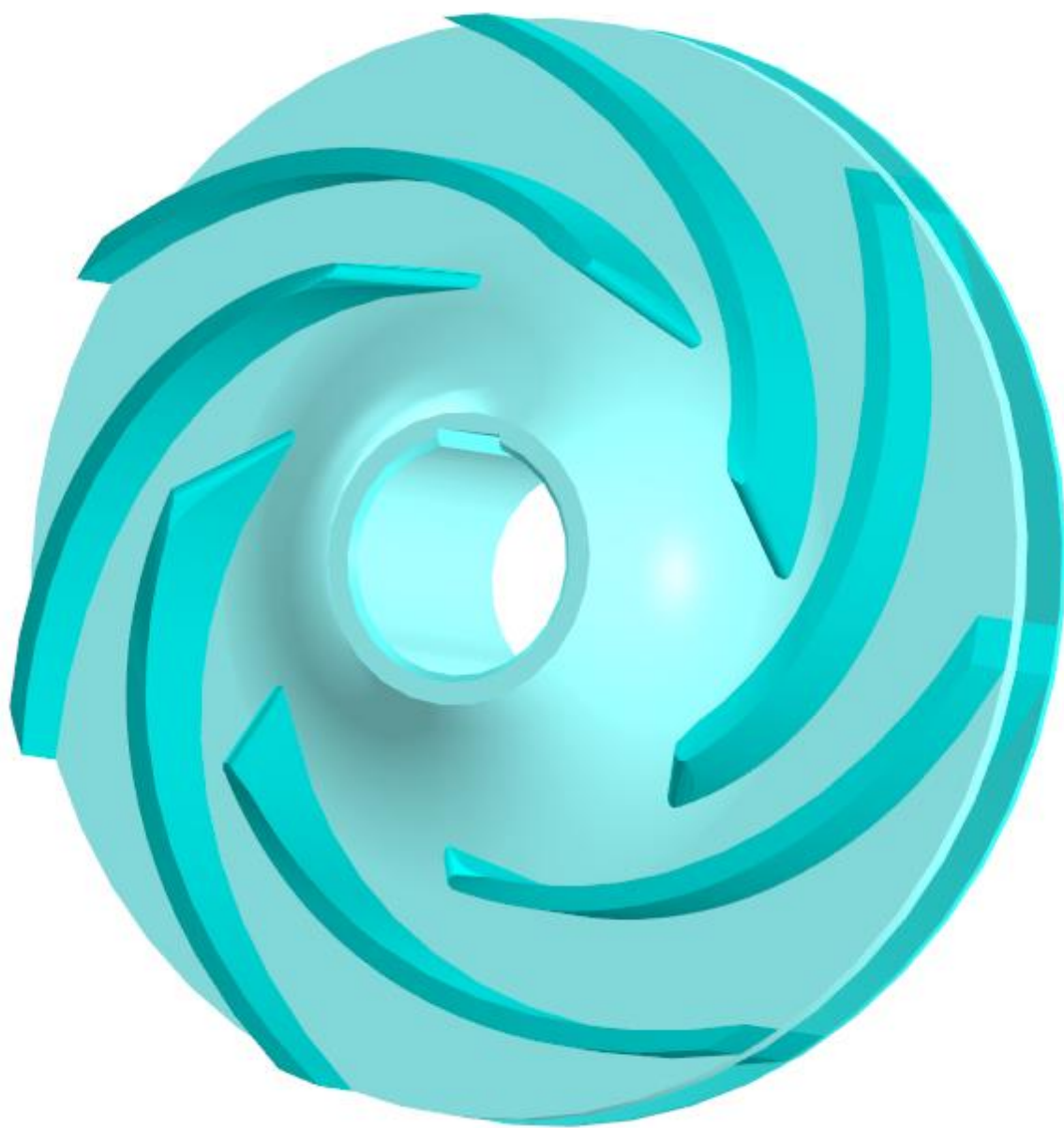


Рис. 3.7. 3D модель рабочего колеса без покрывного диска

#### 4. Расчёт направляющего аппарата

Вид направляющего аппарата выбираем аналогично прототипу, то есть канальный.

Отличительной чертой лопаточного отвода является наличие нескольких каналов. Каждый канал состоит из спиральной части и диффузора. Спиральная часть канала обычно выполняется постоянной ширины. Для обеспечения оптимальных условий течения в каналах направляющего аппарата должны быть соблюдены следующие условия:

- 1) при данной площади канала его гидравлический радиус должен быть максимальным. Этому условию лучше всего удовлетворяет квадратное сечение на входе в направляющий аппарат;
- 2) канал диффузора целесообразно выполнять с прямолинейными стенками;
- 3) число лопаток следует принимать минимальным;
- 4) угол раскрытия канала диффузора следует принимать равным углу раскрытия для прямолинейных диффузоров или меньшим;
- 5) угол лопатки имеет второстепенное значение по сравнению с оптимальным соотношением размеров колеса.

Контур лопатки должен следовать линиям тока потока.

##### 4.1 Расчет геометрии и параметров потока

Средняя скорость в горловом сечении:

$$C_3 = K_3 \cdot \sqrt{2g \cdot H} = 0,38 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 92} = 16,145 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

где  $K_3$  – опытный коэффициент, изменяющийся в зависимости от  $n_s$  (согласно рис.

5.3 методички).

Из графика  $K_3 = 0,38$ .

Диаметр начальной окружности:

$$D_3 = (1,03 \dots 1,05) \cdot D_2 = 1,038 \cdot 289 \approx 300 \text{ мм}$$

Принимаем ширину аппарата:

$$b_3 = 1,1 \cdot 2 \cdot (20,1 + 2 \cdot 5) = 66,2 \text{ мм}$$

Площадь горлового сечения на входе определяется следующим образом:

Согласно рекомендациям по соотношению числа лопастей рабочего колеса и НА принимаем  $Z_{\text{на}} = 12$ .

$$F_{\Gamma} = \frac{Q}{C_3 \cdot Z_{\text{на}}} = \frac{\frac{650}{3600}}{16,145 \cdot 12} = 0,000932 \text{ м}^2$$

Где:  $Z_{\text{на}}$  – число лопаток НА.

Ширина горлового сечения составит:

					КП–ИЯЭиТФ–14.05.02-(С17-АЭ)–17–2020-ПЗ	Лист
						34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$a_r = \frac{F_r}{b_3} = \frac{0,000932 \cdot 10^6}{66,2} \approx 14 \text{ мм}$$

Меридианная скорость потока на входе в НА без учета стеснения:

$$C_{m_3} = \frac{Q}{\pi \cdot D_3 \cdot b_3} = 2,9 \text{ м/с}$$

Окружная скорость потока на входе в направляющий аппарат:

$$C_{u_3} = C_{u_2} \cdot \left(\frac{D_2}{D_3}\right) = 23,1 \cdot \left(\frac{289}{300}\right) = 22,253$$

Угол потока на входе в направляющий аппарат без учета стеснения

$$\alpha_3 = \frac{180}{\pi} \cdot \arctan\left(\frac{C_{m_3}}{C_{u_3}}\right) = \frac{180}{3,14} \cdot \arctan\left(\frac{1,45}{22,253}\right) = 7,4^\circ$$

Для диффузора с прямоугольным горловым сечением и двумя параллельными боковыми стенками около  $10^\circ - 12^\circ$ , принимаем  $11^\circ$ .

Длину диффузора между лопатками следует принимать

$$L = 4 \cdot a_r = 14 \cdot 4 = 28 \text{ мм}$$

Рациональное увеличение проходного сечения в канале диффузора 1,6 – 2.

$$\text{Принимаем } a_b = (1,6 - 2) \cdot a_r = 1,785 \cdot 14 = 25 \text{ мм}$$

Диаметр наружной окружности НА принимаем  $D_4 = 386 \text{ мм}$ .

$$\frac{D_4}{D_2} = \frac{386}{289} = 1,34$$

#### 4.2 Профилирование лопаток направляющего аппарата

					КП–ИЯЭиТФ–14.05.02-(С17-АЭ)–17–2020-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

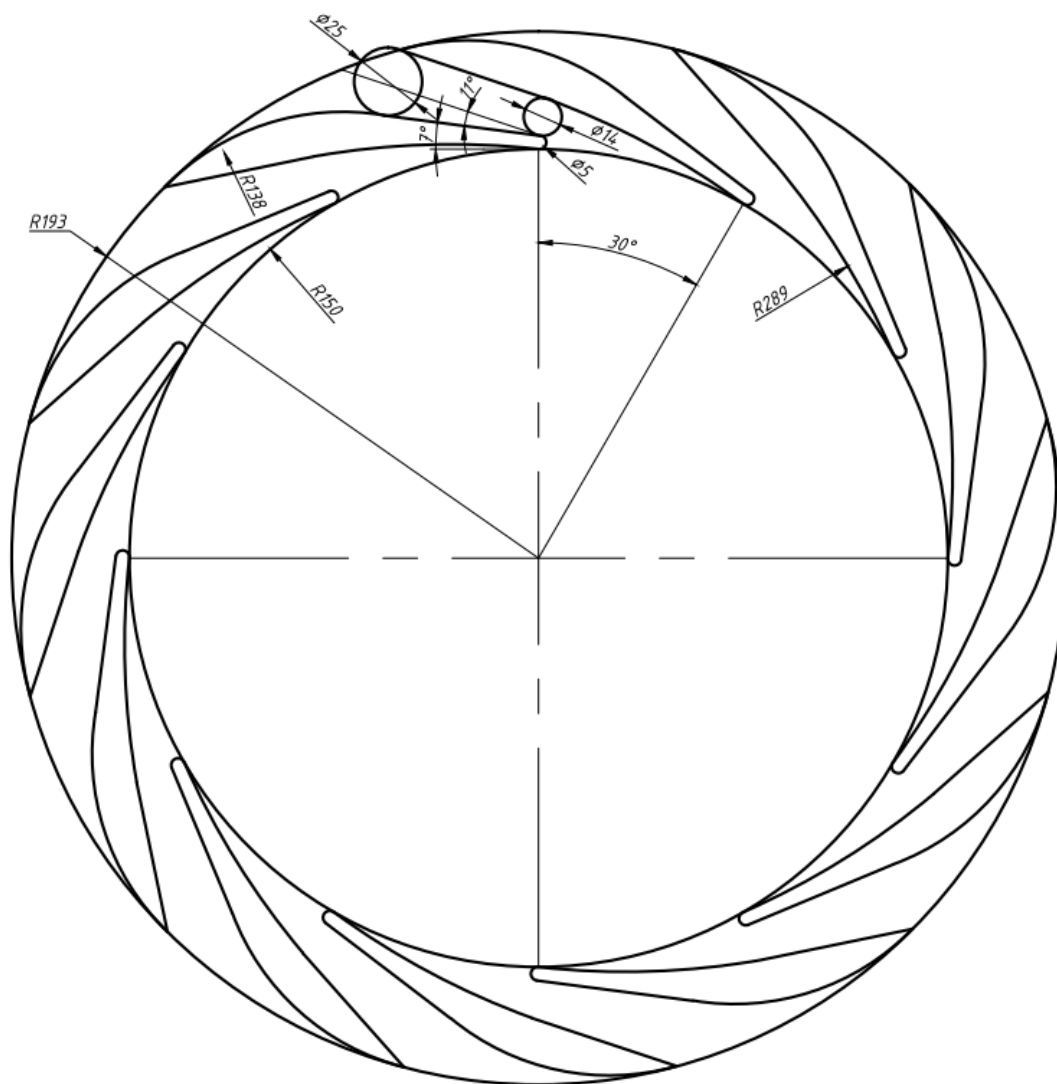


Рис 4.1. Эскиз направляющего аппарата



## 5. Эскиз проточной части насоса и чертеж рабочего колеса насоса

Эскиз проточной части насоса, был построен, ориентируясь на насос прототип, рисунок 5.1, чертеж рабочего колеса представлен на рисунке 5.2, а также в приложении 2.

### 5.1 Расчет размеров сборной камеры

Площадь меридианного сечения кольцевого коллектора должна быть больше площади входа в каналы направляющего аппарата не менее чем в 1,7 раза.

$$F_{\text{коллект}} = 12 \cdot 2 \cdot F_r = 12 \cdot 2 \cdot 0,000932 = 0,022368 \text{ м}^2$$

Радиус меридионального сечения кольцевого коллектора:

$$R_{\text{коллект}} = \sqrt{\frac{F_{\text{коллект}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,022368}{\pi}} = 0,085 \text{ м}$$

Наибольший диаметр кольцевого коллектора:

$$D_{\text{наиб}} = D_4 + 2 \cdot R_{\text{коллект}} = 386 + 2 \cdot 85 = 556 \text{ мм}$$

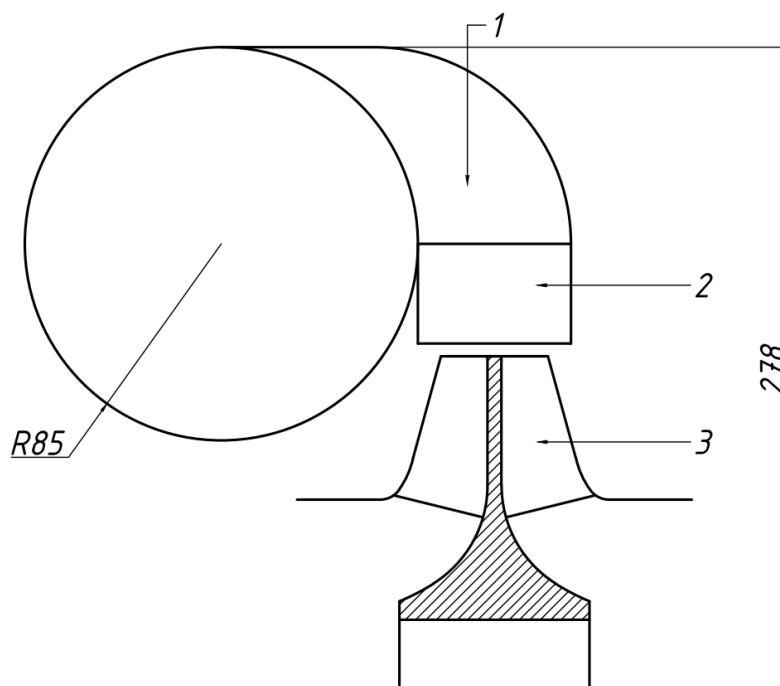


Рис. 5.1. Эскиз проточной части насоса. 1 – напорный коллектор, 2 – НА, 3 – РК

На основании проведенных расчетов разработан чертеж рабочего колеса насоса. Чертеж приведен в приложении 1.

## 6. Расчёт мощности проточной части насоса

При расчете мощности проточной части насоса надо учитывать, что насос работает не на номинальной подаче, а в рабочем диапазоне подач и мощность при увеличении подачи увеличивается примерно в 1,2 раза от номинальной мощности. Так же необходимо учесть то, что главные циркуляционные насосы, устанавливаемые на АЭС должны работать в широком температурном диапазоне при «холодном» и «горячем» теплоносителе. ГЦН работает на «холодном» теплоносителе, при первом пуске РУ.

Электродвигатель подбирается по максимальной мощности проточной части насоса с учетом механических потерь в насосе, причем мощность электродвигателя должна быть больше нее на 5-10%.

Далее значения сведем в таблицу 9. Значения КПД было взято из пункта 3.5.

Таблица 9 – Значения мощностей насосного агрегата

Значение	Величина
Полезная мощность, $N_{\text{п}}$ кВт	137,5
Гидравлический КПД, $\eta_g$	0,89
Механический КПД, $\eta_{\text{dt}}$	0,933
Объемный КПД, $\eta_{\text{ob}}$	0,971
КПД проточной части, $\eta$	0,806
Мощность проточной части, $N_{\text{пч}}$ кВт <ul style="list-style-type: none"> <li>при номинальной плотности (450°C, <math>\rho = 844 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}</math>)</li> <li>при максимальной плотности (100°C, <math>\rho = 902 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}</math>)</li> <li>при максимальной подаче</li> </ul>	170,5 182,2 204,6
Мощность на валу максимальная, $N_{\text{валmax}}$ кВт	195
Мощность электродвигателя, $N_{\text{дв}}$ кВт	210

## 7. Расчет осевой силы, действующей на осевой подшипник

Разрабатываемый насос вертикальный. Сила, воспринимаемая осевым подшипником, складывается из веса роторной сборки и гидравлических сил, действующих на элементы роторной сборки.

В данном случае в связи с тем, что в насосе применено рабочее колесо с двухсторонним всасом, будут отсутствовать осевые силы гидродинамического и статического происхождения, действующие на поверхности рабочего колеса, т.к. они будут взаимно уравниваться вследствие симметрии. Таким образом осевая сила на рабочем колесе будет определяться силой тяжести вала и рабочего колеса и разностью давления действующих на торцы вала - с одной стороны атмосферой, а с другой стороны давлением всаса.

Расчет будем вести, принимая что все элементы имеют одну плотность ( $\rho = 7900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ) и цилиндрическую форму.

Таким образом масса каждой ступени будет определяться как:

$$M = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \cdot \rho$$

Для полого участка вала:

$$M = \frac{\pi \cdot (D_{\text{внеш}}^2 - D_{\text{внутр}}^2)}{4} \cdot H \cdot \rho$$

Объем вала:  $V_{\text{вал}} = 0,114 \text{ м}^3$

Объем погруженной части вала:  $V_{\text{пог.вал}} = 0,05 \text{ м}^3$

Масса вала:  $M_{\text{вал}} = 906,93 \text{ кг}$

Масса лопасти:

$$V_{\text{лоп}} = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot l \cdot S = \frac{0,0392 + 0,0201}{2} \cdot 0,192 \cdot 0,005 = 2,156 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

$S$  – средняя толщина лопасти,  $l$  – длина лопасти,  $b_1$  – высота лопатки на входе,  $b_2$  – высота лопатки на выходе.

$$M_{\text{лоп}} = \rho \cdot V_{\text{лоп}} = 7900 \cdot 2,156 \cdot 10^{-5} = 0,170 \text{ кг}$$

Масса покрывного диска (рассчитываем приближенно, опираясь на упрощенные фигуры цилиндров и усеченных конусов):

$$V_{\text{пд}} = \frac{\pi}{4} (0,289^2 - 0,165^2) \cdot 0,003 + \frac{\pi}{4} (0,171^2 - 0,165^2) \cdot 0,012 + \frac{\pi}{4} (0,175^2 - 0,165^2) \cdot 0,02 = 2,001 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$M_{\text{пд}} = 2 \cdot \rho \cdot V_{\text{пд}} = 2 \cdot 7900 \cdot 2,001 \cdot 10^{-4} = 3,16 \text{ кг}$$

					КП–ИЯЭиТФ–14.05.02–(С17–АЭ)–17–2020–ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		39

Масса ведущего диска (рассчитываем приближенно, опираясь на упрощенные фигуры цилиндров и усеченных конусов):

$$V_{ВД} = \frac{\pi}{4} (0,289^2 - 0,0612^2) \cdot 0,003 + \frac{\pi}{12} ((0,177^2 + 0,177 \cdot 0,077 + 0,077^2) - 0,0612^2) \cdot 0,038 = 5,354 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$M_{ВД} = 2 \cdot \rho \cdot V_{ВД} = 2 \cdot 7900 \cdot 6,569 \cdot 10^{-4} = 8,46 \text{ кг}$$

Итоговая масса рабочего колеса:

$$M_{РК} = 2 \cdot 7 \cdot M_{ЛОП} + M_{ВД} + M_{ПД} = 14 \text{ кг}$$

При использовании программы Компас-3D для построения 3D геометрии рабочего колеса, получили массу  $M=13,57 \text{ кг}$ .

В итоге получим результат что масса роторной сборки  $M=920 \text{ кг}$ .

Сила тяжести (направлена вниз):

$$F_{тяж} = g \cdot M \cong 9025 \text{ Н}$$

Сила Архимеда, действующая на часть ротора в натриевом теплоносителе:

$$F_{арх} = \rho \cdot g \cdot V_{ПОГ} \cong 844 \cdot 9,81 \cdot 0,052 = 433 \text{ Н} = 44 \text{ кг}$$

Вес ротора в натриевом теплоносителе:

$$P_{рот} = 920 - 44 = 876 \text{ кг}$$

Выталкивающая сила на роторе:

$$F_{выт} = (P_{абс} - P_{атм}) \left( \frac{\pi \cdot D_{ср}^2}{4} \right) = 627 \text{ Н}$$

$D_{ср}$  – средний диаметр уплотнительного стыка

Таким образом осевая сила, действующая на осевой подшипник, определяется по формуле:

$$F_{ОС} = -F_{тяж} + F_{арх} + F_{выт} = -9025 + 433 + 627 = -7965 \text{ Н} \cong -8000 \text{ Н}$$

На рисунке 7.1 приведена схема вала для расчета осевой силы.

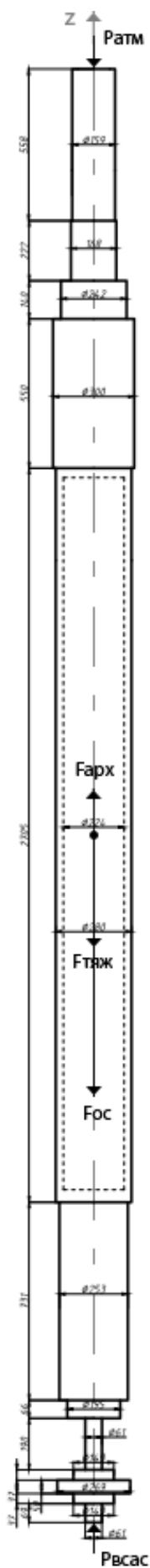


Рис. 7.1. Упрощенная схема вала

					КП-ИЯЭиТФ-14.05.02-(С17-АЭ)-17-2020-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

## 8. Расчет радиальной силы, действующей на радиальные подшипники

Радиальные гидравлические силы на рабочем колесе возникают при нарушении круговой симметрии параметров потока вокруг рабочего колеса. В разрабатываемой конструкции насоса применен лопаточный направляющий аппарат, который не нарушает круговую симметрию потока. Неравномерность потока в сборной камеры возникает из-за применения напорного патрубка. Однако принятые размеры сборной камеры исключают возникновение при этом существенных нарушений потока вокруг рабочего колеса. Поэтому в разрабатываемой проточной части радиальными гидравлическими силами на рабочем колесе пренебрегаем.

Остаточный небаланс роторной сборки принимаем равным 3% веса роторной сборки. ( $F_R=40$  кг)

					КП–ИЯЭиТФ–14.05.02-(С17-АЭ)–17–2020-ПЗ	Лист
						42
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 9. Расчет подшипниковых опор

Требования к подшипниковым опорам:

- высокая надежность на всех режимах работы, включая пуски и остановки, а также ресурс не менее 50 тыс. ч;
- работоспособность в среде с высокой температурой, давлением и возможным наличием мелких твердых частиц;
- отсутствие склонности материалов, применяемых для трущихся пар подшипников, к «самосвариванию» и «схватыванию» при аварийном отсутствии питающей жидкости;
- к деформациям и фазовым превращениям при температуре до 400°С, к изменению размеров при проведении дезактивации контура моющими растворами;
- используемые материалы должны быть в максимальной степени технологичными, дешевыми и взаимно совместимыми;
- нежелательно присутствие в материале подшипника элементов, которые под облучением в реакторе приобретают долгоживущую наведенную радиоактивность;
- недопустимо выделение из материалов подшипника коррозионно-опасных веществ (например, фтора);
- хорошая ремонтпригодность;
- относительно малая чувствительность к изменению нагрузки, к нарушению заданной соосности опор в процессе работы, достаточная вибростойкость;
- используемые для подшипников смазочно-охлаждающие жидкости должны быть огнестойкими и нетоксичными.

### 9.1 Расчет осевого подшипника

[7]

Осевой подшипник представляет собой пята Митчеля с самоустанавливающимися сегментами.

Осевая нагрузка:

$$P = 8000 \text{ Н (вниз)}$$

Частота вращения:

$$n = 2900 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

Внутренний диаметр подшипника:

$$d_1 = 280 \text{ мм}$$

Наружный диаметр подшипника:

$$d_2 = 400 \text{ мм}$$

					КП–ИЯЭиТФ–14.05.02-(С17-АЭ)–17–2020-ПЗ	Лист
						43
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Число колодок:

$$S = 8$$

Система смазки принудительная. Масло турбинное Т-22. Принимаем температуру смазки на входе по все подшипники  $t_{\text{вх}} = 50^\circ\text{C}$ . При этом масло имеет следующие физические характеристики:

$$\lambda = 0,1265 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кДж}}{\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К}}$$

$$c_p = 1,96 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\rho = 876 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\mu = 1,87 \cdot 10^{-2} \text{Па} \cdot \text{с}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1,87 \cdot 10^{-2}}{876} = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

Удельная нагрузка на кольцевую пятю:

$$p_m = \frac{4 \cdot |F_z| \cdot g}{\pi \cdot (d_{\text{нар}}^2 - d_{\text{вн}}^2) \cdot \xi} = \frac{4 \cdot 8000 \cdot 9,81}{\pi \cdot (0,4^2 - 0,28^2) \cdot 0,91} = 1,4 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} < 2,5 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$$

где  $\xi = 0,91$  - коэффициент использования упорной поверхности.

Ширина колодки в радиальном направлении:

$$B = \frac{d_2 - d_1}{2} = \frac{40 - 28}{2} = 6 \text{ см}$$

Фактическая длина колодки по окружности середины поверхности скольжения:

$$L = \xi \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{ср}}}{8} = 0,91 \cdot \frac{\pi \cdot 34}{8} = 12,15 \text{ см}$$

Нагрузка на одну колодку:

$$P_s = \frac{P}{S} = \frac{8000}{8} = 1000 \text{ Н}$$

Подъемная сила на единицу ширины сектора:

$$P_1 = \frac{P_s}{B} = \frac{1000}{6} = 166,7 \frac{\text{Н}}{\text{см}}$$

Определяющий размер колодки:

$$\frac{L}{B} = \frac{12,15}{6} = 2,025 \cong 2$$

Диаметр приложения равнодействующей сил трения:

$$d_f = d_1 + 0,7 \cdot B = 0,28 + 0,7 \cdot 0,06 = 0,284 \text{ м}$$

Окружная скорость на диаметре  $d_f$ :

$$v_m = \frac{\pi \cdot d_f \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,284 \cdot 2900}{60} = 42,8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

					КП–ИЯЭиТФ–14.05.02–(С17–АЭ)–17–2020–ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44



По рекомендациям для определяющего размера колодки [7] определяем следующие безразмерные параметры:

Коэффициент подъемной силы:  $D=0,005$

Коэффициент касательной силы:  $H=4,1$

Коэффициент расхода смазки:  $V_i = 0,155$

Коэффициент трения

$$\mu_f = H \cdot \left( \frac{\mu \cdot v_m}{100 \cdot P_1} \right)^{\frac{1}{2}} = 4,1 \cdot \left( \frac{1,87 \cdot 10^{-2} \cdot 42,8}{100 \cdot 166,7} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,03$$

Сила трения на все колодки

$$T = \mu_f \cdot P = 0,03 \cdot 8000 = 240 \text{ Н}$$

Мощность трения на всю пяту

$$N = T \cdot v_m = 240 \cdot 42,8 \cong 11 \text{ кВт}$$

Количество смазки, подсасываемое по входной кромке на все 8 колодок, без учета центробежного эффекта

$$Q = 100 \cdot S \cdot v \cdot L \cdot B \cdot V_i \cdot \mu_f = 100 \cdot 8 \cdot 42,8 \cdot 10,3 \cdot 12,15 \cdot 40 \cdot 0,155 \cdot 10^{-6} = 0,0084 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \cong 30,24 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

С учетом дополнительных протечек берется полуторный запас:

$$Q = 45,46 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

Минимальная толщина несущего смазочного слоя

$$h_1 = L \cdot \sqrt{6 \cdot D} \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot v}{P_1}} = 12,15 \cdot \sqrt{6 \cdot 0,005} \cdot \sqrt{\frac{1,87 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 10}{166,7}} = 0,01 \text{ мм}$$

## 9.2 Расчет радиального подшипника с цилиндрической расточкой

Радиальный подшипник представляет собой 2 втулки: закрепленную герметично на валу и закрепленную соосно с ней на корпусе осевого подшипника ответную втулку. Расчет данного подшипника будем вести по методике изложенной в [7, с.72 - с.83]. Поэтому по рекомендации выбираем следующие размеры.

					КП–ИЯЭиТФ–14.05.02-(С17-АЭ)–17–2020-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

49. ЗНАЧЕНИЯ  $\psi$   
В ЗАВИСИМОСТИ  
ОТ УСЛОВИЙ РАБОТЫ

$p_m \cdot 10^{-6}$ , Па	$v$ , м/с	$\psi \cdot 10^3$
$>100$	$\leq 10$	$0,5-1,0$
$<100$	$\leq 5$	$1,0-2,0$
30	$>10$	$1,1-4,0$

50. ЗНАЧЕНИЯ  $\frac{l}{d}$

Место установки подшипника	$\frac{l}{d}$
Паровые турбины и турбогенераторы	0,6—1,9
Электродвигатели	0,8—1,8
Редукторы зубчатые и червячные	0,8—1,2
Транспортеры и рольганги	0,8—1,0
Передачи ременные и цепные тихоходные	0,8—1,5
Компрессоры и насосы центробежные	0,6—1,2
Сепараторы, центрифуги	0,5—0,8
Буксы вагонов	1,4—2,0
Самоустанавливающиеся подшипники трансмиссий	2,5—4,0

Рисунок 9.1. Рекомендации к выбору основных размеров подшипника

Исходные данные для расчёта:

Диаметр втулки вала  $d = 200$  мм

Длина подшипника  $l = 128$  мм

Частота вращения вала  $\omega = 2900 \frac{\text{об}}{\text{мин}} = 300 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$

$P = 400H = 40$  кгс

Угол охвата вкладыша  $\alpha_K = 360^\circ$ ;

Сорт смазки: масло турбинное Т-22;

Температура смазки  $t_C = 40^\circ\text{C}$ ;

Теплоёмкость смазки  $c = 1930 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ ;

Плотность смазки  $\rho = 880 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;

Относительный зазор:

$$\psi = 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[4]{8,35} = 3 \cdot 10^{-3}$$

Радиальный зазор:

$$\Delta = \psi \frac{d}{2} = 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{160}{2 \cdot 1000} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

Размеры питающего кармана:

$a = 28$  мм

$b = 56$  мм

Удельная нагрузка:

$$p_m = \frac{F_R}{l \cdot d} = \frac{40}{12,8 \cdot 20} = 0,156 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$$

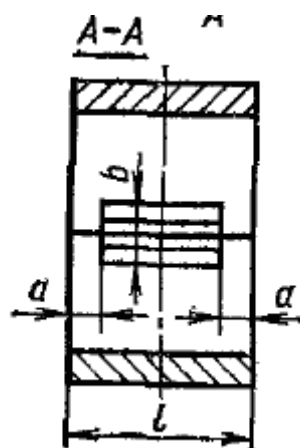


Рис. 9.2. Схема размеров питающего кармана

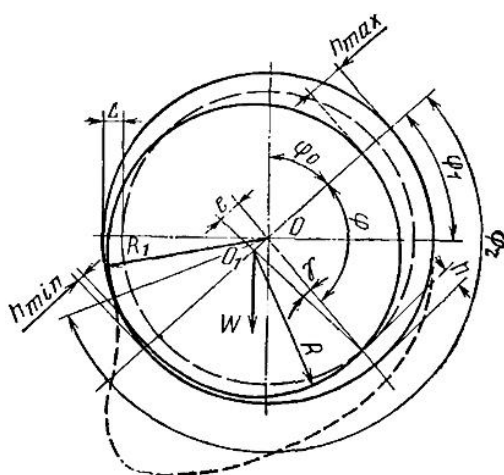


Рис. 9.3. Схема подшипника с цилиндрической расточкой

Дальнейшие расчёты приведены в таблице 10.

Таблица 10 - Расчёт радиального подшипника

Определяемый параметр	Расчётная зависимость	Результаты вычислений при различных значениях $\mu_{\text{ср}}$ для итераций		
		1	2	3
Вязкость смазки при средней температуре в смазочном слое $\mu_{\text{ср}}$ , Па·с	Задаётся произвольно	0.005	0.010	0.015
Коэффициент нагруженности $\zeta$	$\zeta = \frac{F_{\text{раб}} \cdot \psi^2}{l \cdot d \cdot \omega \cdot \mu}$	2.109	1.055	0.703
Относительный эксцентриситет $\chi$	[7, стр. 74]	0.84	0.75	0.62
Коэффициент торцевого расхода смазки $q_1$	[7, стр. 79]	0.317	0.302	0.242
Окружной расход смазки $q_0$	[7, стр. 83]	0.045	0.068	0.09

Определяемый параметр	Расчётная зависимость	Результаты вычислений при различных значениях $\mu_{cp}$ для итераций		
		1	2	3
Окружной расход, определяемый количеством налипшей смазки $q_0$	$q_0 = \frac{0.375}{\Delta} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\rho \cdot \omega}}$	0.172	0.243	0.298
Коэффициент сопротивления шипа вращению $\xi$	[7, стр. 85]	6.3	5.02	4.07
Приращение температуры в смазочном слое, $\Delta t$ , °C	$\Delta t = \frac{\xi \cdot \omega \cdot \mu}{\rho \cdot c \cdot \psi^2 \cdot q_1}$	1.95	3.262	4.951
Температура смазки на входе в смазочный слой, $t$ , °C	$t_{ex} = t_0 + \frac{\Delta t \cdot q_0}{q_1}$	40.277	40.702	41.841
Средняя температура смазки в зазоре, $t_{cp}$ , °C	$t_{cp} = t_0 + \frac{\Delta t}{2}$	40.975	41.631	42.476
Максимальная температура, $t_{max}$ , °C	$t_{0max}$	41.95	43.262	44.951
Минимальная толщина смазочного слоя, $h_{min}$ , мкм	$h(1 - \chi)_{min}$	480	750	1140
Коэффициент $\beta$	[7, стр. 89]	0.5	0.46	0.4
Коэффициент $q_2$	$q_2 = \frac{\beta \cdot \zeta \cdot d^2}{l^2}$	2.575	1.184	0.687
Коэффициент $v_1$	[7, стр. 90]	0.128	0.132	0.126
Коэффициент $q_3$	$q_3 = v_1 \cdot \zeta \cdot \left(\frac{d}{l}\right)^2 \cdot \frac{b}{d} \cdot \left(\frac{l}{a} - 1\right)$	0.659	0.34	0.216
Расход смазки, необходимый для обеспечения работоспособности опоры, $Q$ , м³/с	$Q = 0.5 \cdot \omega \cdot \psi \cdot l \cdot d \cdot (q_1 + \dots + q_2 + q_3)$	0.0041	0.0021	0.0013
Потери мощности на трение в подшипнике, $N$ , кВт	$N = \frac{\xi \cdot \omega^2 \cdot d^3 \cdot l \cdot \mu}{2 \cdot \psi} \cdot 10^{-3}$	0.484	0.771	0.938

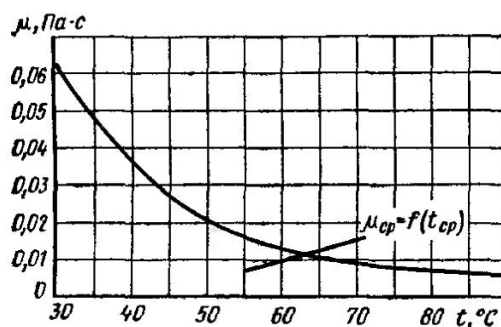


Рис. 9.4. График определения средней динамической вязкости смазки

Проверим работоспособность подшипника, для этого вберем значения параметров, вычисленных для  $\mu = 0,005 \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

Проверка толщины смазочного слоя:

$$h_{кр} = 1,595 \cdot d \cdot \left( \left( \frac{l}{d} \right)^2 + 1,81 \right) \cdot \left( \frac{l}{d} \right)^2 \cdot p_m \cdot 10^{-3}$$

где  $p_m$  - удельная нагрузка на опору, Па.

$$h_{кр} = 1,595 \cdot 0,16 \cdot 2,45 \cdot 0,8^2 \cdot 15600 \cdot 10^{-3} = 175 \text{ мкм}$$

Т.к.  $h_{min} = 480 \geq h_{кр} = 175$  и  $t_{max} = 44,951^\circ\text{C} \leq t_{доп} = 130^\circ\text{C}$  значит, что подшипник будет работать нормально.

Мощность на трение (из таблицы):

$$N \approx 0,9 \text{ кВт}$$

### 9.3 Расчет гидростатодинамического подшипника

Диаметр вала  $d = 252 \text{ мм}$

Ширина буртика  $l = 477 \text{ мм}$

Длина дросселя  $l_1 = 39 \text{ мм}$

Зазор радиальный  $\delta_1 = 1 \text{ мм}$

Радиальная нагрузка  $P_1 = 400H = 40 \text{ кгс}$

Подшипник питается натрием под давлением, создаваемым рабочим колесом насоса. Напор на выходе из рабочего колеса насоса равен 90 м. ст. На. Температура натрия при номинальном режиме равна  $300^\circ\text{C}$ , при этом натрий имеет следующие физические свойства [9]:

$$\rho = 845 \frac{\text{кгс}}{\text{м}^3}$$

$$\lambda = 59,1 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$C_p = 0,304 \frac{\text{ккал}}{\text{кгс} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\nu = 30,68 \cdot 10^{-8} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

Удельная нагрузка:

$$p_m = \frac{F_R}{l \cdot d} = \frac{40}{47,7 \cdot 25,2} = 0,03 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$$

Определение потерь напора по трассе питания подшипника от рабочего колеса до дросселя:

1. Вход в канал и выход из канала до дросселя:

$$\xi_1 = 0,5 + 0,6 = 1,1$$

					КП-ИЯЭиТФ-14.05.02-(С17-АЭ)-17-2020-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

2. 2 плавный поворота на  $90^0$  с соотношением  $\frac{d}{r} \approx 0,7$  [10]:

$$\xi_2 = 0,5$$

3. Трение:

Длина канала до дросселя:

$$l = 740_{мм}$$

Диаметр сверления:

$$d = 30_{мм}$$

Коэффициент трения:

$$\lambda = 0,03$$

$$\xi_3 = \lambda \cdot \frac{l}{d} = 0,03 \cdot \frac{740}{30} = 1,179$$

Суммарный коэффициент сопротивления:

$$\xi = 1,1 + 0,5 + 1,179 = 2,679$$

Принимаем расход натрия на питание подшипника:

$$Q = 42 \frac{м^3}{ч} = 0,012 \frac{м^3}{с}$$

Площадь сверления:

$$f = 0,785 \cdot d^2 = 0,785 \cdot \left(\frac{30}{1000}\right)^2 = 0,000706_{м^2}$$

Скорость потока в сверлении:

$$V = \frac{Q}{f} = \frac{0,012}{0,000706} = 16,51 \frac{м}{с}$$

Потери напора:

$$\Delta H = \xi \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} = 2,679 \cdot \frac{16,51^2}{19,6} = 31,04_{м}$$

Принимаем  $\Delta H = 31$  м. Тогда в камере перед дросселем будет напор равный 59 м.

Коэффициент динамической вязкости смазки:

$$\mu_{ср} = 0,912 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Число камер:

$$П = 12$$

Для  $П = 12$  по графикам значений [8, с.275] находим, что:

Коэффициент грузоподъемности в направлении на перемычку:

$$\theta_1 = 0,15$$

В направлении на рабочую поверхность:

$$\theta_2 = 0,21$$

					КП–ИЯЭиТФ–14.05.02-(С17-АЭ)–17–2020-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

Коэффициент, характеризующий отношение сопротивления щели к сопротивлению дросселя:

$$t_{onm} = 0,028$$

Оптимальный диаметр дросселя определяем из уравнения:

$$t_{onm} = \frac{1,5 + \lambda \cdot \frac{l}{2 \cdot \delta_1}}{1,5 + \frac{l_1}{d_1}} \cdot \left( \frac{\pi \cdot \frac{d_1^2}{4}}{\frac{4 \cdot \pi \cdot \nu \cdot \delta_1}{n \cdot D}} \right)^2 = \frac{1,5 + 0,03 \cdot \frac{740}{2 \cdot 1}}{1,5 + \frac{39}{d_1}} \cdot 9 \cdot 10^{-6} \cdot d_1^4 =$$

$$= \frac{7,789 \cdot 10^{-5}}{1,5 + \frac{39}{d_1}} \cdot d_1^4$$

Решая его получаем, что  $d_1 = 7 \text{ мм}$

Определяем расход натрия через подшипник:

$$Q_1 = 2 \cdot \pi \cdot d \cdot \delta_1 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H}{\left(1,5 + 0,03 \frac{l}{\delta_1}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{t_{onm}}\right)}} =$$

$$= 2 \cdot \pi \cdot 0,30 \cdot 0,001 \cdot \sqrt{\frac{19,6 \cdot 59}{\left(1,5 + 0,03 \cdot \frac{0,740}{0,001}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{0,028}\right)}} = 0,001 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Максимальная грузоподъемность подшипника при направлении силы «на перемычку»

$$G_1 = \theta_1 \cdot \rho \cdot H \cdot d \cdot l = 0,15 \cdot 844 \cdot 59 \cdot 0,007 \cdot 0,477 = 898 \text{ кг}$$

Рабочий эксцентриситет

При рабочей нагрузке  $P_1 = 400 \text{ Н} = 40 \text{ кгс}$  требуемый коэффициент грузоподъемности

$$\theta = \frac{P_1}{\rho \cdot H \cdot d \cdot l} = \frac{40}{881 \cdot 44 \cdot 0,45 \cdot 0,477} = 0,15$$

Таким коэффициентам грузоподъемности при действии силы «на перемычку» соответствуют относительные эксцентриситеты:

$$\chi = 0,7$$

Зазор между валом и втулкой:

$$h = (1 - \chi_1) \cdot \delta_1 = (1 - 0,7) \cdot 1 = 0,3 \text{ мм}$$

Тепловыделение от трения:

$$Q_f = 9,86 \cdot d^3 \cdot l \cdot \frac{\mu_{cp}}{2\delta} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot \left[ 1 + \lambda_k \cdot v_k \left( \frac{4\delta}{h_k} - 1 \right) \right] \approx 1,1 \text{ кВт}$$

					КП-ИЯЭиТФ-14.05.02-(С17-АЭ)-17-2020-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		51

Необходимо сделать заключение, что несмотря на то, что гидростатодинамический подшипник был спроектирован и рассчитан для насоса ЦНН-1М, устанавливать его в данный насосный агрегат не следует в следствии того, что перекачиваемой средой является среда жидкого натрия, которая в своем составе имеет взвеси. Из-за этого возникает вероятность забивания дросселей подшипника. Данная проблема решается путем применения гидростатического подшипника с обратнo щелевым дросселированием, конструкция которого на входе обладает щелью. В виду геометрических характеристик дросселя и щели вероятность забивания взвесями первого выше. Поэтому в среде жидкого натрия подшипник обратнo щелевого дросселирования будет работать надежнее. [3, с.75 - с.79]

					КП–ИЯЭиТФ–14.05.02-(С17-АЭ)–17–2020-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52



## 10. Расчет выбранной прокладки главного разъема

[8]

Главный разъем уплотняется усиковым швом, который в случае демонтажа срезается.

Предварительный расчёт числа шпилек

Определение усилий, действующих на шпильки

Давление среды в корпусе насоса, кгс/см<sup>2</sup>:

$$p = 2$$

Диаметр по сварке, см:

$$D_c = 120$$

Усилие от давления среды по диаметру сварки в рабочих условиях, кгс:

$$P_{дс} = p \cdot \frac{\pi D_c^2}{4} = 22620$$

Усилие начальной затяжки шпилек, кгс:

$$P_0 = 1,2 P_{дс} = 27140$$

Давление, создаваемое действием среды по диаметру сварки при гидроиспытаниях, кгс/см<sup>2</sup>:

$$p_{гид} = 1,25p = 2,5$$

Усилие от давления среды по диаметру сварки при гидроиспытаниях, кгс:

$$P_{гид} = p_{гид} \cdot \frac{\pi D_c^2}{4} = 27145$$

Определение усилий, действующих на шпильки. Принимаем тепловое усилие:

$$P_t = 0.$$

Коэффициент внешней нагрузки:

$$x = 0,15$$

Усилие, действующее на шпильки при начальной затяжке, кгс:

$$P_B = P_0 = 27140$$

Усилие, действующее на шпильки в рабочих условиях, кгс:

$$P_B = P_0 + x P_{дс} = 27148$$

Усилие, действующее на шпильки при гидроиспытаниях, кгс:

$$P_B = P_0 + x P_{гид} = 31214$$

Предел текучести материала шпильки (Ст. 20 ГОСТ 1050-88 М42), кгс/см<sup>2</sup>:

$$[\sigma] = 2500$$

Максимальное усилие, действующее на шпильку, кгс:

$$P_B^{max} = \max(P_B, P_0) = 31214$$

					КП–ИЯЭиТФ–14.05.02–(С17–АЭ)–17–2020–ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

Наименьший диаметр шпильки, см:

$$d = 4$$

Количество шпилек:

$$z = \frac{4P_B^{max}}{\sigma \pi d^2} = 9,94$$

Принимаем  $z = 10$ .

Определение температурного усилия  $P_t$ , кгс.

Определение податливости соединения.

Податливость шпильки, см/кгс:

$$\lambda_\delta = \frac{4}{\pi E_\phi Z} \left( \frac{\frac{h_1}{3} + h_2 + h_3 + \frac{h_5}{3}}{d_{cp1}^2 - d_{cp0}^2} + \frac{h_4}{d_{cp2}^2 - d_{cp0}^2} \right) =$$
$$= \frac{4}{\pi \cdot 1,82 \cdot 10 \cdot 10^6} \left( \frac{\frac{2,9}{3} + 0,7 + 4,3 + \frac{10,9}{3}}{4,2^2 - 1^2} + \frac{23,9}{4^2 - 1^2} \right) = 1,166 \cdot 10^{-7}$$

Податливость свободного фланца на изгиб, см/кгс:

$$\lambda_\phi^{из} = 0,48 \frac{\left( D_6 - D_{6н} + \frac{D_{6н} - D_{6в}}{3} \right)^2}{E_\phi h^3 \ln \left( \frac{D_{нф}}{D_{вф}} \right)} = 0,48 \frac{\left( 130 - 116 + \frac{116 - 109}{3} \right)^2}{1,98 \cdot 10^6 13,5^3 \ln \left( \frac{141,6}{109} \right)} =$$
$$= 6,691 \cdot 10^{-9}$$

Податливость гайки, см/кгс:

$$\lambda_\Gamma = \frac{4l_\Gamma}{\pi E_\Gamma Z} \left( \frac{1}{(d_3^2 - d_2^2)} \right) = \frac{4 \cdot 2,9}{\pi \cdot 1,82 \cdot 10 \cdot 10^6} \left( \frac{1}{(7,7^2 - 4,2^2)} \right) = 4,871 \cdot 10^{-9}$$

Податливость всех элементов соединения, см/кгс:

$$\lambda = \frac{1}{1 - x} (\lambda_\delta + \lambda_\phi^{из}) = 1,963 \cdot 10^{-7}$$

Принимаем, что ни у одной детали соединения во время работы усилие не уменьшается. Разность температур между рабочей и монтажной для всех элементов, °С:

$$t_{\phi i} = 50$$

Коэффициент температурного расширения, 1/К:

$$\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6}$$

$$P_t = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_{\phi i} t_{\phi i} l_{\phi i} - \sum_{i=1}^n \alpha_{bi} t_{bi} l_{bi}}{\sum_{i=1}^m \lambda_t} = 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \left( \frac{13,5 + 15,68}{1,18 \cdot 10^{-6}} \right) = 85470$$

Окончательный расчёт числа шпилек

Начальная затяжка, кгс:

$$P_B = P_0 = 27140$$

					КП-ИЯЭиТФ-14.05.02-(С17-АЭ)-17-2020-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54

Усилие, действующее на шпильки в рабочих условиях, кгс:

$$P_B = P_0 + xP_{дс} + P_t = 116025$$

Усилие, действующее на шпильки при гидроиспытаниях, кгс:

$$P_B = P_0 + xP_{гид} = 31214$$

Определение усилий, действующих на уплотнительные поверхности.

Усилие, действующее на шпильки при начальной затяжке, кгс:

$$P_{пр} = P_0 = 27140$$

Усилие, действующее на уплотнительные поверхности в рабочих условиях, кгс:

$$P_{пр} = P_0 - (1 - x)P_{дс} + P_t = 93380$$

Усилие, действующее на уплотнительные поверхности при гидроиспытаниях, кгс:

$$P_{пр} = P_0 - (1 - x)P_{гид} = 7917$$

Определение числа шпилек.

Максимальное усилие, действующее на шпильку, кгс:

$$P_{пр}^{max} = \max(P_B, P_0) = 116025$$

$$z = \frac{4P_{пр}^{max}}{\sigma\pi d^2} = 13,26$$

Окончательно принимаем:

$$z = 14$$

Эскиз разъемного соединения с размерами показан на рисунке 10.1.

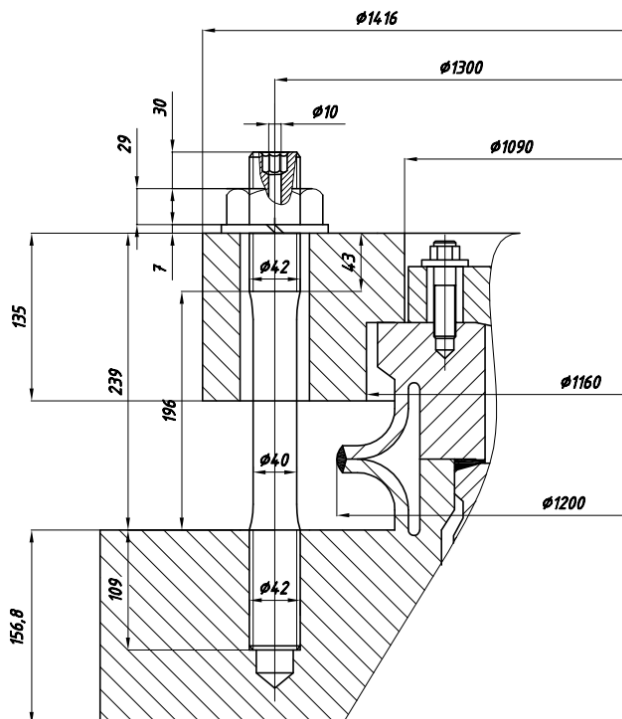


Рисунок 10.1. Эскиз главного разъёма

					КП-ИЯЭиТФ-14.05.02-(С17-АЭ)-17-2020-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55

## 11. Расчет шпонки под рабочим колесом

По расчётному диаметру вала  $D = 61,2$  мм под втулкой рабочего колеса выбираем шпонку призматическую 45х25х340 ГОСТ 23360-78.

Шпонка под рабочим колесом показана на рисунке 11.1

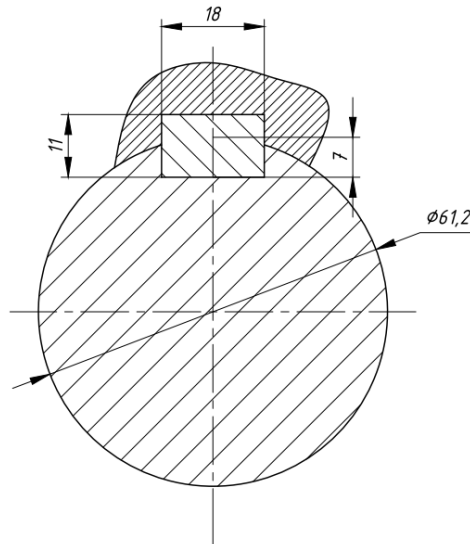


Рис. 11.1 Шпонки под рабочим колесом

Ширина шпонки  $b = 18$  мм

Высота шпонки  $h = 11$  мм

Длина шпонки  $l = 68$  мм

Глубина паза на валу  $t_1 = 7$  мм

Глубина паза втулки  $t_2 = 4,4$  мм

$M_{кр} = 680$  Н · м

Рабочая длина шпонки:

$$l_{раб} = l - b = 68 - 18 = 50$$

Площадь смятия:

$$F_{см} = (h - t_1) \cdot l = (11 - 7) \cdot 68 = 272 \text{ мм}^2 = 0,272 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Напряжения смятия:

$$\sigma_{см} = \frac{2 \cdot M_{кр}}{D \cdot F_{см}} = \frac{2 \cdot 680}{0,0612 \cdot 0,272 \cdot 10^{-3}} = 81,7 \text{ МПа}$$

Проверка условия прочности

При втулке, выполненной из стали 45  $[\sigma]_{см} = 130 \div 150$  Примем  $[\sigma_{см}] = 140$  МПа

$$\sigma_{см} = 81,7 \text{ МПа} < [\sigma_{см}] = 140 \text{ МПа}$$

Условие прочности выполнено.

					КП-ИЯЭиТФ-14.05.02-(С17-АЭ)-17-2020-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

## 12. Список использованной литературы

1. Маргулова Т.Х. «Атомные электрические станции», М.: Высшая школа, 1978г
2. Будов В.М. «Насосы АЭС», Москва, Энергоатомиздат, 1986г
3. Митенков Ф.М., Новинский Э.Г., Будов В.М. «Главные циркуляционные насосы АЭС», Москва, Энергоатомиздат, 1990г
4. Новинский Э. Г. «Насосы и газодувные машины. Курс лекций», НГТУ, 2010г.
5. Алымов А.Г., Новинский Э.Г. «Гидравлический расчёт проточной части центробежных насосов для АЭУ», Нижний Новгород, 2015г
6. Лапшин Р.М. Расчёт проточной части центробежного насоса: Методические указания к курсовому и дипломному проектированию по дисциплине «Насосы и компрессоры ЯЭУ». Г.: ГПИ, 1988г
7. Воскресенский В.А., Дьяков В.И. «Расчёт и проектирование опор скольжения», Москва, Машиностроение, 1980г
8. Справочник по расчёту на прочность элементов конструкций энергетического оборудования. Под научной редакцией д.т.н. Митенкова Ф.М., Горький, 1975г
9. Андреев В.В., Ульянов А.А. «Детали машин и основы конструирования» Курсовое проектирование, Нижний Новгород, 2013г
10. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. «Справочник по теплогидравлическим расчетам», Энергоатомиздат, 1990г.
11. Ломакин А. А. «Центробежные и осевые насосы» М.-Л.: Машиностроение, 1966г
12. Дмитриев С.М., Хробостов А.Е. «Краткий курс теплообмена», НГТУ, Нижний Новгород, 2008г.
13. Андреев, Ульянов «Детали машин и основы конструирования» Курсовое проектирование, Н. Новгород, НГТУ, 2010г.
14. Волошилин С.А. «Реактор на быстрых нейтронах БОР – 60», Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов, Димитровград, <http://www.niiar.ru/?q=node/101>

## Приложение А. Результаты программы MathCad «Расчет геометрии рабочего

колеса»

### Исходные данные:

Подача, м <sup>3</sup> /ч	$Q \equiv 650$
Напор, м	$H \equiv 92$
Расп. кав. запас, м	$\Delta H_{\text{рас}} \equiv 15.7$
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$\rho \equiv 844$

### Принимаем:

Количество ступеней	$Z_{\text{ст}} \equiv 1$
Количество потоков	$Z_{\text{пот}} \equiv 2$
Скольжение, %	$S \equiv 3.33$
Синхронная частота, об/мин	$n_{\text{син}} \equiv 3000$
Козфф. Скр (= 0, при расчете f(ns))	$C_{\text{кр}} \equiv 0$

### Результаты расчета

Частота вращения, об/мин	$n = 2900.1$
Коэффициент быстроходности одной ступени и одного потока	$ns = 107$
КПД проточной части	$\eta = 0.806$
Мощность проточной части, кВт	$N = 170.5$
Кавитационный коэффициент Скр	$C_{\text{кр}} = 771$
Критический кав. запас, м	$\Delta H_{\text{кр}} = 11.77$
Допускаемый кав. запас, м	$\Delta H_{\text{доп}} = 14.1$
Отношение	$\frac{\Delta H_{\text{рас}}}{\Delta H_{\text{кр}}} = 1.3$

### Варьируемые параметры

#### Рекомендуемый диапазон, либо значение

$\eta_g = 0.89$   
 $\eta_{\text{об}} = 0.971$   
 $\eta_{\text{дт}} = 0.933$   
 /Kvo=0.06 - 0.08/  
 /Kvm1=0.5 - 1.1/  
 /Kvm2=0.5 - 1 /  
 /D1osn\_otn=D1/Do=0.8 -1 /  
 /D1prom\_otn=D1\_pr/D1/  
 $d_{\text{val\_1st}} = 61.2$      $d_{\text{val\_Zst}} = 61.2$   
 / консольное РК     $d_{\text{vt}} = 0/$      $_{\text{dvt\_Zst}} = 76.5$   
 $_{\text{S1}} = 4.56$   
 $_{\text{S2}} = 3.09$   
 $_{\text{Z2}} = 8$   
 / W1D1/W2 < 1.4 ; для ns<80 до 2.5 /  
 /  $\beta_1 = 20-25$ .     $\beta_1 = 3 - 8$  гр ; для ns<80 до 15 -18 /  
 / Оптим. по опасн. возникн. кавитации  $\beta_{1\text{р}} \sim 18$  гр  
 $m_o = 1-1.2$ ;  $n_o = 0.3-0.4$  рек.принять  $m_o = 1.2$   $n_o = 0.4$  /

#### Принимаем

$\eta_g \equiv 0.89$   
 $\eta_{\text{об}} \equiv 0.971$   
 $\eta_{\text{дт}} \equiv 0.933$   
 $K_{\text{vo}} \equiv 0.0603$   
 $K_{\text{vm1}} \equiv 0.915$   
 $K_{\text{vm2}} \equiv 1$   
 $D1_{\text{osn\_otn}} \equiv 0.9$   
 $D1_{\text{prom\_otn}} \equiv 1$   
 $d_{\text{vt}} \equiv 77$   
 $S1 \equiv 5$   
 $S2 \equiv 5$   
 $Z1 \equiv 7$      $Z2 = 7$   
 $Z2_{\text{otn}} \equiv 1$   
 $\beta_2 \equiv 23$   
 $\beta_1 \equiv 20$   
 $m_o \equiv 1.2$      $n_o \equiv 0.4$

### Результаты расчета

$\Delta H_{\text{кр}} = 13.13$	$H = 92$	$\frac{H}{Z_{\text{ст}}} = 92$
$\frac{\Delta H_{\text{рас}}}{\Delta H_{\text{кр}}} = 1.2$	$H_t = 103.37$	
$C_{\text{кр}} = 710$	$\eta = 0.806$	
$Do = 165$	$N = 170.5$	
$D1 = 148.5$	$N_{\text{max}} = 204.6$	
$D1_{\text{pr}} = 148.5$	$P = 0.324$	
$b1 = 39.2$	$D2 = 288.9$	
$K1 = 1.281$	$b2 = 20.1$	
$Vo = 5.56$	$K2 = 1.11$	
$Vm1p = 5.08$	$Vu2 = 23.1$	
$Vm1 = 6.51$	$Vm2p = 5.08$	
$W1D1 = 19.04$	$Vm2 = 5.64$	
$W1oD1 = 23.48$	$W2 = 14.43$	
$u1D1 = 22.55$	$u2 = 43.88$	
$u1Do = 25.06$	$\alpha_2 = 12.41$	
$\delta_1 = 3.9$	$\frac{W1D1}{W2} = 1.32$	
$\beta_{1o} = 16.1$		
$\beta_{1p} = 12.7$		

### Диаграмма Айзенштейн (ns = 30 - 250)

$D0_{\text{ekv}} = 136.8$	$D1 = 0$	$D1_{\text{oc}} = 86.3$	$D0 = 147.7$	$D2 = 289.7$
		$d_{\text{vt}} = 55.6$	$b1 = 45.5$	$b2 = 20.1$

# Приложение Б. Результаты программы MathCad «Профилирование лопастей рабочего колеса»

## ПРОФИЛИРОВАНИЕ ЛОПАСТИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА

$R_0 := 0.5-0.165$

$R_1 := 0.5-0.1485$     $b_1 := 0.0392$     $\beta_1 := 20$     $\delta_1 := 0.005$     $Q := \frac{650}{3600}$     $\eta_{ob} := 0.971$     $n := 2900$

$R_{vt} := 0.5-0.077$

$R_2 := 0.5-0.289$     $b_2 := 0.0201$     $\beta_2 := 23$     $\delta_2 := 0.005$     $Z_1 := 7$

$R_{1\_kor\_lop} := 1-0$

$k_Z := 1$     $Z_2 := k_Z \cdot Z_1$   
( $k_Z=1$  - коротких лопаток нет)

$b_- = 0.57$

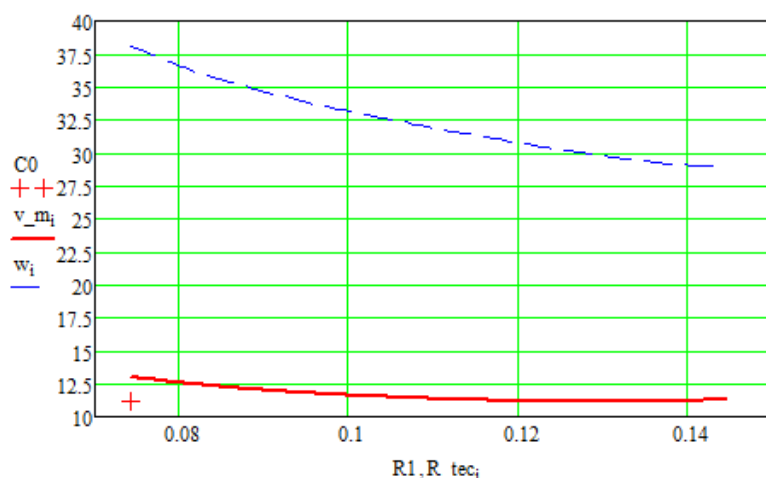
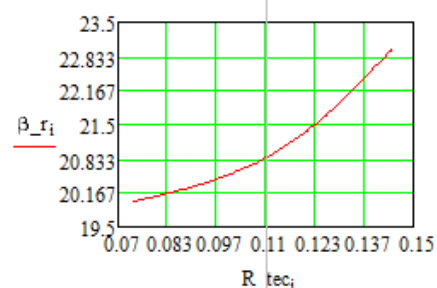
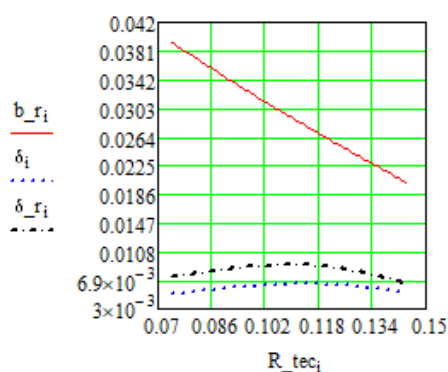
$Rb_- = 0.26$

$\delta_- = 0.6$

$R\delta_- = 0.8$

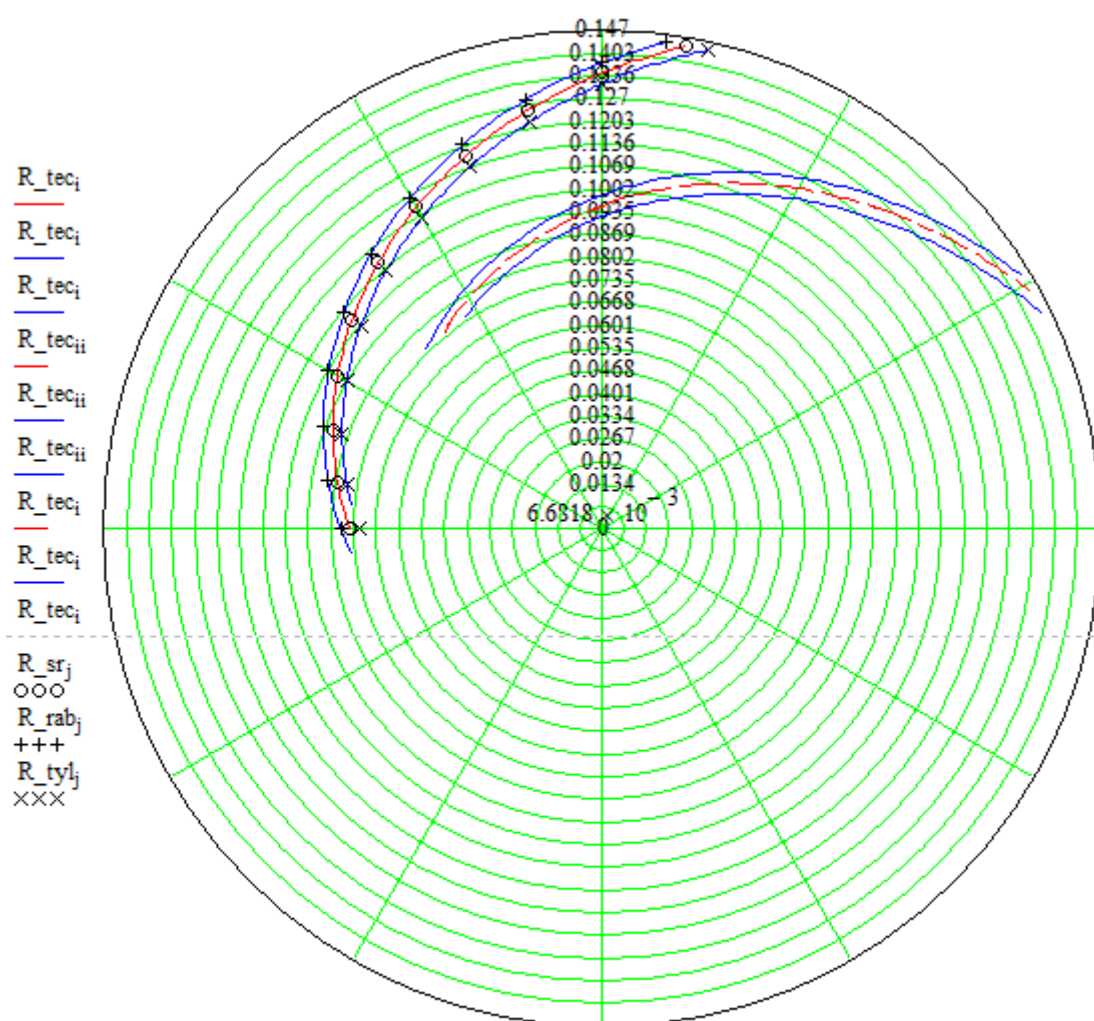
$\beta_- = 0.5$

$R\beta_- = 0.7$



$\beta_{1\_pot} = 30.012$

$C_0 = 11.117$     $u_1 = 22.549$   
 $v_{m_0} = 13.025$     $\max(v_m) = 13.025$   
 $v_{m_N} = 11.305$     $\min(v_m) = 11.117$   
 $\frac{\max(v_m)}{\min(v_m)} = 1.172$   
 $w_0 = 38.082$     $\max(w) = 38.082$   
 $w_N = 28.932$     $\min(w) = 28.932$   
 $\frac{\max(w)}{\min(w)} = 1.316$



$\theta_{1_i}, \theta_{1_{rab_i}}, \theta_{1_{tyl_i}}, \theta_{2_{ii}}, \theta_{2_{rab_{ii}}}, \theta_{2_{tyl_{ii}}}, \theta_{3_i}, \theta_{3_{rab_i}}, \theta_{3_{tyl_i}}, \phi_{-j}, \phi_{rab_{-j}}, \phi_{tyl_{-j}}$



$$R_{sr} := 1000 \cdot R_{sr} \quad R_{rab} := 1000 \cdot R_{rab} \quad R_{tyl} := 1000 \cdot R_{tyl}$$

Координаты входной кромки лопасти

$$\phi_0 = 0 \quad R_{sr_0} = 74.25 \quad 0.5 \cdot 10^3 \cdot \delta_0 = 2.5$$

Координаты профиля

Координаты покрывного диска

$$\phi_{rab_j} = \quad R_{rab_j} = \quad \phi_{tyl_j} = \quad R_{tyl_j} =$$

$$R_{sr_j} = \quad (1000b_{r_})_j =$$

0	76.936	0	71.472
10	81.956	10	76.357
20	87.323	20	81.437
30	93.061	30	86.889
40	99.197	40	92.756
50	105.763	50	99.095
60	112.798	60	105.977
70	120.353	70	113.502
80	128.499	80	121.81
90	137.341	90	131.108
97.45	144.5	102.52	144.5

74.25	39.2
79.131	37.738
84.357	36.183
89.958	34.54
95.972	32.816
102.443	31.012
109.428	29.117
117.004	27.112
125.274	24.97
134.383	22.651
144.5	20.1